

Chapitre 1 - Ondes et particules, supports d'information

Manuel pages 15 à 30

Choix pédagogiques

Il s'agit dans ce chapitre d'une introduction à la description du comportement de la matière sous son double aspect d'ondes et de particules, sans développement théorique. Comme l'indique le titre choisi, le chapitre est construit à partir de l'idée directrice que ondes et particules sont des intermédiaires de transmission des informations qui permettent au scientifique de comprendre l'Univers proche ou lointain.

Pour cette partie du programme, la compétence « Extraire et exploiter des informations » domine largement dans les compétences exigibles. Pour cette raison, le cours contient une seule page « l'Essentiel » qui résume les quelques connaissances exigibles.

Par souci de cohérence et pour ne pas alourdir ce chapitre, l'item du programme « Niveau d'intensité sonore » est traité au chapitre 3 avec les ondes sonores.

Des animations et des vidéos documentaires illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et, certaines d'entre elles, sur les sites Internet compagnon Sirius.

Page d'ouverture

Le montage de la page d'ouverture peut être exploité pour de montrer que l'aspect d'un objet de l'Univers est très différent suivant le domaine de longueur d'onde dans lequel il est observé. Les quatre parties ont été obtenues avec la radiation rouge de l'hydrogène ($H\alpha$) en A ; une radiation ultraviolette en B ; une onde radio en C ; une radiation violette du potassium en D. Chaque domaine de rayonnement dévoile une partie de la structure du Soleil.

Activités

Activité documentaire 1 - Atmosphère et rayonnements dans l'Univers

Commentaires

Cette activité est destinée à montrer que la présence de l'atmosphère terrestre conditionne les observations des rayonnements de l'Univers. Elle s'appuie sur l'analyse d'un graphique.

Réponses

1. Analyser les documents

- a. En ordonnée est représentée la proportion de rayonnement arrêté par l'atmosphère avant d'atteindre le sol pour une longueur d'onde donnée. 100 % correspond à un rayonnement n'atteignant pas le sol ; 0 % correspond à un rayonnement pour lequel l'atmosphère est parfaitement transparente.
- b. En abscisse sont portées les longueurs d'ondes dans le vide des différents rayonnements électromagnétiques. Il faudra remarquer que l'échelle utilisée n'est pas linéaire et on pourra expliquer à cette occasion ce qu'est une échelle logarithmique. On complète l'échelle en multipliant par 10 la valeur indiquée sous la graduation qui précède.
- c. A = ultraviolet ; B = visible ; C = infrarouge ; D = domaine radio.
- d. Les illustrations montrent les instruments d'observation adaptés aux différents domaines des ondes électromagnétiques.

2. Conclure

a et b. Sont observables depuis le sol :

- le domaine visible entre $4,0 \times 10^{-7}$ m et $8,0 \times 10^{-7}$ m avec un télescope terrestre ;
- un large domaine radio entre 10^{-3} m et 10 m (en ordres de grandeur), observable à l'aide de radiotélescopes. *Sur la figure 2 page 16, la limite supérieure du domaine des ondes radio est ramenée à 10 m, cette correction a été effectuée sur le manuel élève.*

Activité documentaire 2 - L'astronomie de l'invisible

Commentaires

Nous approfondissons ici des exemples destinés à montrer l'intérêt des rayonnements électromagnétiques non visibles pour l'étude de l'Univers.

Réponses

Exploiter les documents

- a.** Sur la photographie a, dans le domaine visible, le nuage de gaz et de poussière qui remplit la galaxie arrête une grande partie du rayonnement ; d'autre part, certaines étoiles émettent trop faiblement dans le visible et n'apparaissent pas. Sur la photographie b, en rayonnement infrarouge, le nuage devient transparent et laisse apercevoir des étoiles situées à l'arrière ; de plus, le nuage lui-même émet un rayonnement infrarouge qui le rend visible sur la photographie. Sur la photographie c, ce sont des étoiles brillantes dans l'ultraviolet qui deviennent visibles alors qu'elles n'apparaissaient pas sur la photographie a.
- b.** Le rayonnement thermique est le rayonnement émis par un corps uniquement sous l'effet de sa température. Le nuage est beaucoup trop froid pour émettre dans le visible. Son rayonnement thermique a son maximum d'émission dans l'infrarouge et il est brillant dans ce domaine de radiation.
- c.** Plus la température est élevée, plus la longueur d'onde du maximum d'émission est petite. Les étoiles les plus chaudes apparaissent en bleu (couleur utilisée sur le document pour les UV lointains).
- d.** Un trou noir est un objet qui résulte de l'effondrement d'une étoile et qui a une masse volumique telle que les effets gravitationnels empêchent même la lumière de s'en échapper.
- e.** D'après l'échelle indiquée sur la photo, la zone d'émission radio occupe une longueur totale d'environ $1,4 \times 10^6$ a.l.
- f.** Le rayonnement visible ne constitue qu'une faible partie des rayonnements électromagnétiques émis dans l'Univers. De nombreux objets de l'Univers n'émettent pas ou bien très faiblement dans le domaine visible. Même si un objet est visible, les rayonnements non visibles peuvent fournir des informations supplémentaires. Des milieux opaques à la lumière visible peuvent être transparents dans d'autres domaines.
- g.** Voir la page « l'Essentiel ».

Activité documentaire 3 - Les particules dans l'Univers

Commentaires

Les particules sont envisagées ici du point de vue du transport d'informations portant sur l'Univers et sur la structure intime de la matière. Les interactions avec l'atmosphère sont à nouveau évoquées.

Réponses

1. Analyser le document

a. Rayonnement cosmique : particules de hautes énergies se déplaçant dans l'espace.

Magnétosphère : champ magnétique environnant la Terre (ou un autre objet céleste).

Réactions nucléaires : transformations affectant le noyau des atomes.

b. La figure 5 illustre la formation d'une gerbe de particules. En A, une particule provenant de l'espace interagit avec un atome de l'atmosphère terrestre déclenchant l'émission de plusieurs autres particules.

c. La nature et l'énergie des particules présentes dans les rayons cosmiques ne sont pas prévisibles alors qu'un accélérateur permet de maîtriser les conditions des expériences.

2. Conclure

Les rayons cosmiques apportent des renseignements sur le fonctionnement interne du Soleil (particules solaires) ou sur des événements se produisant dans l'Univers lointain (particules galactiques et extragalactiques).

On peut exploiter ces particules pour étudier leurs interactions avec la matière mais ce type d'étude se fait actuellement presque exclusivement avec les accélérateurs de particules.

Les résultats des chocs de particules de grandes énergies dans les accélérateurs permettent aux chercheurs d'étudier la structure intime de la matière, c'est à dire son fonctionnement au niveau subatomique.

Activité documentaire 4 - À l'écoute de la Terre

Commentaires

Nous envisageons ici les ondes sismiques du point de vue du transfert d'informations : l'étude de ces ondes permet d'analyser la structure du globe terrestre.

Réponses

1. Analyser les documents

a. Le tableau fournit la date et la position du séisme (latitude, longitude et profondeur du foyer). La magnitude indique l'importance du séisme (l'énergie libérée au foyer de ce séisme).

b. En abscisse : le temps.

En ordonnée : la vitesse de déplacement du sol enregistrée par le sismographe.

c. Les effets d'un séisme se manifestent loin du foyer, ce qui signifie que l'énergie libérée se propage à distance. (On anticipe ici sur le chapitre 2 : la propagation d'une onde s'accompagne d'une propagation d'énergie).

2. Interpréter des données et conclure

a. D'après le sismogramme de la figure 7, l'onde P commence à se manifester au niveau du sismographe avant l'onde S. L'onde P (onde primaire) est donc plus rapide que l'onde S (onde secondaire).

b. On remarquera trois phénomènes :

- Au niveau d'une discontinuité, l'onde traverse en partie cette discontinuité avec changement de direction, ce qui est à rapprocher de la réfraction de la lumière.

- Une partie de l'onde est réfléchi au niveau de la discontinuité comme cela se produit également avec les rayons lumineux.

- Enfin, on constate que les ondes ne se propagent pas en ligne droite. On peut évoquer à ce sujet les mirages et se rappeler que la courbure des rayons lumineux est due dans ce cas à la variation de vitesse de propagation de la lumière dans les différentes couches d'air. La courbure des ondes sismiques est aussi due aux variations de structure de l'intérieur du globe terrestre entraînant une variation de la vitesse de propagation.

c. Le signal PcP a subi une réflexion au niveau de la séparation entre manteau et noyau externe. L'analyse de ce signal permet donc de mesurer la profondeur du manteau.

d. Un sismologue dispose des sismogrammes enregistrés en différents points de la surface terrestre avec les dates d'arrivée des différents types d'ondes. Le regroupement des résultats permet de connaître la position du foyer ainsi que l'énergie libérée mesurée par la magnitude. Les données sismiques permettent d'analyser les trajectoires des ondes et leurs vitesses de propagation ce qui apporte au géologue des renseignements sur la structure du sous-sol et du globe terrestre.

Activité expérimentale 5 - Un capteur de lumière

Commentaires

Cette activité répond à la compétence exigible « Pratiquer une démarche expérimentale mettant en œuvre un capteur ou un dispositif de détection ». Nous avons choisi de modéliser un lecteur de code-barres, dispositif rencontré couramment mais dont le principe est en général peu connu. Le capteur proposé dans ce modèle est une photorésistance dont le principe de fonctionnement est particulièrement simple mais on peut envisager d'utiliser aussi une photodiode ou un phototransistor. Le système de codage est seulement évoqué, une étude approfondie pourra être faite dans le chapitre 26.

Cette activité présente une bonne opportunité pour faire établir un protocole par les élèves.

Réponses

1. Observer

On doit observer que la résistance de la photorésistance diminue (**étape 1**) lorsque l'on augmente l'éclairement et la tension U_{KL} augmente (**étape 2**).

2. Interpréter

a. $U_{KL} = RI$.

b. Puisque la résistance R_{photo} diminue lorsque l'on augmente son éclairement, l'intensité du courant dans le circuit, alimenté par une tension constante, augmente ainsi que la tension RI .

3. Élaborer un protocole

On attend des élèves que la source de lumière choisie soit la diode laser. Ce choix doit être justifié par la nécessité d'une source assez directive pour ne couvrir qu'une bande à la fois. Il est toutefois possible d'utiliser une petite lampe à condition de prévoir un dispositif limitant la largeur du faisceau.

On peut utiliser une photocopie du modèle de code-barres représenté dans le document 10, en l'agrandissant environ deux fois.

Pour réinvestir le montage de la figure 11, il suffit de remplacer le voltmètre par une entrée de l'interface.

Pour réaliser l'enregistrement, on fera glisser à vitesse régulière le code-barres entre la source laser et la photorésistance. Pour mieux rapprocher le modèle du dispositif réel, on peut aussi enregistrer le faisceau réfléchi.

4. Exploiter les résultats

a. En transparence, le passage d'une bande claire produit une tension haute tandis qu'une bande sombre est repérée par une tension basse.

La distinction entre bande large et bande étroite est donnée par la durée d'enregistrement.

b. Le signal enregistré dépend : de la vitesse de défilement ; de la position du code-barres (l'inclinaison des barres ou du support par rapport à la direction du défilement peuvent modifier la largeur apparente des barres) et du sens de défilement.

Un système informatique doit reconnaître un code malgré les variations possibles du signal enregistré et quel que soit le sens du défilement.

5. Faire une recherche

On pourra citer les appareils photographiques et les caméras, certains systèmes de blocage de sécurité de portes, le déclenchement automatique des feux de croisement des voitures, etc.

Exercices d'application

5 minutes chrono !

1. Mots manquants

- mécaniques (*et non « électromagnétiques » : cette erreur est corrigée dans le manuel élève*)
- logarithme
- spatiaux
- ultraviolets
- énergies ; accélérateurs de particules

2. QCM

- Ondes radio.
 - Ultraviolet
 - N'a pas d'unité. La magnitude fait intervenir un rapport entre énergies ou entre amplitudes.
 - Augmente d'une unité si l'énergie libérée au foyer est multipliée environ par 30. La valeur exacte est $\sqrt{1000}$.
 - Flux de particules. On fait une distinction entre les rayonnements électromagnétiques et les particules qui arrivent de l'espace.
 - Infrarouge. Le rayonnement thermique émis par les objets froids a son maximum dans l'infrarouge.
 - Arrêté par l'atmosphère. En l'absence d'atmosphère (et en particulier de la couche d'ozone), toute vie serait rendue impossible par les rayonnements ultraviolets de courtes longueurs d'onde.
 - Le point de la surface terrestre à la verticale du foyer. Ne pas faire la confusion entre foyer et épicycle. D'autre part, on parle de dégâts pour les réalisations humaines. Ils dépendent de l'occupation du sol ainsi que de sa structure : les dégâts ne sont pas les plus importants à l'épicentre.
-

Compétences exigibles

- Les planètes et les astéroïdes ; les poussières interstellaires.
 - Le Soleil ; les étoiles chaudes.
 - Le rayonnement fossile de l'Univers ; les radiosources lointaines (il s'agit probablement d'ondes émises par des particules chargées fortement accélérées, par la présence d'un trou noir par exemple) ; l'hydrogène interstellaire émet une onde radio de fréquence caractéristique.
-

- Sources naturelles : rayonnement cosmique ; on peut aussi citer les particules α et β produites par la radioactivité.
Sources artificielles : accélérateurs de particules.
-

- De la bouche à l'émetteur : onde sonore.
De l'émetteur au récepteur (via les antennes) : onde radio.
Du récepteur à l'oreille du correspondant : onde sonore.
-

6. Léo sera « traversé » par les ondes électromagnétiques provenant d'émetteurs de stations de radio et de télévision, de satellites GPS et de télécommunications... ainsi que par des particules issues du rayonnement cosmique et de la radioactivité naturelle.

7. a. Récepteur radio ; tous les appareils de communication sans fil (téléphone sans fil ou téléphone portable) ; appareils fonctionnant en wi-fi ; appareils télécommandés (jouets, systèmes de fermetures à distance) ; etc.

b. Appareil photo : barrière optique (porte d'ascenseur) ; déclenchement automatique des feux de croisement ; etc.

c. Capteur de signal de télécommande d'un téléviseur ; détecteur d'alarme antivol ; etc.

8. L'astronomie spatiale permet de capter des ondes qui sont arrêtées par l'atmosphère comme les infrarouges et les ultraviolets. On peut donc détecter et étudier des objets ou des phénomènes qui ne sont pas observables en astronomie terrestre : nuages de poussières et étoiles qui y sont dissimulées, étoiles très chaudes ou très froides non observables en lumière visible mais observables respectivement en ultraviolet et en infrarouge. Le professeur pourra aussi évoquer d'autres rayonnements (X et gamma) produits par les phénomènes les plus violents de l'Univers tels que ceux provoqués par la présence d'un trou noir supermassif ou la formation d'une hypernova.

Compétences générales

9. a. Faire la somme des produits nf et diviser par le nombre de comptages, soit 100.

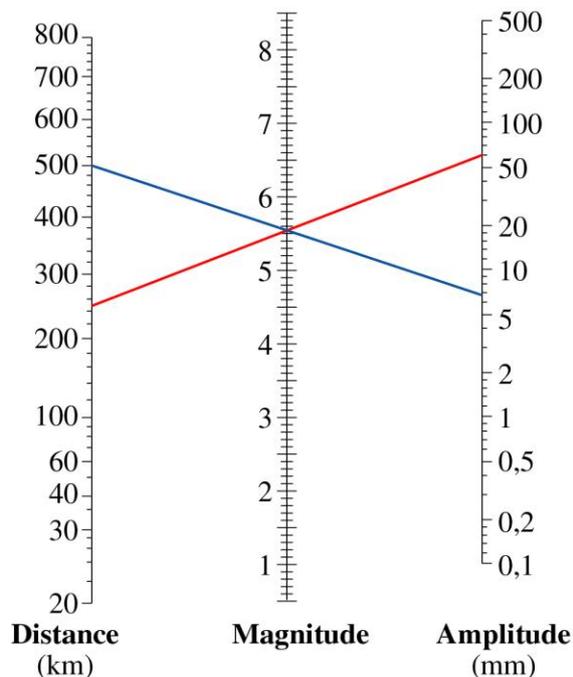
Résultat : 14,3.

b. C'est la valeur la plus fiable pour décrire les résultats des mesures.

10. a. La magnitude est représentée ici sur une échelle linéaire ; l'amplitude est représentée sur une échelle logarithmique : la distance entre les graduations est la même pour des valeurs qui sont dans le même rapport. On évitera l'erreur de dire que les distances sont portées sur une échelle logarithmique car le critère précédent ne se vérifie pas.

b. On trace le segment représenté en rouge sur la figure ci-dessous. On trouve une magnitude de 5,55.

c. Pour le même séisme, la magnitude a la même valeur. On trace le segment joignant la graduation 500 km de l'échelle des distances avec la graduation 5,55 de l'échelle des magnitudes (segment bleu). On trouve une amplitude juste un peu inférieure à 7 mm.



© COREDOC, NATHAN 2012

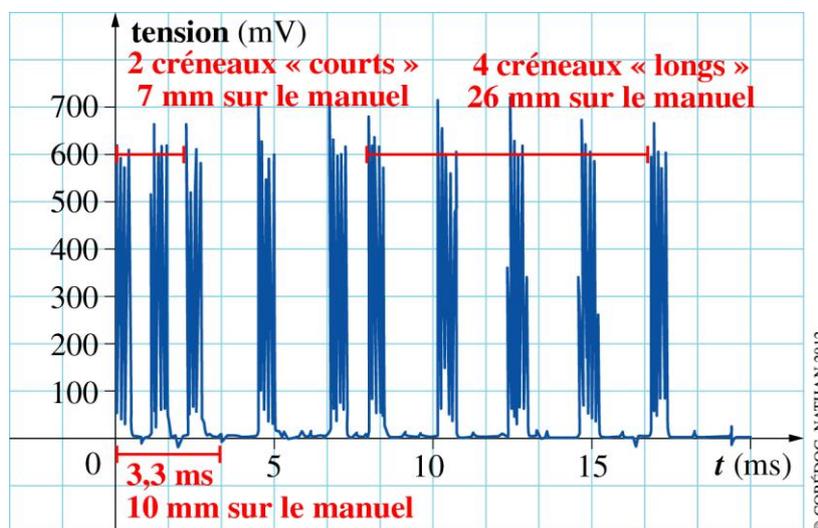
11. a. $M_2 = M_1 + \frac{2}{3} \log\left(\frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1}\right) = 7,4.$

b. $\frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1} = 10^{\frac{3}{2}(M_2 - M_1)} = 5,6.$

12. a. Un objet coloré absorbe une partie des radiations reçues. La couleur est le résultat de la superposition des radiations réémises.

b. Le pigment fluorescent réémet une lumière visible alors qu'il reçoit un rayonnement non visible ultraviolet : la longueur d'onde de la lumière réémise est supérieure à la longueur d'onde du rayonnement excitant cette fluorescence.

13. a. Pour trouver la durée d'un créneau, il faut faire la mesure sur plusieurs intervalles consécutifs.



Sur le manuel, l'échelle donne 1 mm pour 0,33 ms.

Un créneau court correspond à $\frac{1}{2}(7 \times 0,33) = 1,2$ ms.

Un créneau long correspond à $\frac{1}{4}(26 \times 0,33) = 2,1$ ms.

b. Il faut diminuer la durée d'acquisition (1,2 ms par exemple) sans changer le nombre de points de mesure.

Remarque : le créneau court de 1,2 ms, tel que la tension soit 0,6 V pendant 0,6 ms puis 0 V pendant 0,6 ms, correspond au 0 en binaire.

Le créneau long de 2,1 ms, tel que la tension soit 0,6 V pendant 0,6 ms puis 0 V pendant 1,5 ms, correspond au 1 en binaire.

Ainsi, le signal du schéma correspond au nombre binaire suivant, en 10 bits :

0 0 1 1 0 1 1 1 1 1

Exercices de méthode**14. Exercice résolu.****15. b.** $\bar{n} = 112$.**c.** Nombre de coups attendu : $100 \times \bar{n} = 1,1 \times 10^4$.**d.** La moyenne des écarts à la moyenne est nulle.

On pourra donner une justification de l'expression de l'écart-type pour caractériser la dispersion des résultats. Il faut empêcher que les écarts à la moyenne par excès compensent les écarts par défauts. On peut penser à utiliser la valeur absolue mais il s'agit d'une grandeur peu commode dans les calculs. L'élevation au carré est la solution satisfaisante.

e. $s_{\text{exp}} = 12,3$.

Un fichier Excel est disponible dans le Manuel Numérique Enrichi. Il donne le détail du calcul et complète le résultat avec une évaluation de l'incertitude avec un niveau de confiance de 95 %. Extrait de ce tableau Excel :

Ecart type expérimental :	
$s_{\text{exp}} =$	racine ($\sum (\Delta n)^2 / N-1$) = 12,3
Incertitude type :	
$s =$	racine(1/N) * s_{exp} = 2,05
Incertitude de mesure :	$\Delta M = k * s$
k facteur d'élargissement	
pour un niveau de confiance 95 %	
	k = 2
	$\Delta M = 4,1$
$M = 112 \pm 4$	

16. a. Au cours de la réaction nucléaire décrite, des noyaux d'atomes (ici, noyaux d'atomes d'hydrogène) s'associent pour former des atomes plus lourds. Il s'agit d'une réaction de fusion.

b. Les neutrinos proviennent des réactions nucléaires qui se produisent au cœur du Soleil comme il est indiqué à la ligne 2. C'est donc de cette région qu'on peut obtenir des renseignements à partir de l'étude des neutrinos solaires.

c. D'après la ligne 3 du texte, le nombre de noyaux d'hélium formés est la moitié du nombre de neutrinos émis.

d. On fait interagir les neutrinos avec une grande quantité de matière comme l'indique la phrase « les détecteurs sont de grands réservoirs contenant des milliers de m³ d'eau ».

Le professeur pourra faire remarquer que la probabilité d'interaction est extrêmement faible pour un seul neutrino mais le nombre de neutrinos est, lui, extrêmement grand. Cependant, le nombre d'interactions observées n'est que de quelques événements par jour.

Exercices d'entraînement

17. a. UV A : ce sont les ultraviolets solaires ayant les plus grandes longueurs d'onde, de 400 nm à 315 nm.

UV B : ultraviolets solaires de longueurs d'onde moyennes, de 315 nm à 280 nm.

UV C : ultraviolets solaires de courtes longueurs d'onde, de 280 nm à 100 nm.

b. Ce classement correspond à une dangerosité croissante mais à un pouvoir pénétrant dans la peau décroissant.

c. Effets utiles :

- UV A : bronzage ;

- UV B : synthèse de la vitamine D, effets bénéfiques sur certaines pathologies de la peau ;

- UV C (avec sources artificielles) : effets germicides.

Effets néfastes :

- UV A : vieillissement de la peau, favorisent l'apparition de cancers de la peau, dangereux pour les yeux des jeunes enfants ;

- UV B : coups de soleil, vieillissement de la peau, cancers de la peau, dangereux pour les yeux ;

- UV C : très nocifs mais n'atteignent pas le sol.

d. Les ultraviolets sont essentiellement absorbés par la couche d'ozone.

e. Les UVA sont les moins absorbés, ils représentent 95 % des ultraviolets atteignant les sols (cette proportion est due à la différence d'absorption par l'atmosphère mais aussi à la différence d'émission par le Soleil).

18. a. Au rayonnement infrarouge.

b. La longueur d'onde du maximum d'émission (située dans l'infrarouge) augmente avec la température. L'image indique par des fausses couleurs la température des différentes zones filmées et permet de repérer les personnes fiévreuses.

19. a. $M_2 - M_1 = \log 100 = 2$.

b. $M_2 - M_1 = \frac{2}{3} \log 100 = 1,3$.

c. $\frac{A_2}{A_1} = 1,0 \times 10^4$.

d. $\frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1} = 10^{\left(\frac{3}{2} \times 4\right)} = 1,0 \times 10^6$.

e. L'échelle logarithmique permet de réduire l'échelle des valeurs caractérisant les séismes possibles.

20. a. Les neutrons sont produits par interaction de particules alpha avec une cible de béryllium.

b. L'interaction des neutrons avec de la paraffine produit une émission de protons. C'est la détection de ces protons qui constitue une détection indirecte des neutrons incidents.

c. Neutrons et photons sont des particules neutres.

d. L'hypothèse d'un rayonnement gamma aboutissait au non-respect de la conservation de l'énergie.

21. a Le personnage représente un observateur terrestre. La figure dessinée sur le cylindre représente la Voie Lactée, c'est à dire la Galaxie vue par l'observateur terrestre.

b. La bande sombre est due à des poussières intersidérales abondantes dans le plan galactique.

c. Les nuages de poussières sont bien observables en infrarouge (suivant la longueur d'onde, on peut observer le nuage lui-même ou bien les zones de la Galaxie dissimulées par celui-ci dans le domaine visible).

22. *Sur le spécimen, les ordonnées du spectre sont rognées, elles sont bien visibles dans le manuel élève.*

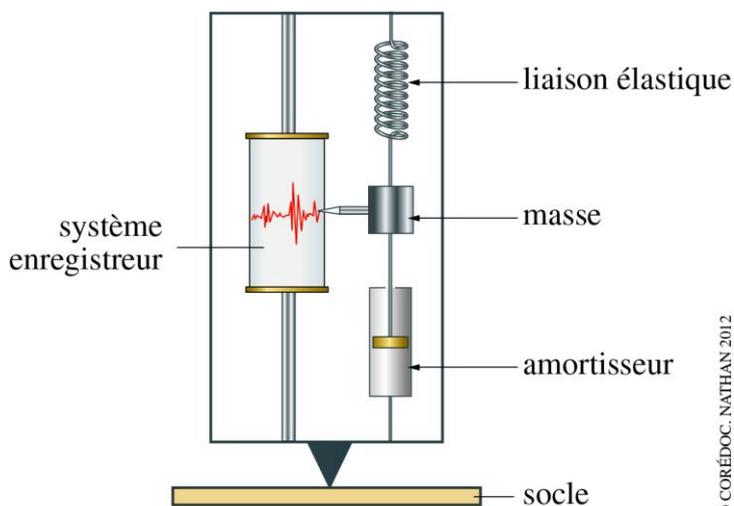
a. Qualités de la méthode : grande sensibilité et non destructive.

b. Il faut donner aux particules l'énergie suffisante pour interagir avec les atomes de la cible.

c. Une source radioactive ne permet pas de contrôler les énergies des particules ainsi que leur nombre.

d. On retrouve sur le graphique des pics pour les énergies des photons émis qui correspondent à celles données pour le plomb : il s'agit du massicot.

23. a. *La figure de cet exercice 23 page 27 est remplacée sur le manuel élève par la figure correspondant à celle de la simulation :*



La simulation est disponible sur le site compagnon Nathan, dans le Manuel Numérique Enrichi et à l'adresse internet suivante :

http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Meca/Oscillateurs/sismo.html

b. Dans le référentiel terrestre, le socle, le cylindre et les masses sont mobiles.

c. Dans le référentiel du socle, le socle et le cylindre sont immobiles ; la masse est mobile.

d. Si l'amortissement est trop grand, la masse serait rigidement liée au support et elle serait immobile par rapport au cylindre enregistreur, on n'enregistrerait aucun signal.

e. Un sismographe doit être sensible et reproduire fidèlement le mouvement du sol (à un facteur de proportionnalité près).

f. Pour connaître complètement le mouvement d'un point du sol, il faut enregistrer les coordonnées de la position ou de la vitesse dans les trois directions de l'espace.

24. 1. a. La source d'énergie est le rayonnement des étoiles chaudes.

b. L'état fondamental est l'état d'énergie le plus bas de l'atome.

Les atomes excités ont une énergie supérieure à celle de l'état fondamental.

c. L'atome passe d'un niveau d'énergie à un niveau inférieur.

d. $\lambda = \frac{hc}{\Delta\mathcal{E}}$ avec $\Delta\mathcal{E} = 13,6 \text{ eV} = 13,7 \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$, soit $\lambda = 91,4 \text{ nm}$.

Cette limite est dans le domaine de l'ultraviolet ; le texte indique que le gaz est excité par le rayonnement ultraviolet des étoiles voisines.

2. a. La lumière est renvoyée dans toutes les directions.

b. L'image est prise en infrarouge, lumière invisible. L'image est restituée en fausses couleurs.

c. Le nuage est beaucoup plus visible sur la photographie c ; il apparaît beaucoup plus d'étoiles sur la photographie d.

Sur la photographie c, les étoiles situées à l'intérieur du nuage sont dissimulées par celui-ci.

Sur la photographie d, le nuage de gaz n'émet probablement pas (ou peu) dans le domaine infrarouge concerné. De plus, les infrarouges ne sont pas diffusés et le rayonnement infrarouge des étoiles cachées par la poussière dans le domaine visible peut traverser celle-ci.

d. Ces étoiles sont trop froides pour émettre dans le domaine visible ; leur rayonnement thermique se produit dans l'infrarouge, elles sont visibles sur la photographie d.

3. a. La première phase est la contraction de la matière due à l'interaction gravitationnelle.

b. L'énergie produite par une étoile en activité est due à la fusion nucléaire.

c. Pour que la fusion nucléaire puisse se produire, il faut que la température dépasse 10 MK.

Exercices de synthèse

25. a. Chaque seconde, il y a autant de neutrinos qui traversent la surface de la sphère de rayon r que de neutrinos émis.

On pourra utiliser comme argument que tous les neutrinos qui sont émis à la même vitesse à un instant donné atteignent en même temps la surface de la sphère de rayon r .

Remarque : les neutrinos se déplacent tous à la vitesse de la lumière mais ceci ne constitue pas une condition nécessaire pourvu qu'on puisse admettre que l'émission se produit de façon uniforme au cours du temps.

b. L'émission des neutrinos se produit de façon identique dans toutes les directions, autrement dit, le nombre de neutrinos qui traversent la sphère de rayon R se répartit uniformément sur cette surface : le nombre n de neutrinos traversant la surface s en 1 seconde est proportionnel à s :

$$n = N \times \frac{s}{S}$$

en appelant S l'aire de la sphère de rayon R et N le nombre de neutrinos émis par le soleil en une seconde.

$$n = N \times \frac{s}{4\pi R^2}$$

c. Le calcul donne 70 milliards de neutrinos par seconde, ce qui est compatible avec la valeur annoncée, 65 milliards, compte tenu du fait que le nombre de neutrinos émis est fourni avec un seul chiffre significatif.

26. 1. a. La force électrique.

b. Le proton doit être accéléré à chaque passage. Il doit donc à chaque fois se diriger de l'électrode - vers l'électrode +. Il faut que la tension change de signe à chaque traversée.

c. Le champ magnétique permet de courber la trajectoire.

d. La courbure de la trajectoire permet de faire effectuer plusieurs passages dans le champ électrique ce qui fait chaque fois gagner de l'énergie au proton.

2. a. L'énergie déposée est l'énergie que les protons cèdent à la matière environnante.

b. L'énergie déposée est utilisée pour arracher des électrons aux atomes.

c. L'énergie déposée par les protons est en grande partie déposée en profondeur là où elle est utile tandis que l'énergie du rayonnement électromagnétique diminue dès la pénétration dans le tissu. Il perd de l'efficacité pour la zone à traiter et la plus grande partie de son énergie agit sur les cellules saines.

d. L'énergie du faisceau modulé est déposée sur une plus grande épaisseur mais il y a plus d'énergie perdue sur le trajet. Le faisceau modulé pourra agir sur toute l'épaisseur de la tumeur

e. La tumeur traitée se trouve à environ 25 cm de profondeur.

f. Il faut mesurer la largeur du « plateau » : on trouve environ 3,5 cm.

3. a. Puisque le proton fournit de l'énergie au milieu traversé, son énergie diminue. **b.** L'énergie du proton est due ici à sa vitesse : donc celle-ci diminue.

c. L'énergie déposée est plus grande en fin de parcours donc lorsque la vitesse est la plus faible : le pouvoir ionisant diminue si sa vitesse augmente.

27. 1. a. Les particules qui produisent un signal sont des particules électriquement chargées.

b. À énergies égales, le signal ne dépend pas du type de particule.

c. Les porteurs de charges sont :

- des électrons qui se dirigent vers l'électrode + ;

- des ions positifs qui se dirigent vers l'électrode -.

d. L'amplitude du signal augmente avec l'énergie de la particule.

2. a. Les chocs de la particule incidente arrachent des électrons aux atomes rencontrés.

b. Les particules produites par un choc sont accélérées par le champ électrique et peuvent à leur tour interagir avec d'autres atomes. Il y a un effet avalanche.

3. Le signal produit à chaque fois la plus grande amplitude possible. On ne peut plus distinguer les énergies.

4. a. « Le passage d'une particule à proximité d'un fil d'anode déclenche dans celui-ci un signal » : cela signifie que, si on sait repérer le fil émettant un signal, on sait aussi que, à l'instant où le signal est émis, la particule est à proximité de ce fil.

b. En combinant les informations données par plusieurs fils, on peut connaître les positions successives de la particule. En utilisant un grand nombre de fils, on peut obtenir une grande précision dans le suivi de la trajectoire.

c. On peut attendre une réponse où l'on relie l'importance du signal avec l'énergie de la particule (en réalité, la proportionnalité est entre la quantité d'électricité détectée et l'énergie de la particule).

28. Rédiger une synthèse de documents

On attend ici que soient respectées les trois parties du sujet : une présentation de la méthode, un développement de l'utilisation de la thermographie dans le domaine du bâtiment et enfin une vue d'ensemble des difficultés d'interprétation d'une image thermique.

Les éléments suivants doivent apparaître dans la rédaction de la synthèse (les expressions surlignées ou une formulation équivalente sont exigibles).

Présentation de la méthode : l'élève doit montrer qu'il a compris qu'un corps, aux températures concernées, émet un rayonnement thermique dont la longueur d'onde du maximum d'émission correspond à l'infrarouge et dépend de la température. On enregistre, avec un capteur approprié, une image infrarouge des objets observés. Cette image doit être restituée en fausses couleurs, chaque couleur correspondant à un domaine de longueur d'onde IR associé lui-même à une température.

Application au domaine du bâtiment : la méthode est utilisée pour étudier les déperditions d'énergie des bâtiments en vue d'étudier la qualité de leur isolation thermique ou d'en réparer des défauts. On devra préciser que la méthode est aussi utilisée pour détecter d'autres défauts : les fuites d'eau ou de canalisations de chauffage ainsi que les défauts des circuits électriques (on pourra citer et interpréter le document 5 où l'on constate une surchauffe sur le fil central).

Difficultés d'interprétation : Il existe une relation entre la température et le rayonnement thermique dans le cas idéal du « corps noir ». On doit apporter une correction pour tenir compte de l'écart entre le comportement des matériaux avec celui du corps noir. D'autre part, le rayonnement enregistré n'est pas uniquement constitué par le rayonnement thermique de l'objet étudié, il faut tenir compte aussi du rayonnement provenant de l'environnement et réfléchi ou diffusé par le matériau photographié. À ce sujet, on devra évoquer l'exemple fourni par le document 6 : l'image de la verrière ne fournit aucun renseignement sur la paroi photographiée parce que le rayonnement enregistré provient de la réflexion par le verre du ciel ou d'un mur voisin.

Chapitre 2 – Caractéristiques des ondes

Manuel pages 31 à 50

Choix pédagogiques

Le cours de ce chapitre débute par l'étude de la propagation des ondes progressives. La description de ce phénomène est illustrée d'exemples concrets avant un énoncé de la définition d'onde progressive à une dimension.

La notion de retard est introduite afin d'établir la relation entre distance, retard et célérité.

Quelques remarques sont faites sur l'influence du milieu de propagation sur la célérité.

Le cas des ondes progressives sinusoïdales est traité dans une deuxième partie. Les périodes spatiale et temporelle sont définies et des pistes pour leurs déterminations sont proposées.

A partir des définitions précédentes, on établit la relation entre la célérité, la période et la longueur d'onde. On propose alors une autre définition de la longueur d'onde issue de cette relation.

Le chapitre s'achève avec une remarque sur les ondes lumineuses, où l'indice de réfraction et la couleur sont reliés aux grandeurs caractéristiques des ondes sinusoïdales. Ces notions seront utilisées dans les chapitres sur les interférences et sur le stockage d'informations sur CD.

Les connaissances acquises dans les classes antérieures sur la vitesse et la fréquence d'un phénomène périodique sont réinvesties dans ce chapitre.

Des animations et des simulations ont été créées pour illustrer ce chapitre et aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi.

Page d'ouverture

La description de la photographie doit permettre d'introduire la notion d'onde grâce à l'exemple des ondes sismiques. On peut alors demander aux élèves de citer d'autres exemples d'ondes avec pour objectif la question suivante : « Qu'est-ce qu'une onde progressive ? »

La discussion peut aussi soulever le problème de la vitesse de propagation des ondes et, par exemple, l'application pratique permettant de répondre à la question suivante : « Peut-on prévoir l'arrivée d'une secousse sismique ? »

La photographie montre des vagues sur la partie inférieure de la route, ce qui permet de discuter de l'intérêt de paramètres (comme l'élongation) utilisés pour décrire une onde sinusoïdale.

Toutes ces questions seront traitées dans les différentes activités documentaires et expérimentales.

Activités

Activité documentaire 1. Définir une onde progressive

Commentaires

Cette activité débute par l'étude de deux photographies : un questionnement très guidé conduit l'élève à énoncer une définition d'onde progressive. De nombreuses situations illustrées par des photographies permettent un réinvestissement immédiat de la définition énoncée.

Réponses

1. Analyser les documents

- Un participant d'une ola se lève puis se rassoit.
- Après le passage de la perturbation, les spectateurs restent à leur place.
- Il n'y a pas de transport de matière dans la direction de propagation au cours d'une ola. Il n'y a pas de transport de matière le long d'un fouet lorsque le dompteur donne une impulsion à ce dernier.
- L'énergie communiquée au fouet par le dompteur s'est propagée le long du fouet.

2. Conclure

- Une onde progressive est le phénomène de **propagation** d'une **perturbation** sans **transport de matière**, mais avec transport d'**énergie**.
- La ola n'est pas une onde car les spectateurs ne se communiquent pas l'énergie les uns aux autres.
- Les situations correspondant à une onde progressive sont : a ; c ; d ; e ; f.

Activité documentaire 2. Comprendre la propagation d'une onde

Commentaires

Cette activité permet de déterminer la célérité d'une onde grâce à des photographies issues de vidéos. (Les vidéos, disponibles sur le site compagnon, permettent également de réaliser un pointage.)

L'étude de la propagation de l'onde le long de la corde est détaillée pour présenter une méthode de détermination de la célérité.

Un réinvestissement de la méthode est proposé pour l'étude de la propagation d'une perturbation le long d'un ressort.

Réponses

1. Analyser les documents

- Un point de la corde se déplace verticalement lors du passage de la perturbation.
- La direction de la propagation de la perturbation est horizontale.

2. Interpréter les informations

- Cette onde est transversale.
- Pour déterminer la distance d parcourue entre les images 1 et 5, on reporte le point P_2 sur l'image (a), puis on mesure la distance P_1P_2 , soit $P_1P_2 = 4,7$ cm.

L'échelle du document se détermine grâce à la règle graduée :

$(102 \text{ cm})_{\text{réel}}$ correspond à $(4,3 \text{ cm})_{\text{photo}}$ et $(1 \text{ cm})_{\text{photo}}$ correspond à $(23,7 \text{ cm})_{\text{réel}}$.

$$d = (P_1P_2)_{\text{réel}} = 4,7 \times 23,7 = 1,1 \times 10^2 \text{ cm.}$$

- La durée écoulée entre les images 1 et 5 est $\tau = \frac{1}{30} \times 4 = 0,13$ s.

- La vitesse de propagation ou célérité se calcule alors de la façon suivante :

$$v = \frac{d}{\tau} = \frac{1,1 \times 10^2 \times 10^{-2}}{0,13} = 8,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}.$$

3. Réinvestir

- Un point du ressort se déplace horizontalement lors du passage de la perturbation.
- La direction de la propagation de la perturbation est horizontale.
- Cette onde est longitudinale.

- Pour déterminer la distance parcourue entre les images 1 et 5, on reporte le point P_2 sur l'image (a), puis on mesure la distance P_1P_2 , soit $P_1P_2 = 1,5$ cm.

L'échelle du document est la même que précédemment : $(1 \text{ cm})_{\text{schéma}}$ correspond à $(23,7 \text{ cm})_{\text{réalité}}$.

$$d = (P_1P_2)_{\text{réel}} = 4,7 \times 1,5 = 7,0 \text{ cm.}$$

- La durée écoulée entre les images 1 et 5 est : $\tau = \frac{1}{30} \times 4 = 0,13$ s.

- La vitesse de propagation ou célérité se calcule alors de la façon suivante :

$$v' = \frac{d}{\tau} = \frac{7,0 \times 10^{-2}}{0,13} = 0,54 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}.$$

Activité expérimentale 3. Le phénomène de propagation d'une onde

Commentaires

Cette activité expérimentale permet de mesurer la célérité des ultrasons : un émetteur ultrasonore envoie des salves courtes à deux récepteurs éloignés d'une distance $d = 0,60$ m. La mesure de la durée de leur parcours à l'oscilloscope permet d'en déduire la célérité des ultrasons dans l'air.

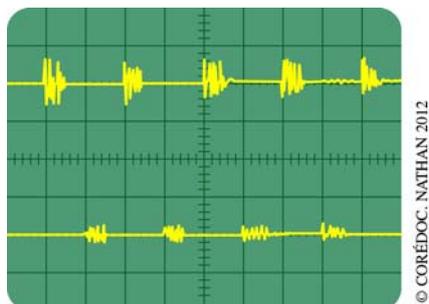
L'activité se poursuit avec un réinvestissement de la célérité des ultrasons pour mesurer les dimensions d'une boîte.

Enfin, un protocole est à proposer pour justifier la meilleure acoustique des théâtres antiques extérieurs par rapport aux salles de spectacle couvertes.

Réponses

1. Observer

a. Ecran de l'oscilloscope :



b. Le même signal est reçu sur les deux récepteurs avec un décalage de 1 division, donc :

$$\tau = 1 \times b = 1 \times 2 = 2 \text{ ms.}$$

2. Exploiter la mesure

a. Les deux tensions issues de R_1 et de R_2 ont des valeurs maximales différentes, car il y a amortissement de l'onde. Le milieu absorbe une partie de l'énergie transportée.

b. Célérité v de l'onde : $v = \frac{d}{\tau} = \frac{0,60}{2 \times 10^{-3}} = 3 \times 10^2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

3. Exploiter l'oscillogramme

a. Le décalage est de 2,8 divisions, donc $\Delta t = 2,8 \times b = 2,8 \times 500 = 1,4 \times 10^3 \mu\text{s} = 1,4 \text{ ms}$.

b. $d = v \times \Delta t = 340 \times 1,4 \times 10^{-3} = 4,8 \times 10^{-3} \text{ m} = 0,48 \text{ m} = 48 \text{ cm}$.

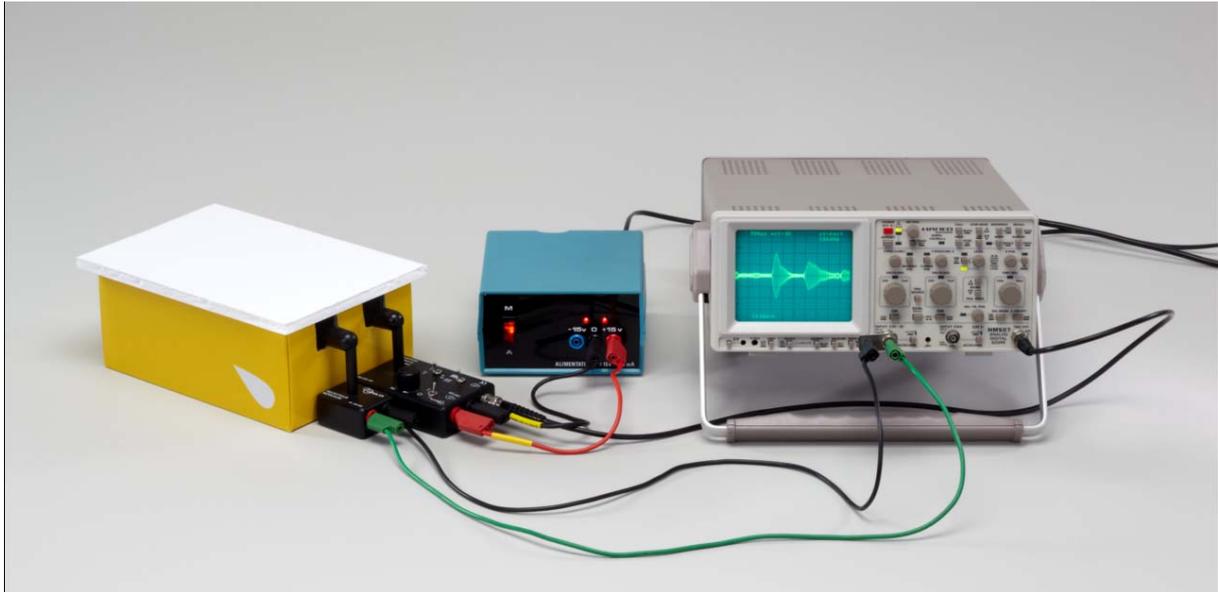
c. Cette distance est égale au double de la longueur de la boîte. Le deuxième signal correspond à l'écho du premier signal, telle que l'onde parcourt deux fois la longueur de la boîte entre le premier et le deuxième signal.

d. Le phénomène étudié précédemment est la réflexion des ondes ultrasonores. Il est utilisé pour les télémètres ultrasonores, l'échographie, l'écholocation chez les dauphins ou les chauffe-souris...

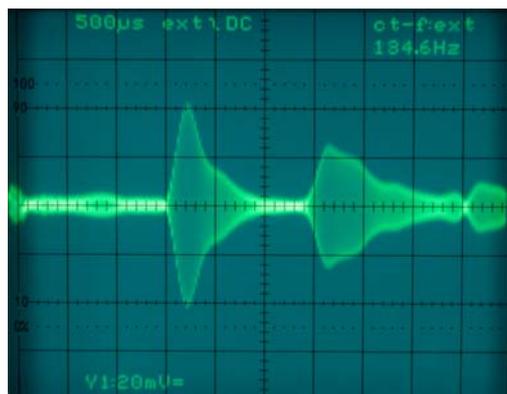
4. Imaginer et mettre en œuvre un protocole

Pour justifier que l'acoustique d'un théâtre antique extérieur est meilleure que celle d'une salle de spectacle couverte, on réalise l'enregistrement précédent en déposant ou en enlevant le couvercle de la boîte.

Avec le couvercle (salle de spectacle couverte), on observe des échos supplémentaires. Sans le couvercle (théâtre antique extérieur), les échos successifs s'amortissent rapidement, ce qui justifie la meilleure acoustique observée dans ce type d'infrastructure.



Dispositif de l'expérience avec le couvercle sur la boîte.
© Frédéric Hanoteau.



Écran de l'oscilloscope obtenu
avec le dispositif ci-dessus.
© Frédéric Hanoteau.

Activité expérimentale 4. Double périodicité d'une onde sinusoïdale

Commentaires

Cette activité permet d'introduire les notions de périodes temporelle et spatiale en utilisant une vidéo d'une onde sinusoïdale à la surface de l'eau d'une cuve à ondes.

Un défilement image par image de la vidéo permet de déterminer la période temporelle de l'onde.

Grâce à une image extraite de la vidéo, on détermine la période spatiale (ou longueur d'onde) de l'onde sinusoïdale.

Réponses

1. Interpréter la période temporelle

a. Il faut faire défiler 19 images pour observer le passage de 10 rides brillantes sur le point M .

$$10 T = 19 \times \frac{1}{30}, \text{ soit } T = \frac{1}{10} \times 19 \times \frac{1}{30} = 6,3 \times 10^{-2} \text{ s.}$$

$$\text{b. } f = \frac{1}{T} = \frac{1}{6,3 \times 10^{-2}} = 16 \text{ Hz.}$$

2. Interpréter la période spatiale

a. La perturbation qui se déplace dans le milieu est périodique dans l'espace, car on mesure la même distance entre deux points du milieu dans le même état vibratoire.

b. Calcul de la longueur d'onde du document 11 : l'échelle du document est $(15 \text{ cm})_{\text{réel}} \rightarrow (4,5 \text{ cm})_{\text{photo}}$.

$$\text{Donc : } (6 \lambda)_{\text{photo}} = 2,7 \text{ cm, soit } \lambda = \frac{1}{6} \times 2,7 \times \frac{15}{4,5} = 1,5 \text{ cm.}$$

Activité expérimentale 5. Caractéristiques d'une onde sinusoïdale

Commentaires

Cette activité débute par la détermination de la période temporelle d'une onde ultrasonore : un émetteur envoie en continu une onde ultrasonore vers un récepteur relié à un oscilloscope. La lecture précise de la période permet une évaluation de l'incertitude absolue et relative de la mesure.

Dans la deuxième partie de l'activité, l'émetteur est placé face à deux récepteurs dont les signaux sont en coïncidence. L'un des récepteurs est déplacé de façon à voir défiler 10 coïncidences pour déterminer la longueur d'onde de l'onde ultrasonore.

L'activité s'achève par la détermination de la célérité des ultrasons avec les grandeurs expérimentales déterminées précédemment et par la comparaison de cette valeur avec une valeur théorique.

Réponses

1. Exploiter

a. La période est représentée par 5 divisions sur l'écran donc, $T = 5 \times b = 5 \times 5 = 25 \mu\text{s}$.

b. L'incertitude type est donnée par la valeur d'une graduation divisée par racine(12). (Voir le dossier sur l'incertitude dans le cas d'une mesure unique). Ici, avec 5 graduations par division et pour une sensibilité de $5 \mu\text{s}$, une graduation vaut $5 / 5 = 1 \mu\text{s}$. Donc l'incertitude absolue

$$\text{vaut : } \Delta T = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0,3 \mu\text{s}.$$

L'incertitude relative vaut : $\frac{\Delta T}{T} = \frac{0,3}{25} = 0,01$, soit 1 %.

c. L'écart relatif se calcule à l'aide de la formule : $\frac{|T - T'|}{T'} = \frac{|25 - 25|}{25} = 0$.

$$\text{d. } f = \frac{1}{T} = \frac{1}{25 \times 10^{-6}} = 4,0 \times 10^4 \text{ Hz}.$$

2. Interpréter

a. La distance parcourue par l'onde entre deux points du milieu présentant le même état vibratoire est appelée la longueur d'onde.

$$10 \lambda = 8,5 \text{ cm, soit } \lambda = 0,85 \text{ cm}.$$

b. Pour améliorer la précision de la mesure de cette valeur, on peut augmenter le nombre de coïncidences.

3. Conclure

$$\text{a. } v = \lambda \times f = 0,85 \times 10^{-2} \times 4,0 \times 10^4 = 3,4 \times 10^2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}.$$

$$\text{b. } v' = \sqrt{\alpha \times T} = \sqrt{402 \times (273 + 20)} = 343 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}.$$

c. L'écart relatif se calcule à l'aide de la formule :

$$\frac{|v - v'|}{v'} = \frac{|3,4 \times 10^2 - 343|}{343} = 9 \times 10^{-3}, \text{ soit } 0,9 \text{ \%}.$$

Exercices d'application

5 minutes chrono !

1. Mots manquants

- de matière ; d'énergie
- une dimension
- transversale
- période temporelle
- longueur d'onde

2. QCM

- Une bourrasque de vent.
- Les vaguelettes de sable dans le désert.
- $1,0 \times 10^4$ m.
- 4,00 Hz.
- Sa longueur d'onde.
- $\lambda = \frac{v}{f}$.

Compétences exigibles

- Les brindilles flottent au même endroit avant et après le passage de la perturbation.
 - Les ondes électromagnétiques émises par le Soleil nous apportent de l'énergie par transfert thermique.
-

- La situation **a** correspond à une onde progressive à une dimension.
-

- Conversion de la célérité des ondes en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$:

$$v = \frac{20}{3,6} = 5,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}.$$

Calcul de la durée nécessaire à l'onde pour parcourir une distance $d = 12$ km :

$$\tau = \frac{d}{v} = \frac{12 \times 10^3}{5,6} = 2,1 \times 10^3 \text{ s} = 35 \text{ min } 43 \text{ s} = 36 \text{ min}.$$

Heure d'arrivée sur la commune B : $17 \text{ h } 57 + 0 \text{ h } 36 = 18 \text{ h } 33$.

- La durée Δt entre l'émission et la réception du signal ultrasonore envoyé par le sonar du Titanic était de 5 s, et non de 2,5 s. L'énoncé de cet exercice sera corrigé dans le livre élève.

Calcul de la profondeur h à laquelle gît le Titanic :

$$h = v \times \frac{\Delta t}{2} = 1,5 \times 10^3 \times \frac{5}{2} = 3,8 \times 10^3 \text{ m} = 3,8 \text{ km}.$$

7. a. Une onde progressive à une dimension.

b. Le terme « distance crête à crête » est associé à la longueur d'onde, laquelle est la plus petite distance séparant deux points du milieu présentant le même état vibratoire au même instant.

c. La période d'une onde sinusoïdale est la durée nécessaire à l'onde pour parcourir une distance égale à la longueur d'onde à une célérité v .

$$v = \frac{\lambda}{T}, \text{ donc } T = \frac{\lambda}{v} = \frac{40}{5,5} = 7,3 \text{ s.}$$

d. La fréquence correspond au nombre de périodes temporelles T par unité de temps.

$$F = \frac{1}{T} = \frac{1}{7,3} = 0,14 \text{ Hz.}$$

8.

Onde périodique sinusoïdale	Fréquence f	Période T	Longueur d'onde λ
ultrason	40 kHz	25 μ s	8,5 mm
note « La ₃ »	440 Hz	2,27 ms	77,3 cm
micro-onde	6,0 MHz	0,17 ns	5,0 cm

$$F = \frac{1}{T} = \frac{1}{25 \times 10^{-6}} = 40 \text{ kHz.}$$

$$v = \frac{\lambda}{T}, \text{ soit } \lambda = v \times T = 340 \times 25 \times 10^{-3} = 8,5 \text{ mm.}$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{440} = 2,27 \times 10^{-3} \text{ s} = 2,27 \text{ ms.}$$

$$\lambda = v \times T = 340 \times 2,27 \times 10^{-3} = 0,773 \text{ m} = 77,3 \text{ cm.}$$

$$V = \frac{\lambda}{T}, \text{ soit } T = \frac{\lambda}{v} = \frac{5,0 \times 10^{-2}}{3,00 \times 10^8} = 1,7 \times 10^{-10} \text{ s} = 0,17 \text{ ns.}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1,7 \times 10^{-10}} = 6,0 \times 10^9 \text{ Hz} = 6,0 \text{ MHz.}$$

Compétences générales

9. Justification du calcul proposé :

$$v = 340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} = 0,34 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1} = \frac{1}{3} \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}.$$

$$v = \frac{d}{\Delta t}, \text{ soit } d = v \times \Delta t = \frac{1}{3} \times \Delta t.$$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 2. Caractéristiques des ondes

10. a. L'onde décrite est transversale car la perturbation s'effectue dans une direction perpendiculaire à celle de la propagation de l'onde.

b. Échelle : $1,4 \text{ cm}_{(\text{schéma})} \rightarrow 1,00 \text{ m}_{(\text{réel})}$.

$$\text{ON}_{(\text{schéma})} = 4,2 \text{ cm} \rightarrow \text{ON}_{(\text{réel})} = 4,2 \times 1,00 / 1,4 = 3,0 \text{ m.}$$

$$v = \frac{\text{ON}_{(\text{réel})}}{t_1 - t_0} = \frac{3,0}{0,2 - 0,0} = 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}.$$

c. $\text{MN}_{(\text{schéma})} = 2,8 \text{ cm} \rightarrow \text{MN}_{(\text{réel})} = 2,0 \text{ m.}$

$$\tau = \frac{\text{MN}_{(\text{réel})}}{v} = \frac{2,0}{15} = 0,13 \text{ s.}$$

11. a. Le signal visualisé permet d'obtenir la valeur de la période temporelle.

b. Une période temporelle est mesurée par 4,5 divisions, donc :

$$T = b \times 4,5 = 500 \times 10^{-6} \times 4,5 = 2,3 \times 10^{-3} \text{ s} = 2,3 \text{ ms.}$$

c. $\lambda = v \times T = 340 \times 2,3 \times 10^{-3} = 0,78 \text{ m} = 78 \text{ cm.}$

12. a. Calcul de la longueur d'onde λ de l'onde progressive sinusoïdale :

$$\text{AB}_{(\text{photo})} = 2,6 \text{ cm} \rightarrow \text{AB}_{(\text{réel})} = 4,0 \text{ cm.}$$

On mesure $6 \lambda_{(\text{photo})} = 4,0 \text{ cm} \rightarrow 6 \lambda_{(\text{réel})} = 4,0 \times 4,0 / 2,6 = 6,2 \text{ cm.}$

$$\lambda = 6,2 / 6 = \mathbf{1,0 \text{ cm.}}$$

b. Période de l'onde : $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{15} = 6,7 \times 10^{-2} \text{ s} = 67 \text{ ms.}$

c. Calcul de la célérité de cette onde : $v = \lambda \times f = 1,0 \times 10^{-2} \times 15 = \mathbf{1,5 \times 10^{-1} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}}.$

Exercices de méthode

13. *Exercice résolu dans le manuel.*

14. a. $T = \frac{19 \times 1}{\frac{30}{10}} = \mathbf{6,3 \times 10^{-2} \text{ s.}}$

b. Les deux définitions possibles de la période spatiale λ d'une onde progressive sinusoïdale sont :

- la longueur d'onde est la plus petite distance séparant deux points du milieu présentant le même état vibratoire ;

- la longueur d'onde λ est la distance parcourue par l'onde pendant une durée égale à la période T à la célérité v .

c. Échelle : $15 \text{ cm}_{(\text{réel})} \rightarrow 5,0 \text{ cm}_{(\text{schéma})}$.

$$4 \lambda_{(\text{schéma})} = 2,2 \text{ cm, soit } 4 \lambda_{(\text{réel})} = 2,2 \times \frac{15}{5,0} = 6,6 \text{ cm.}$$

$$\lambda = 6,6 / 4 = 1,7 \text{ cm.}$$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 2. Caractéristiques des ondes

d. $v = \lambda \times f$, donc $\lambda = \frac{v}{f} = \frac{6}{1} = 6 \text{ m}$.

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1} = 1 \text{ s}.$$

15. a. La période T est la plus petite durée pour que chaque point du milieu se retrouve dans le même état vibratoire.

On mesure $2T$ sur l'oscillogramme pour gagner en précision : on trouve 8 divisions, et en tenant compte de la sensibilité de la base de temps :

$$2T = b \times 8 = 5 \times 10^{-6} \times 8 = 4,0 \times 10^{-5} \text{ s}.$$

Soit $T = \frac{4,0 \times 10^{-5}}{2} = 2,0 \times 10^{-5} \text{ s} = 20 \text{ } \mu\text{s}$.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2,0 \times 10^{-5}} = 5,0 \times 10^4 \text{ Hz} = 50 \text{ kHz}.$$

b. La longueur d'onde est la plus petite distance séparant deux points du milieu présentant le même état vibratoire : $\lambda = 6,8 \text{ mm}$.

c. La définition de la longueur d'onde, distance parcourue par l'onde pendant une période de la source, permet d'écrire $\lambda = v \times T$, donc $v = \lambda \times f$. Le résultat sera écrit avec deux chiffres significatifs, comme les données.

A.N. : $v = 6,8 \times 10^{-3} \times 50 \times 10^3 = 3,4 \times 10^2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Exercices d'entraînement

16. On lit $\Delta t = 2,0 \text{ ms}$ entre les deux principaux pics.

$$v = \frac{d}{\Delta t} = \frac{68 \times 10^{-2}}{2,0 \times 10^{-3}} = 3,4 \times 10^2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}.$$

17. a. Durée Δt_1 pour atteindre le navire : $v_A = \frac{d}{\Delta t_1}$, soit $\Delta t_1 = \frac{d}{v_A} = \frac{100}{20} = 5,0 \text{ s}$.

b. Durée Δt_2 de la réception de l'écho :

$$v_B = \frac{2d}{\Delta t_2}, \text{ soit } \Delta t_2 = \frac{2d}{v_B} = \frac{2 \times 100}{1,5 \times 10^3} = 0,13 \text{ s}.$$

c. En ajoutant le temps de réaction 500 ms à Δt_2 , soit $500 + 1,3 \times 10^2 = 6,3 \times 10^2 \text{ ms}$, on trouve une durée inférieure à $5,0 \text{ s}$, donc le dauphin pourra éviter le navire.

18. a. Échelle : $10 \text{ cm}_{(\text{réel})} \rightarrow 0,8 \text{ cm}_{(\text{schéma})}$.

Soit $1,1 \text{ cm}_{(\text{schéma})} \rightarrow 2d = 1,1 \times \frac{10}{0,8} = 14 \text{ cm}$, soit $d = 7 \text{ cm}$.

Cette distance correspond à la longueur d'onde.

b. $v = \lambda \times f$, soit $f = \frac{v}{\lambda} = \frac{0,38}{7,0 \times 10^{-2}} = 5,4 \text{ Hz}$.

19. L'onde est progressive sinusoïdale.

La fréquence de l'onde ne dépend pas du milieu de propagation, elle est imposée par la source.

La longueur d'onde diminue lorsque la profondeur diminue.

$$v = \lambda \times f.$$

Lorsque que la profondeur diminue, la vitesse diminue.

20. a. Les ondes ultrasonores sont utilisées pour les radars de recul.

b. $v = \frac{2d}{\Delta t}$, soit $\Delta t = \frac{2d}{v} = \frac{2 \times 0,35}{340} = 2,1 \times 10^{-3} \text{ s} = 2,1 \text{ ms}$.

21. a. $2 \lambda_{(\text{schéma})} = 3,8 \text{ cm} \rightarrow 2 \lambda_{(\text{réel})} = 2 \lambda_{(\text{schéma})} / 2$.

$$\lambda_{(\text{réel})} = \frac{3,8}{4} = 0,95 \text{ cm}.$$

b. Calcul de la célérité v de cette onde : l'onde est sinusoïdale, donc :

$$v = \lambda \times f = 0,95 \times 5 = 4,8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}.$$

22.

	Vide	Eau	Verre
λ (nm)	550	413	$3,7 \times 10^2$
Célérité v ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$3,00 \times 10^8$	$2,25 \times 10^8$	$2,0 \times 10^8$
Fréquence ν (Hz)	$5,45 \times 10^{14}$	$5,45 \times 10^{14}$	$5,45 \times 10^{14}$
Couleur	vert	vert	vert

23. a. $v = \frac{2L}{\Delta t}$, soit $\Delta t = \frac{2L}{v}$.

b. $H = D - L = D - \frac{v \times \Delta t}{2}$.

c. $H = 3,20 \text{ m}$.

$$H = D - \frac{v \times \Delta t}{2}, \text{ soit } \Delta t = (D - H) \times \frac{2}{v} = (10 - 3,20) \times \frac{2}{340} = 4,0 \times 10^{-2} \text{ s} = 40 \text{ ms}.$$

d. **L'enregistrement sera corrigé dans le livre élève (la tension u_{re} s'annule à la date 3,1 ms).**

Le décalage entre le signal reçu et le signal émis est de 2,1 ms : $\Delta t = 2,1 \text{ ms}$.

$$H = 0,43 - \frac{340 \times 2,1 \times 10^{-3}}{2} = 7,3 \times 10^{-2} \text{ m} = 7,3 \text{ cm}.$$

24. a. Calcul de la durée au bout de laquelle des spectateurs situés à une distance $d = 150 \text{ m}$ de la scène devraient entendre le son, si celui-ci se propage à $v = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$:

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 2. Caractéristiques des ondes

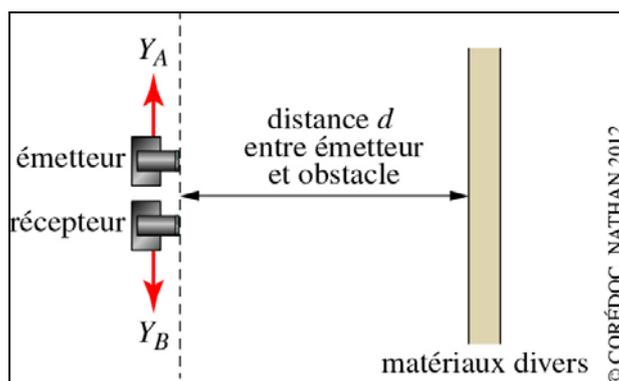
$$\Delta t = \frac{d}{v} = \frac{150}{340} = 4,41 \times 10^{-1} \text{ s} = 441 \text{ ms.}$$

- b. Lors de la propagation du son sur de longues distances, il y a amortissement du son.
c. L' « écho » correspond au décalage entre les sons émis par le haut-parleur proche des spectateurs et par le haut-parleur de la scène.
d. Il faut que le son de la ligne de retard soit émis quand le son des haut-parleurs de la scène arrive sur la ligne de retard, soit $\Delta t = 441 \text{ ms}$.

25. On alimente un émetteur ultrasonore pour qu'il émette des salves d'ultrasons.
On place à côté un récepteur ultrasonore.
L'émetteur et le récepteur sont reliés à un oscilloscope.
On place devant l'émetteur et le récepteur un obstacle fixe dont on modifiera la nature du matériau (bois, papier, polystyrène) pour étudier son influence sur la réflexion.
On visualise les deux signaux avec les réglages convenables de l'oscilloscope.

Sources d'erreur :

- l'émetteur et le récepteur doivent être alignés ;
- l'obstacle doit être parallèle au plan qui contient l'émetteur et le récepteur.



$d = v_{\text{son}} \times \frac{\Delta t}{2}$, avec Δt la durée, mesurée sur l'oscilloscope, entre l'émission de l'onde ultrasonore et la réception de son écho.

-
- 26.** a. Le train d'ondes A correspond aux ondes P car elles sont plus rapides (arrivent plus tôt), et le train d'onde B correspond aux ondes S.
b. Le train d'ondes A arrive à *Eureka* avec un retard de 40 s, donc l'heure du séisme est 8 h 15 min 20 s – 40 s = 8 h 14 min 40 s.
c. Calcul de la distance d séparant l'épicentre du séisme de la station *Eureka* :

$$v = \frac{d}{\Delta t}, \text{ soit } d = v \times \Delta t = 10 \times 40 = 4,0 \times 10^2 \text{ km.}$$

$$d. v = \frac{d}{\Delta t'} = \frac{4,0 \times 10^2}{66} = 6,1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Exercices de synthèse

27. Expression littérale de la distance d :

$$d = v_S \times t_S \text{ et } d = v_P \times t_P.$$

$$t_S - t_P = \frac{d}{v_S} - \frac{d}{v_P} = d \times \left(\frac{1}{v_S} - \frac{1}{v_P} \right) = d \times \frac{v_P - v_S}{v_P \times v_S}.$$

On en déduit : $d = \frac{v_P \times v_S}{v_P - v_S} \times (t_S - t_P).$

28. a. Calcul de la longueur d'onde λ dans le vide des ondes émises par les satellites :

$$c = \lambda \times f, \text{ soit } \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3,00 \times 10^8}{1,5 \times 10^9} = 2,0 \times 10^{-1} \text{ m} = 20 \text{ cm}.$$

b. Durée t mise par le signal pour aller du satellite S à l'altitude $h = 20\,180$ km au récepteur R :

$$c = \frac{h}{t}, \text{ soit } t = \frac{h}{c} = \frac{20\,180 \times 10^3}{3,00 \times 10^8} = 6,73 \times 10^{-2} \text{ s} = 67,3 \text{ ms}.$$

c. Pour une mesure unique, l'incertitude sur la distance verticale est de 20 mètres.

Calcul de l'incertitude Δt sur la durée de propagation du signal :

$$\Delta t = \frac{\Delta d}{c} = \frac{20}{3,00 \times 10^8} = 6,7 \times 10^{-8} \text{ s} = 67 \text{ ns}.$$

L'incertitude Δt est 10^6 fois plus petite que t . La durée t devra être mesurée avec une précision très importante, sinon l'incertitude sur la distance sera élevée.

d. $\delta d = \frac{\Delta d}{\sqrt{N}}$, soit $\sqrt{N} = \frac{\Delta d}{\delta d}$, soit $N = \frac{\Delta^2 d}{\delta^2 d} = \frac{20^2}{0,20^2} = 1,0 \times 10^4$.

e. Calcul de la durée nécessaire pour effectuer ces N mesures :

$$1,0 \times 10^4 \times 1 \times 10^{-3} = 10 \text{ s}.$$

Une telle précision n'est pas possible avec un récepteur mobile à grande vitesse car il aura changé de position pendant le temps de la mesure.

29. a. Les fibres optiques guident la lumière jusqu'aux capteurs photosensibles.

b. Pour déterminer le grandissement du système optique, on dépose un objet dont on connaît les dimensions au fond de la cuve et on mesure sa dimension sur l'écran de la cuve à ondes.

c. Les points de la surface de l'eau correspondant aux points M et N sur l'écran sont dans le même état vibratoire.

d. Longueur d'onde λ de l'onde périodique :

$$\lambda_{(\text{écran})} = MN = 1,8 \text{ cm} \rightarrow \lambda_{(\text{réel})} = MN / \gamma = 1,8 / 1,7 = 1,1 \text{ cm}.$$

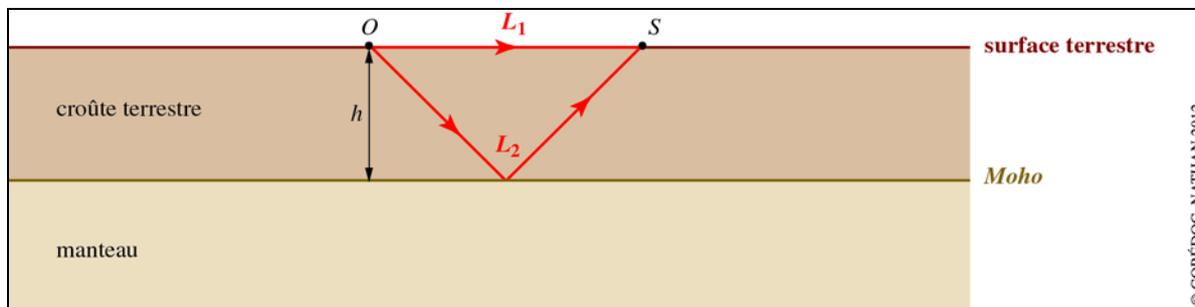
Calcul de la fréquence f de cette onde, la période mesurée sur l'oscillogramme correspondant à 3,6 divisions :

$$T = b \times 3,6 = 20 \times 3,6 = 72 \text{ ms}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{72 \times 10^{-3}} = 14 \text{ Hz}.$$

Célérité v de l'onde : $v = \lambda \times f = 1,1 \times 10^{-2} \times 14 = 0,15 \text{ m.s}^{-1} = 15 \text{ cm.s}^{-1}$.

30. a. La densité de la croûte terrestre devrait être identique en tout point de la zone étudiée pour justifier une célérité identique pour les ondes.
 b. et c.



d. La distance à la carrière et la durée de propagation depuis la carrière permettent de calculer la vitesse des trains d'ondes.

Exemple : $v = \frac{d}{\tau} = \frac{10,0}{1,82} = 5,49 \text{ km.s}^{-1}$.

Sismographe	Vitesse de propagation (km.s ⁻¹)	L ₂ (km)	h (km)
1	5,49	71,9	35,6
2	5,47	77,6	35,8
3	5,50	92,0	34,9
4	5,50	116	36,6

e. Calcul des distances parcourues par le second train d'ondes :

Exemple : $L_2 = v \times \Delta t = 5,49 \times 13,09 = 71,9 \text{ km}$.

f. Expression littérale de la profondeur h du *Moho* dans la région de tir.

D'après le théorème de Pythagore :

$$h^2 + \left(\frac{L_1}{2}\right)^2 = \left(\frac{L_2}{2}\right)^2$$

$$h^2 = \left(\frac{L_2}{2}\right)^2 - \left(\frac{L_1}{2}\right)^2$$

$$h = \sqrt{\left(\frac{L_2}{2}\right)^2 - \left(\frac{L_1}{2}\right)^2}$$

g. Exemple de calcul de la profondeur du *Moho* : $h = \sqrt{\left(\frac{71,9}{2}\right)^2 - \left(\frac{10,0}{2}\right)^2} = 35,6 \text{ km}$.

h. Valeur moyenne : $h_{\text{moy}} = \frac{35,6 + 35,8 + 34,9 + 36,6}{4} = 35,7 \text{ km}$.

31. 1. Utilisation d'un émetteur ultrasonore

Les ultrasons ont une longueur d'onde plus petite que celle du son, il est donc intéressant de les utiliser dans le cadre de la simulation avec la maquette.

2. Influence d'un plafond

L'écho est plus amorti dans le cas où le couvercle est recouvert de moquette (expérience 2) que dans le cas où il n'y a pas de moquette sur le couvercle (expérience 1).

L'écho est très fortement amorti en l'absence de couvercle (expérience 3).

L'expérience 3 correspond à la situation la plus intéressante d'un point de vue acoustique, car il n'y a pas d'écho.

3. Rôle du mur

L'utilisation d'un mur plan n'est pas souhaitable pour la réception sonore dans les gradins, car les vaguelettes à la surface de l'eau sont moins visibles dans l'expérience 1 que dans l'expérience 2.

Elles possèdent une plus faible amplitude à certains endroits des gradins. Ainsi, l'intensité des ondes sonores reçues par les spectateurs dans les gradins est plus faible avec un mur plan qu'avec un mur alvéolé.

Le mur des théâtres antiques était orné de niches et de colonnes pour créer des alvéoles.

4. Dimension de la scène

Retard Δt entre l'onde sonore émise par l'orateur au point A et l'onde réfléchiée par le mur :

$$v = \frac{2d}{\Delta t}, \text{ soit } \Delta t = \frac{2d}{v}.$$

Profondeur maximale d_{\max} de la scène pour que la proclamation d'un texte reste compréhensible :

$$\begin{aligned} \Delta t &< 1/25 \text{ s} \\ \frac{2d_{\max}}{v} &< 1/25 \\ d_{\max} &< \frac{1}{25} \times \frac{v}{2} = \frac{1}{25} \times \frac{340}{2} = 6,8 \text{ m} \end{aligned}$$

Les théâtres antiques extérieurs possèdent donc une acoustique remarquable, car les échos multiples qui pourraient parasiter la voix d'un orateur sont amoindris à la fois par l'absence de plafond, par le mur de scène présentant des aspérités et par des dimensions de scène convenablement choisies.

Chapitre 3 – Ondes sonores

Manuel pages 51 à 70

Choix pédagogiques

Après avoir étudié les caractéristiques et propriétés générales des ondes, ce troisième chapitre du thème « Observer » est consacré au cas particuliers des ondes sonores.

Il contient bien entendu l'ensemble des notions et contenus du programme qui s'y rapportent directement mais également celles concernant l'intensité sonore et le niveau d'intensité sonore qui y trouvent naturellement leur place tout comme celles concernant l'effet Doppler, historiquement mis en évidence dans le cadre de ce type d'onde.

Dans une première partie, ce chapitre met l'accent sur les qualités d'un son qui le distingue d'un autre : l'intensité, la hauteur et le timbre. La relation entre intensité sonore et niveau d'intensité sonore est donnée et appliquée pour en saisir l'intérêt. La fréquence d'un son musical, égale à celle du fondamental, caractérise la hauteur d'un son. Cette étude permet de revenir sur les notions abordées en classe de seconde concernant la distinction entre son et ultrason. Cette première partie se termine par l'étude du timbre d'un son associé à sa composition spectrale – amplitude relative des harmoniques – et son évolution au cours du temps en relation avec la durée des transitoires d'attaque et d'extinction du son.

L'utilisation d'ondes sonores permettant de mettre en évidence aisément l'influence du mouvement relatif de la source par rapport au récepteur sur la fréquence de l'onde, la deuxième partie de ce chapitre concerne naturellement l'effet Doppler. L'expression du décalage Doppler de la fréquence dans le cas des faibles vitesses est établie pour un exemple simple puis exploitée dans le domaine des ondes sonores, mais également dans celui des ultrasons et des ondes électromagnétiques. Une démarche expérimentale est proposée en activité pour mesurer une vitesse exploitant l'effet Doppler sur des ultrasons. La lecture de données spectrales et la manipulation du logiciel gratuit *SalsaJ* permet d'illustrer l'utilisation de l'effet Doppler comme moyen d'investigation en astrophysique.

Des animations, des simulations et des vidéos documentaires illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et, certaines d'entre elles, sur les sites Internet compagnon Sirius.

Page d'ouverture

La description de la photographie doit permettre aux élèves d'aborder les qualités des sons émis par chacun des instruments qui permettent de les distinguer les uns des autres : hauteur, intensité et timbre. La discussion peut d'engager sur les caractéristiques des ondes qui leur sont associées respectivement. La fréquence peut aisément être citée (connaissance de 2^{nde}) ainsi que l'amplitude si cette notion a déjà été évoquée dans un chapitre antérieur.

L'intérêt de l'analyse spectrale peut alors être souligné pour apporter les informations utiles permettant de différencier deux sons de même hauteur mais de timbres différents.

Activités

Simulation 1. À propos de l'analyse spectrale

Commentaires

Cette activité introduit l'analyse de Fourier et quelques éléments de vocabulaire lié à l'analyse spectrale d'un son : son pur, son complexe musical, fondamental et harmonique.

C'est une activité préparatoire à l'activité 2 puisqu'elle pose les prérequis nécessaires : comprendre les grandeurs situées en abscisse et ordonnée d'un spectre et concevoir qu'un son musical est décomposable en une somme de sons purs.

Réponses

1. Analyser les documents

D'après le document 2, le son émis par un diapason est sinusoïdal. C'est donc un son pur d'après le document 1.

2. Observer

a. Le son étudié est qualifié de son complexe car il est composé d'une somme de sons purs de fréquence différente. Il n'est ainsi pas sinusoïdal.

b. La fréquence de $u(t)$ est égale à celle de $u_1(t)$.

c. Le son pur correspondant à $u_1(t)$ est appelé le fondamental.

3. Conclure

Un signal périodique de fréquence f est décomposable en une somme de signaux sinusoïdaux appelés harmoniques de rang n de fréquence $f_n = nf$ avec n entier non nul.

Le fondamental a pour fréquence $f_1 = f$ (c'est « l'harmonique de rang 1 »).

Le spectre d'un signal est un diagramme qui représente :

- en ordonnée, l'amplitude ou l'amplitude relative des harmoniques qui composent ce signal ;
- en abscisse, la fréquence de ces harmoniques.

Activité expérimentale 2. Analyse spectrale d'un son

Commentaires

L'étude menée dans cette activité permet de relier :

- la hauteur d'un son à la fréquence du fondamental ;
- le timbre d'un son à la composition spectrale et à la durée des transitoires d'attaque et d'extinction.

La première partie de l'expérience peut être mise en œuvre sur un seul poste afin de réaliser et sauvegarder les enregistrements nécessaires à la suite de l'activité. Ceux-ci peuvent ensuite être exploités sur tous les postes disposant d'un logiciel d'analyse spectrale, comme *Acquisonic*, cité dans l'activité.

Réponses

1. Observer

a. $f_A = 4,4 \times 10^2$ Hz pour un La₃ par exemple. Sur le spectre correspondant, il s'agit de la fréquence du fondamental lue en abscisse : le premier bâton en partant de la gauche sur le diagramme.

b. $f_B = \dots$ ($f_B = f_A = 4,4 \times 10^2$ Hz) ;

$f_C = \dots$ ($f_C > f_A$; $f_C = 5,9 \times 10^2$ Hz pour un Re₄ par exemple) ;

$f_D = \dots$ ($f_D < f_A$; $f_D = 3,3 \times 10^2$ Hz pour un Mi₃ par exemple).

c. Les quatre signaux ont des formes différentes. L'importance des harmoniques les uns par rapport aux autres dans un même spectre est différente d'un spectre à l'autre. Les fréquences des signaux sont différentes également sauf dans le cas de $u_A(t)$ et $u_B(t)$.

2. Interpréter

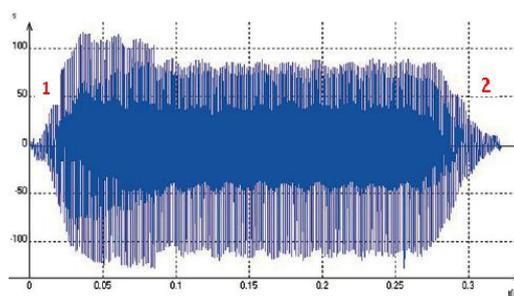
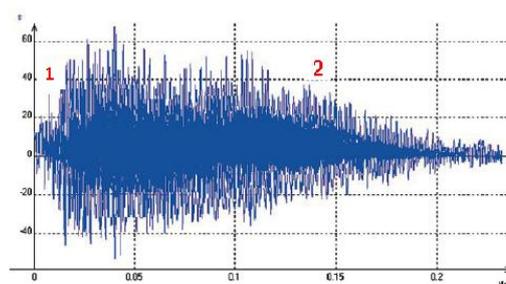
a. D'après les spectres, deux notes ont la même hauteur si la fréquence du fondamental de chaque note, lue en abscisse par le premier bâton sur le diagramme, est la même. Une note est d'autant plus aiguë que la fréquence du fondamental est élevée.

b. Sur les spectres, une différence de timbre se traduit par une différence de composition spectrale : l'importance des harmoniques les uns par rapport aux autres dans un même spectre – autrement dit, l'amplitude relative des harmoniques – est différente d'un spectre à l'autre.

c. Dans le cas de la flûte à bec, la durée d'extinction **2** est beaucoup plus courte que dans le cas du piano. Les durées d'attaque **1** sont sensiblement les mêmes.

3. Conclure

a. La grandeur qui permet de caractériser la hauteur d'un son est la fréquence du fondamental qui est égale à celle du signal obtenu sur l'enregistrement du son. Plus le son est aigu, plus cette fréquence est élevée.



1 : attaque du son ;
2 : extinction du son

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 3. Ondes sonores

- b.** Deux sons de même hauteur mais de timbres différents se distinguent :
- par une composition spectrale différente et une évolution au cours du temps de cette composition différente ;
 - une forme de signal différente et une durée des transitoires d'attaque et d'extinction différente.

Simulation 3. Découverte de l'effet Doppler

Commentaires

Cette activité permet de découvrir et d'interpréter, grâce à une simulation simple, l'influence d'un déplacement relatif d'un récepteur par rapport à un émetteur d'onde sonore sur la fréquence de celle-ci selon que l'on se situe dans le référentiel de l'émetteur ou du récepteur.

Réponses

1. Comprendre le texte

a. La fréquence de vibration de la source et celle d'un récepteur sont identiques lorsque que la source et le récepteur sont fixes l'un par rapport à l'autre.

a. D'après le texte, la fréquence de vibration de la source et celle d'un récepteur sont différentes lorsque qu'ils sont en mouvement l'un par rapport à l'autre.

c. Lorsqu'une voiture se rapproche de nous, la fréquence de l'onde sonore dans le référentiel lié à nous est plus élevée que celle de l'onde émise dans le référentiel de la voiture.

Lorsqu'une voiture s'éloigne de nous, la fréquence de l'onde sonore dans le référentiel lié à nous est plus faible que celle de l'onde émise dans le référentiel de la voiture.

Ainsi, du fait de l'effet Doppler, la fréquence de l'onde sonore émise par une voiture est perçue par nous comme étant plus élevée lorsque la voiture s'approche (son plus aigu) que lorsqu'elle s'éloigne (son plus grave). Ceci explique donc la différence de hauteur du perçu.

2. Interpréter

a. Situation ① : la fréquence de l'onde émise par S et celle de l'onde détectée par R sont identiques ; $f_S = f_R$.

b. f_S a la même valeur dans chaque cas.

c. La longueur d'onde de l'onde détectée par R est plus petite dans le cas ② que dans le cas ①. La longueur d'onde de l'onde détectée par R est plus grande dans le cas ③ que dans le cas ①.

$\lambda = \frac{c}{f}$, la fréquence de l'onde détectée par R est donc, à l'inverse, plus grande dans le cas ②

que dans le cas ①, et plus petite dans le cas ③ que dans le cas ①.

d. La période de vibration captée par le récepteur est plus petite dans le cas ④ que dans le cas ①. Cette période est plus grande dans le cas ⑤ que dans le cas ①.

$T = \frac{1}{f}$, la fréquence de l'onde détectée par R est donc, à l'inverse, plus grande dans le cas ④

que dans le cas ① et plus petite dans le cas ⑤ que dans le cas ①.

3. Conclure

a. Il existe une différence non nulle entre la fréquence de l'onde émise par une source S et celle détectée par un récepteur R lorsque S et R sont en mouvement relatif l'un par rapport à l'autre.

b. - Si R et S se rapprochent : $f_R > f_S$.

- Si R et S s'éloignent : $f_R < f_S$.

Activité expérimentale 4. Déterminer une vitesse avec l'effet Doppler

Commentaires

Cette activité propose de mettre en œuvre une démarche expérimentale pour mesurer une valeur v de vitesse instantanée en utilisant l'effet Doppler.

Cette mesure nécessite une interface dont la durée d'échantillonnage est suffisamment petite pour acquérir le signal ultrasonore et déterminer la valeur du décalage Doppler de fréquence avec une précision suffisante. Les résultats des mesures effectuées avec l'interface *Foxy* de Jeulin sont donnés ci-dessous. La *Sysam-SP5* d'Eurosmart par exemple permet également d'obtenir de très bons résultats.

La mesure de la durée de rotation de la roue, qui s'effectue à l'aide d'un chronomètre en mesurant la durée de cinq périodes par exemple, permet de déterminer une valeur de la vitesse moyenne de la roue et de comparer le résultat obtenu avec celui de v pour estimer la cohérence des résultats (une mesure de la vitesse de rotation plus précise est également possible selon le matériel disponible, avec deux chronomètres commandés par une cellule photoélectrique).

Résultats

Enregistrements avec FOXY (Jeulin)

La courbe rouge (u) correspond à l'immobilité et permet le calcul de T_S .

La courbe verte (u_1) correspond au résultat noté 1 (durée de rotation d'une seconde) et la courbe bleue correspond au résultat noté 2 (durée de rotation de deux secondes).

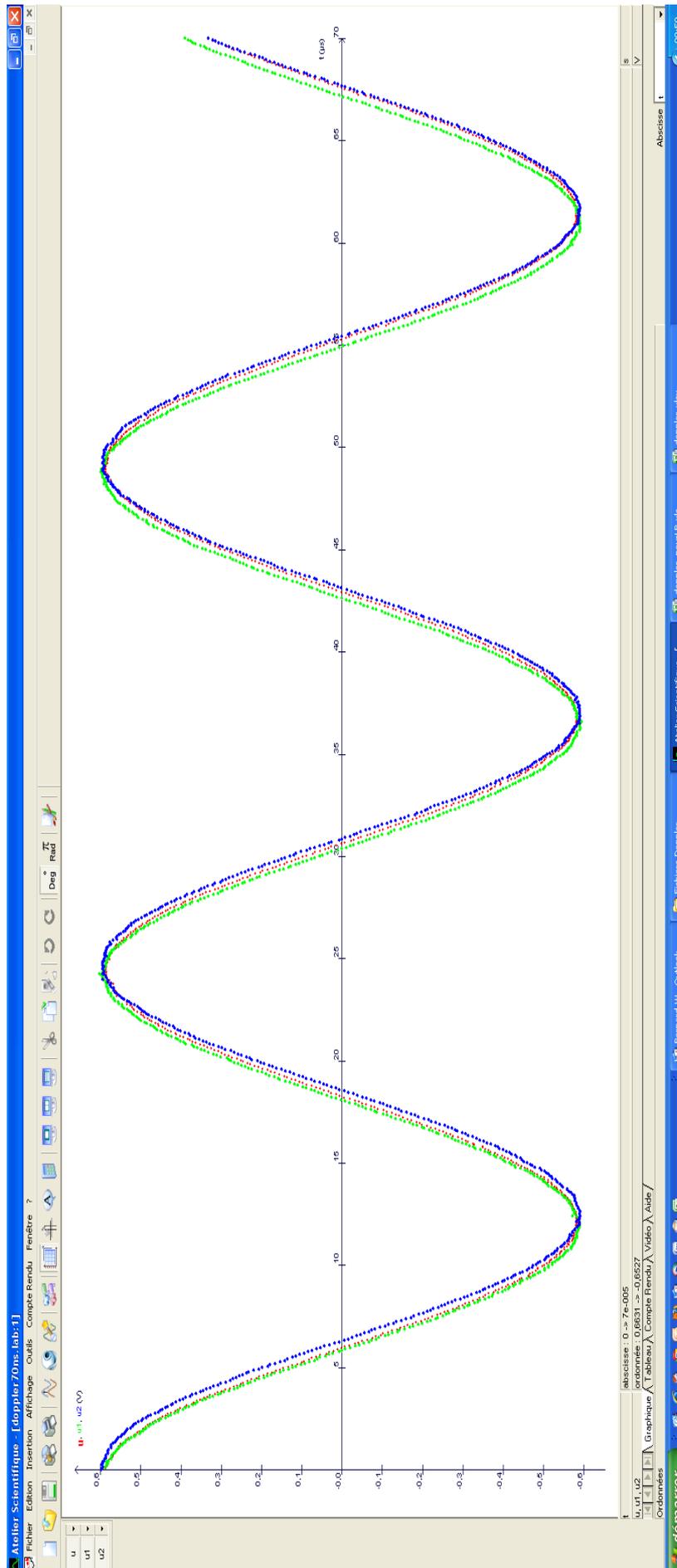
Pour la reproductibilité de la lecture, deux essais de mesure sont réalisés sur les mêmes courbes, l'incertitude sur la lecture de T_R ou T_S étant de l'ordre de $2\Delta t$ au maximum. Cette mesure est réalisée en utilisant un "zoom" et l'outil "pointeur" du logiciel de l'atelier scientifique de Jeulin, qui donne directement la période ou la fréquence.

1 000 points		$\Delta t = 70 \text{ ns}$		$v_{\text{ultrason}} = 340 \text{ m/s}$		
Synchro : 0,6 V		Longueur du bois : 743 mm		OM = 0,37 m		
Premier essai	$T_S = 2,46794 \times 10^{-5} \text{ s}$ (courbe rouge) $f_S = \frac{1}{T_S} = 40519,62 \text{ Hz}$					
	Couleur de la courbe	$T_R(\text{s})$	$f_R(\text{Hz})$	$\Delta f = f_R - f_S$	$v_R = \frac{\Delta f \times v_{\text{son}}}{f_S}$	$v_{\text{moy}} = \frac{2\Delta R}{T_{\text{rotation}}}$
	1	verte	$2,45260 \times 10^{-5}$	40773,06	253,43	2,13
2	bleue	$2,45918 \times 10^{-5}$	40663,96	144,34	1,21	1,1
Second essai 2	$T_S = 2,46691 \times 10^{-5} \text{ s}$ (courbe rouge) $f_S = \frac{1}{T_S} = 40536,54 \text{ Hz}$					
	Couleur de la courbe	$T_R(\text{s})$	$f_R(\text{Hz})$	$\Delta f = f_R - f_S$	$v_R = \frac{\Delta f \times v_{\text{son}}}{f_S}$	$v_{\text{moy}} = \frac{2\Delta R}{T_{\text{rotation}}}$
	1	verte	$2,45274 \times 10^{-5}$	40770,73	234,19	1,96
2	bleue	$2,45806 \times 10^{-5}$	40682,49	145,95	1,22	1,2

Voir la capture d'écran page suivante.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur

Chapitre 3. Ondes sonores



Réponses

1. Observer

- a. Voir une des lignes d'essai du tableau de résultats.
- b. Voir une des lignes d'essai du tableau de résultats.
- c. Voir une des lignes d'essai du tableau de résultats.

2. Interpréter

- a. Si R se rapproche de S, il détectera une zone de compression plus tôt que s'il reste au repos, donc avec une durée plus petite que T_S :

$$T_R < T_S$$

- b. La réponse précédente est compatible avec le signe de $\Delta f \cdot T_R < T_S$, ce qui implique $f_R > f_S$ soit :

$$\Delta f > 0 \text{ avec } \Delta f = f_R - f_S$$

3. Exploiter les résultats

Voir le tableau. Les valeurs de v_R et v_{moy} sont compatibles. L'écart relatif est inférieur à 10 %, ce qui est faible compte tenu du fait que l'on compare une vitesse instantanée avec une vitesse moyenne sur cinq tours. De plus, v_{moy} est plus petite que v_R , ce qui s'explique par la présence de frottements qui ralentissent significativement la roue.

Activité expérimentale 5. L'effet Doppler en astrophysique

Commentaires

Cette activité propose de mesurer un décalage Doppler de longueur d'onde subi par une raie d'absorption de la lumière provenant de Jupiter.

Le facteur 2 dans la relation provient du fait que la lumière est produite par le Soleil et diffusée par Jupiter. Compte tenu de l'effet conjugué du mouvement relatif de Jupiter par rapport au Soleil et par rapport à la Terre, il s'en suit un double effet Doppler qui accentue le décalage au lieu de le compenser.

Le spectre étudié est celui communiqué par un astronome amateur. Le logiciel gratuit *SalsaJ* permet d'étalonner simplement l'échelle du spectre et de déterminer la valeur de longueur d'onde associée à une raie.

Une fiche technique du logiciel (exemple page suivante) est mise à disposition de l'élève.

Résultats

Écart en longueur d'onde entre la raie ① et la bordure supérieure de la raie ③ : $L_1 = 2,526 \text{ nm}$.

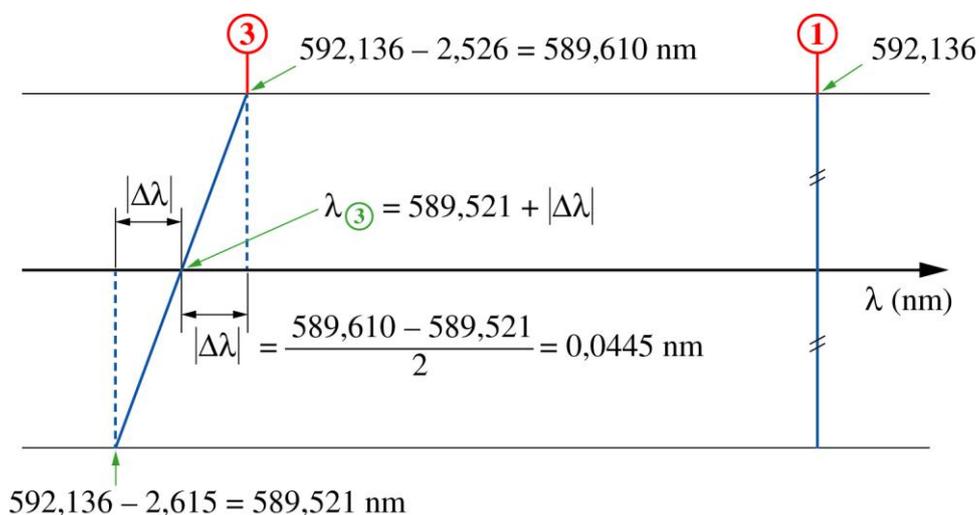
Écart en longueur d'onde entre la raie ① et la bordure inférieure de la raie ③ : $L_2 = 2,615 \text{ nm}$.

Réponses

1. Observer

a. Les longueurs d'onde augmente de gauche à droite : $\lambda_{\text{③}} < \lambda_{\text{①}}$.

À partir de la valeur numérique de la longueur d'onde de la raie ① et des résultats trouvés ci-dessus : $L_1 = 2,526 \text{ nm}$ et $L_2 = 2,615 \text{ nm}$; on calcule les longueurs d'onde, minimale, maximale et au centre de la raie ③ .



Le décalage Doppler de longueur d'onde entre la bordure supérieure (ou inférieure) d'une raie et son centre est :

$$|\Delta\lambda| = 0,0445 \text{ nm}$$

La longueur d'onde au centre de la raie ③ est :

$$\lambda_{\text{③}} = 589,521 + |\Delta\lambda| = 589,521 + 0,0445 = 589,5655 \text{ nm}$$

on laisse tous les chiffres pour ce calcul intermédiaire.

c. $v = \frac{|\Delta\lambda|c}{(2\lambda_3)} = 1,13 \times 10^4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

2. Conclure

a. $T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi \times 71,5 \times 10^6}{1,13 \times 10^4} = 4,0 \times 10^4 \text{ s}$.

D'après le texte, $T = 9 \text{ h } 55 \text{ min} = 3,57 \times 10^4 \text{ s}$. L'écart relatif de 12 % entre ces deux valeurs s'expliquent par les erreurs de mesures, mais également par le fait que l'on ne bénéficie pas d'informations suffisamment précises (manque de contraste) en bordure du spectre.

Cette erreur systématique entraîne une réduction de la largeur du spectre exploitable. La fenêtre d'analyse n'est donc pas située exactement sur le bord de la planète (pas assez de signal ici).

Ainsi, la valeur de $|\Delta\lambda|$ que l'on a mesurée est plus faible que celle que l'on pourrait mesurer avec un spectre exploitable sur une plus large étendue. En conséquence, la valeur de v que l'on obtient est trop faible et celle de T est trop forte : l'élimination de cette erreur systématique diminuerait l'écart relatif.

FICHE TECHNIQUE DU LOGICIEL SALSAJ (TRAITEMENT D'IMAGES)

- Pour lancer SalsaJ
Cliquer l'icône de raccourci « SalsaJ » : 
- Quelques boutons et fonctions associées

				
---	---	---	---	---

Ouvrir un fichier image	Annuler la dernière opération	Tracer un trait	Zoom avant/arrière	Déplacement dans le cadre de l'image
-------------------------	-------------------------------	-----------------	--------------------	--------------------------------------
- Pour ouvrir un fichier image
 - 1) Effectuer « Fichier » puis « Ouvrir » ou cliquer sur le bouton adapté (voir tableau ci-dessus).
 - 2) Rechercher le fichier en se déplaçant dans l'arborescence.
 - 3) Cliquer sur le fichier désiré puis « Ouvrir ».
- Pour étalonner l'échelle d'une image
 - 1) Tracer un trait entre deux points séparés d'une distance connue. Pour cela, cliquer sur le bouton adapté (voir tableau ci-dessus) puis cliquer et glisser entre les deux points. Penser à utiliser le zoom avant (voir tableau ci-dessus) au préalable pour gagner en précision.
 - 2) Dans la barre de menu du logiciel, cliquer « Analyse » et « Indiquer l'échelle... ».
 - 3) Compléter ou modifier les informations dans la fenêtre qui apparaît, cocher « Global » puis cliquer « OUI ».
- Pour obtenir le graphe donnant l'intensité des pixels d'une image le long d'une ligne
 - 1) Tracer un trait le long de la ligne désiré. Pour cela, cliquer sur le bouton adapté (voir tableau ci-dessus) puis cliquer et glisser entre les deux points. Penser à utiliser le zoom avant (voir tableau ci-dessus) au préalable pour gagner en précision.
 - 2) Dans la barre de menu du logiciel, cliquer « Analyse » et « Coupe ».
 - 3) Déplacer le pointeur sur le graphe qui apparaît pour accéder au coordonnées des points.
 - 4) Cliquer le bouton « Liste » dans la fenêtre du graphique permet d'accéder aux coordonnées de chaque pixel de la ligne tracée.
Remarque : la valeur de l'abscisse tient compte de l'étalonnage de l'échelle de l'image si celui-ci a été réalisé au préalable.

Exercices d'application

5 minutes chrono !

1. Mots manquants

- fréquence
- 20 Hz ; 20 kHz
- élevée
- timbre
- $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$; dB
- purs ; f ou 220 Hz ; $2f$ ou 440 Hz ; $3f$ ou 660 Hz ; le fondamental ; harmoniques
- spectrale ; harmoniques
- Doppler ; mouvement

2. QCM

- Longitudinale.
 - Son caractère grave ou aigu.
 - 30 dB.
 - $1,0\times 10^{-7} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.
 - Croît de 3 dB par rapport à celui d'un seul instrument.
 - L'amplitude relative en fonction de la fréquence.
-

Compétences exigibles

3. Les ondes ne sont pas audibles par l'homme car les infrasons ont une fréquence trop faible :
 $f < 20 \text{ Hz}$

4. a. Les oscillogrammes ① et ② correspondent à des sons ayant la même hauteur car ils ont la même période (durée d'un motif élémentaire) et donc la même fréquence.
b. Les sons correspondant aux autres oscillogrammes sont plus graves puisque leur fréquence est plus faible (période plus grande).
-

5. a. $L_1 = 10 \log \frac{I_1}{I_0} = 10 \log \frac{8,5 \times 10^{-8}}{10^{-12}} = 49 \text{ dB}$.

b. De même, $L_2 = 81 \text{ dB}$.

c. $L_3 = 1,1 \times 10^2 \text{ dB}$.

6. $L = 10 \log \frac{I}{I_0}$ donc $\frac{L}{10} = \log \frac{I}{I_0}$ soit $10^{\frac{L}{10}} = \frac{I}{I_0}$.

Ainsi :
$$I = I_0 \times 10^{\frac{L}{10}}$$

A.N. :
$$I = 10^{-12} \times 10^{\frac{140}{10}} = 1 \times 10^2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$$

Remarque : cette question est l'occasion d'attirer l'attention sur la règle des chiffres significatifs. La présence du logarithme ou de la puissance de 10 entraîne une réflexion au cas par cas.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur

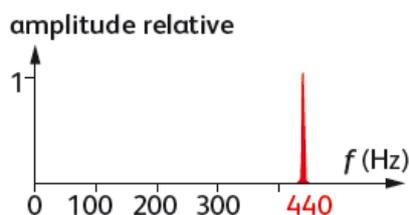
Chapitre 3. Ondes sonores

Exemple : un écart de 1 dB sur le niveau $L = 140$ dB correspond à une imprécision de $\frac{1}{140} = 0,7\%$, ce qui est raisonnable pour les trois chiffres significatifs donnés.

Pour la valeur $L = 141$ dB, on obtiendrait $I = 10^{-12} \times 10^{14,1} = 1,26 \times 10^2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$; l'écart relatif entre les deux valeurs de I est de l'ordre de 26 %, ce qui justifie le choix de ne garder qu'un chiffre significatif aux valeurs de I ainsi calculées.

7. a. La forme du signal est différente dans ces oscillogrammes : les timbres sont bien différents.

b. Le son émis par un diapason est pur, son spectre a l'allure suivante :



Remarque : la valeur de la fréquence peut être calculée avec l'indication de la sensibilité (1 ms en haut à gauche de l'écran) : $4 \times T = 9 \text{ ms} \rightarrow f = 4,4 \times 10^2 \text{ Hz}$.

8. Le timbre d'un son est lié non seulement à sa composition spectrale mais à l'évolution de celle-ci au cours du temps. Sur un enregistrement, deux sons de timbres différents ont alors des formes différentes et des durées de transitoires d'attaque et d'extinction différentes. C'est le cas de chaque note sur les enregistrements (a) et (b). En retournant chacune des notes, la hauteur reste inchangée (le logiciel ne modifie pas fréquence de chaque note) mais il « remplace » l'attaque par l'extinction de la note en la retournant. Ainsi, dans le cas de l'enregistrement (a) (piano) par exemple, les phases d'extinctions de chaque note sont longues relativement à celles des notes sur l'enregistrement (b) qui sont devenues très courtes lors du retournement d'où la différence de timbre.

9. a. La perception est identique car l'émetteur et le récepteur sont immobiles l'un par rapport à l'autre :

$$f_{\text{récepteur}} = f_{\text{source}}$$

b. La perception est différente car l'émetteur et le récepteur se déplacent l'un par rapport à l'autre. La différence de hauteur est due à l'effet Doppler. La fréquence de l'onde dans le référentiel de la source est différente de celle de l'onde détectée dans le référentiel du récepteur :

$$f_{\text{récepteur}} \neq f_{\text{source}}$$

Comme l'émetteur et le récepteur s'éloignent l'un de l'autre, $f_{\text{Récepteur}} < f_{\text{Source}}$: le son du klaxon perçu par le piéton est plus grave que celui perçu par le conducteur.

Compétences générales

10. a. $L = 10 \log \frac{I}{I_0}$ donc $\frac{L}{10} = \log \frac{I}{I_0}$ soit $10^{\frac{L}{10}} = \frac{I}{I_0}$

Ainsi : $I = I_0 \times 10^{\frac{L}{10}}$

b. Cas du silence :

$$I = 10^{-12} \times 10^0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$$

Cas du marteau-piqueur :

$$I = 10^{-12} \times 10^{\frac{110}{10}} = 10^{-12} \times 10^{11} = 10^{-12+11} = 1 \times 10^{-1} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$$

Remarque : cette question est l'occasion d'attirer l'attention sur la règle des chiffres significatifs. La présence du logarithme ou de la puissance de 10 entraîne une réflexion au cas par cas.

Exemple : un écart de 1 dB sur le niveau $L = 110$ dB correspond à une imprécision de $\frac{1}{110} = 0,9\%$, ce qui est raisonnable pour les trois chiffres significatifs donnés.

Pour la valeur $L_2 = 109$ dB, on obtiendrait $I = 10^{-12} \times 10^{10,9} = 7,9 \times 10^{-2} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$; l'écart relatif entre les deux valeurs de I est de l'ordre de 21 %, ce qui justifie le choix de ne garder qu'un chiffre significatif aux valeurs de I ainsi calculées.

c. La sensation auditive comme le niveau d'intensité sonore ne varie pas dans les mêmes proportions que l'intensité sonore.

Remarque : si deux sources génèrent chacune un son d'intensité sonore égale, l'intensité du son résultant double, mais la sensation auditive se traduit par une augmentation de niveau sonore de seulement 3 dB.

11. a. La forme du signal n'est pas sinusoïdale. Le son n'est donc pas pur.

b. $2T \Leftrightarrow n_H = 6 \text{ div} : T = \frac{6 \times 1}{2} = 3,0 \text{ ms.}$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{3,0 \times 10^{-3}} = 3,3 \times 10^2 \text{ Hz}$$

La guitare est accordée sur la note Mi₃.

12. a. Le son est complexe car le spectre traduit, par la présence de plusieurs bâtons, celle de plusieurs harmoniques.

b. La fréquence du fondamental caractérise la hauteur du son. Étant de 220 Hz, la note à attribuer au son est un La₂.

13. a. Ce décalage de fréquence s'explique par l'effet Doppler : l'émetteur et le récepteur se déplaçant l'un par rapport à l'autre, la fréquence de l'onde dans le référentiel de la source est différente de celle de l'onde détectée dans le référentiel du récepteur :

$$f_{\text{récepteur}} \neq f_{\text{source}}$$

b. $v = -\frac{c \Delta f}{2f} = -\frac{3,00 \times 10^8 \times (-13,0 \times 10^3)}{2 \times 34,7 \times 10^9} = 56,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} = 56,2 \times 3,6 = 202 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$

c. $f_{\text{récepteur}} = f_{\text{source}} + \Delta f$ et $\Delta f < 0$ implique : $f_{\text{récepteur}} < f_{\text{source}}$ et donc que la balle s'éloigne du pistolet radar.

Exercices de méthode

14. Exercice résolu.

15. a. $\lambda = cT$.

b. La distance d parcourue pendant T est $d = vT$.

La source s'éloignant du récepteur, la longueur d'onde de la radiation détectée est :

$$\lambda' = \lambda + d \text{ soit } \lambda' = (c + v)T$$

c. $\Delta \lambda = \lambda' - \lambda = (c + v)T - cT = vT$.

Ainsi :

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{vT}{cT} = \frac{v}{c}$$

On retrouve la relation donnée dans l'énoncée.

d. $v = \frac{\pi D}{\Delta t}$ et $\Delta \lambda = \frac{v}{c} \lambda \Rightarrow \Delta \lambda = \frac{\pi D}{c \Delta t} \lambda$

A.N. :
$$\Delta \lambda = \frac{\pi \times 1,4 \times 10^9}{3,00 \times 10^8 \times 25 \times 24 \times 3600} \times 589,0 \times 10^{-9} = 4,0 \times 10^{-12} \text{ m} = 4,0 \text{ pm}$$

16. Dans le manuel élève, la première figure du haut a été corrigée ; l'unique bâton a été déplacé à 440 Hz.

a. Le son 1 est émis par un diapason. C'est un son pur. Son spectre ne contient que le fondamental et prend donc la forme d'un diagramme ne présentant qu'un seul bâton. Le spectre du haut est donc celui du son 1.

La fréquence du fondamental du spectre du milieu est de 110 Hz. Il correspond au son émis par la corde 2 à vide accordée sur la note La. Ce spectre est donc celui du son 2.

En appuyant sur la corde 6, le musicien produit un son plus aigu donc de fréquence supérieure à celle de la note Mi « aigu » donc supérieure à 330 Hz. La fréquence du fondamental sur le dernier spectre correspond à cela puisqu'elle est égale à 440 Hz.

b. La fréquence du fondamental du son 1 et celle du son 3 sont égale : $f = 440 \text{ Hz}$. Ces sons se distinguent par leur composition spectrale, le son 3 présentant des harmoniques contrairement au son 1 qui ne contient que le fondamental. Les sons 1 et 3 se distinguent donc par leur timbre.

La fréquence du fondamental du son 2 et celle du son 3 sont différente : $f = 440 \text{ Hz}$ pour le son 3 et $f' = 110 \text{ Hz}$ pour le son 2. Les sons 2 et 3 ont des hauteurs différentes.

Ces sons se distinguent également par leur timbre puisque les compositions spectrales sont différentes : l'amplitude relative des harmoniques n'est pas la même d'un spectre à l'autre. On peut citer l'harmonique de rang 3 dont l'amplitude relative est proche de 1 pour le son 2 et proche de 0 pour le son 3.

c. Les sons 2 et 3 ont des hauteurs différentes : le son 3, de fréquence plus faible, correspond à un La plus grave que le son 2.

Exercices d'entraînement

17. a. $L = 10 \log \frac{I}{I_0}$ donc $\frac{L}{10} = \log \frac{I}{I_0}$ soit $10^{\frac{L}{10}} = \frac{I}{I_0}$.

Ainsi :

$$I_1 = I_0 \times 10^{\frac{L_1}{10}} = 10^{-12} \times 10^{\frac{70}{10}} = 1 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

De même :

$$I_2 = 4 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Remarque : cette question est l'occasion d'attirer l'attention sur la règle concernant les chiffres significatifs. La présence du logarithme ou de la puissance de 10 entraîne une réflexion au cas par cas.

Exemple : un écart de 1 dB sur le niveau $L_2 = 76$ dB correspond à une imprécision de $\frac{1}{76} = 1,3$ %, ce qui est raisonnable pour les deux chiffres significatifs donnés.

Pour la valeur $L_2 = 75$ dB, on obtiendrait $I_2 = 10^{-12} \times 10^{7,5} = 3,2 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; l'écart relatif entre les deux valeurs de I_2 est de l'ordre de 25 %, ce qui justifie le choix de ne garder qu'un chiffre significatif aux valeurs de I ainsi calculées.

b. $L = 10 \log \left(\frac{I_1 + I_2}{I_0} \right) = 10 \log \left(\frac{5 \times 10^{-5}}{10^{-12}} \right) = 77$ dB.

c. En notant n le nombre de violons, $L_1 = 70$ dB étant le niveau sonore mesuré pour un seul violon et $L_n = 90$ dB étant celui correspondant à n violons :

$$L_n = 10 \log \frac{nI_1}{I_0} \text{ donc } \frac{L_n}{10} = \log \frac{nI_1}{I_0} \text{ soit } 10^{\frac{L_n}{10}} = \frac{nI_1}{I_0}$$

Soit :

$$n = \frac{I_0 \times 10^{\frac{L_n}{10}}}{I_1} = \frac{10^{-12} \times 10^{\frac{90}{10}}}{1 \times 10^{-5}} = 1 \times 10^2$$

En multipliant le nombre de violon par cent, on augmente le niveau sonore de 20 dB.

18. a. Bien que les instruments émettent des sons de même hauteur, leur timbre est différent, ce qui permet de les distinguer.

b. Les enregistrements seront différents de par la forme du signal enregistré. Leur point commun est leur fréquence identique (220 Hz) donc leur période (durée d'un motif élémentaire : $T = 4,55$ ms).

c. La note jouée n'est pas un La_2 car la fréquence du fondamental n'est pas de 220 Hz. La fréquence du fondamental étant supérieure (0,4 kHz environ), le musicien produit un son plus aigu.

19. a. La propriété physiologique commune à ces deux sons correspondant à la même note est la hauteur. La grandeur physique associée est la fréquence.

b. Les figures (a) et (c) correspondent à des sons jouant la même note puisque la durée d'un motif élémentaire ou période est la même ($T = 7,5$ ms) donc la fréquence f est la même.

Les formes des signaux sont différentes. La propriété physiologique qui permet de distinguer ces deux sons est le timbre.

c. Pour le son (b), $2T = 7,5$ ms :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{2}{7,5 \times 10^{-3}} = 2,7 \times 10^2 \text{ Hz}$$

La fréquence du fondamental est donc :

$$f_1 = f = 2,7 \times 10^2 \text{ Hz}$$

Celles des quatre harmoniques suivants sont :

$$f_2 = 2f_1 = 5,4 \times 10^2 \text{ Hz}$$

$$f_3 = 3f_1 = 8,1 \times 10^2 \text{ Hz}$$

$$f_4 = 4f_1 = 1,1 \times 10^3 \text{ Hz}$$

$$f_5 = 5f_1 = 1,4 \times 10^2 \text{ Hz}$$

d. Pour un son de même hauteur (même fréquence fondamentale) joué par des instruments différents, la différence est liée au spectre de chaque son (nombre et répartition des harmoniques différents) et à l'évolution dans le temps, propre à chaque instrument.

20. a. $\lambda' > \lambda \Leftrightarrow$ il s'agit bien d'un décalage vers les radiations de longueur d'onde plus élevée donc vers le rouge : l'astronome a raison de conclure à un « redshift ».

b. $\lambda' > \lambda \Leftrightarrow f' < f$ soit $f_{\text{récepteur}} < f_{\text{source}}$: l'étoile s'éloigne de l'observateur.

c. $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} \Leftrightarrow v = \frac{c\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{3,00 \times 10^8 \times (656,315 - 656,285) \times 10^{-9}}{656,285 \times 10^{-9}} = 1,37 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

21. a. À $f = 1\,000$ Hz, $L_{\min} = 0$ dB et $L_{\max} = 1,2 \times 10^2$ dB.

Or $L = 10 \log \frac{I}{I_0}$ donc $\frac{L}{10} = \log \frac{I}{I_0}$ soit $10^{\frac{L}{10}} = \frac{I}{I_0}$.

Ainsi :
$$I = I_0 \times 10^{\frac{L}{10}}$$

A.N. :
$$I_{\min} = 10^{-12} \times 10^{\frac{0}{10}} = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

et
$$I_{\max} = 1,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

b. Pour $f_1 = 100$ Hz, le seuil d'audibilité est :

$$L_{\min}(f_1) = 38 \text{ dB}$$

Un son de niveau sonore $L = 30$ dB n'est donc pas audible car $L < L_{\min}(f_1)$.

Par contre, à $f_2 = 500$ Hz, le seuil d'audibilité est :

$$L_{\min}(f_2) = 8 \text{ dB}$$

$L > L_{\min}(f_2)$: le son est audible.

c. En imaginant par interpolation la courbe d'égale sensation auditive passant par le point de coordonnées (500 Hz ; 40 dB), on constate que le point d'abscisse 100 Hz a pour ordonnée 60 dB environ.

Un son de fréquence 100 Hz, et de niveau d'intensité sonore 60 dB, donne la même sensation auditive qu'un son de fréquence 500 Hz à 40 dB.

d. On note n le nombre de machine produisant un son de niveau d'intensité $L_1 = 40$ dB à 500 Hz et d'intensité sonore :

$$I_1 = I_0 \times 10^{\frac{L_1}{10}} = 1,0 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Le seuil de douleur à 500 Hz est $L_{\max} = 1,23 \times 10^2$ dB.

Pour atteindre ce niveau, il faut :

$$L_{\max} = 10 \log \frac{nI_1}{I_0} \text{ donc } \frac{L_{\max}}{10} = \log \frac{nI_1}{I_0} \text{ soit } 10^{\frac{L_{\max}}{10}} = \frac{nI_1}{I_0}$$

Soit :

$$n = \frac{I_0 \times 10^{\frac{L_{\max}}{10}}}{I_1} = \frac{10^{-12} \times 10^{12,3}}{1,0 \times 10^{-8}} = 2,0 \times 10^8$$

Il faut près de 200 millions de machines produisant un son de niveau d'intensité $L_1 = 40$ dB à 500 Hz pour atteindre le seuil de douleur à cette fréquence.

e. La réponse à la question c. apporte un élément d'explication. Un son de fréquence 100 Hz et de niveau d'intensité sonore 62 dB donne la même sensation auditive qu'un son de fréquence 500 Hz à 40 dB. Pour une fréquence inférieure à 1 000 Hz environ, l'oreille humaine est plus sensible aux sons aigus qu'aux sons graves. Ainsi, utilisant des sons plus aigu, une publicité paraît plus sonore qu'un documentaire sonore d'égale niveau sonore mais plus grave. En s'appuyant la réponse à la question c., un son de fréquence 500 Hz à 40 dB donne une sensation auditive supérieure à un son de fréquence 100 Hz de niveau d'intensité 40 dB.

En produisant des sons plus aigus, une publicité peut ainsi apparaître plus sonore tout en respectant la législation en terme de niveau d'intensité sonore.

Remarque : l'article 14 du décret du 27 mars 1992, prévoit que le niveau sonore de la publicité ne doit pas excéder le niveau sonore moyen du reste du programme. En 2005, l'avènement de nouveaux modes de gestion des pistes audio en numérique, ont permis aux annonceurs de trouver la parade augmentant les fréquences des signaux utilisés pour diffuser leur message et en relevant l'amplitude de ceux-ci juste en dessous du niveau maximal autorisé. L'encadrement règlementaire a été modifié en 2010 et précise que, dorénavant, le niveau sonore de la publicité, y compris le traitement de la dynamique sonore, ne doit pas excéder le niveau sonore moyen du reste du programme.

22. a. Pour $v = 98 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$:

$$|\Delta f| = \frac{2v \cos \alpha}{c} \times f = \frac{2 \frac{98}{3,6} \cos 25}{3,00 \times 10^8} \times 34,0 \times 10^9 = 5,6 \times 10^3 \text{ Hz} = 5,6 \text{ kHz}$$

Pour $v = 90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$:

$$|\Delta f| = 5,1 \text{ kHz}$$

b. Avec $\alpha = 9,0^\circ$ au lieu de 25° pour $v = 90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$:

$$|\Delta f| = \frac{2 \frac{90}{3,6} \cos 9,0}{3,00 \times 10^8} \times 34,0 \times 10^9 = 5,6 \text{ kHz}$$

Cette valeur est identique à celle obtenue pour $v = 98 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ avec un radar correctement réglé. Bien que l'automobiliste ne dépasse pas la limite de vitesse autorisée, le radar incorrectement positionné peut déclencher la prise de vue et relever, à tort, une infraction.

23. a. Si la voiture se rapproche de l'auto-stoppeur fixe :

$$v_R = 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \quad \text{et} \quad f_R = \frac{v}{v - v_E} f_E$$

A.N. :
$$v_E = 90 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1} = \frac{90,0 \times 10^3}{3600} = 25,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Alors :
$$f_R = \frac{340}{340 - 25,0} \times 400 = 432 \text{ Hz}$$
 mettre

b. Si la voiture se rapproche de l'autostoppeur :

$$f_R = \frac{v}{v + v_E} f_E = \frac{340}{340 + 25,0} \times 400 = 373 \text{ Hz}$$

c. La variation relative de la fréquence est au minimum de 13,5 %, ce qui est supérieur à l'écart de 6 % correspondant à un demi-ton entre deux notes. La différence est perceptible.

24. *Dans le manuel élève, la figure (e) a été corrigée ; en effet, elle doit être semblable à la figure (c).*

1. a. Pour augmenter la précision sur la mesure de la période, on mesure la durée de plusieurs motifs élémentaires.

Exemple : $3,5T = 4,0 \text{ ms}$.
$$f = \frac{1}{T} = \frac{3,5}{4,0 \times 10^{-3}} = 8,8 \times 10^2 \text{ Hz}$$

b. La fréquence de l'harmonique de rang 2 est $f_2 = 2f = 1,8 \times 10^3 \text{ Hz}$.

La fréquence de l'harmonique de rang 3 est $f_3 = 3f = 2,6 \times 10^3 \text{ Hz}$.

2. a. L'atténuation est inférieure à 25 dB dans le cas de port de bouchons moulés uniquement.

b. L'atténuation due aux bouchons en mousse augmente lorsque la fréquence augmente. L'atténuation est donc d'autant plus élevée que le son est aigu et d'autant plus faible que le son est grave. Les bouchons en mousse restituent les sons grave, appelés sons « sourds » dans le document.

3. a. La hauteur du son est conservée par les deux types de bouchons puisque la fréquence du fondamentale reste inchangée. Par contre, le port de bouchons en mousse modifie la composition spectrale du son (voir figures (c) et (d) : amplitude relative des harmoniques différentes d'un spectre à l'autre) et donc le timbre, contrairement à celui des bouchons moulés en silicone (voir figures (c) et (e)).

b. Le port de bouchons moulés n'altérant ni le timbre ni la hauteur d'un son, on peut effectivement dire qu'ils conservent les qualités du son.

Exercices de synthèse

25. Réponses aux questions intermédiaires de l'exercice apprendre à chercher

- a. Les raies a et g sont à utiliser comme référence pour obtenir une échelle du spectre la plus précise possible.
b. On peut remplir le tableau ci-dessous :

Distance sur le papier	Différence de longueur d'onde en réalité
entre les raies de référence $d_0 = 48,5$ mm	entre les raies de référence $\Delta\lambda_0 = 112,7$ nm
correspondant au décalage Doppler subi par la raie K, matérialisé par la flèche $d = 36$ mm	correspondant au décalage Doppler de longueur d'onde recherché $\Delta\lambda = ?$

c. Ainsi :

$$\Delta\lambda = \frac{d \times \Delta\lambda_0}{d_0} = \frac{36 \times 112,7}{48,5} = 84 \text{ nm}$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} \Leftrightarrow v = \frac{c\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{3,00 \times 10^8 \times 84 \times 10^{-9}}{396,85 \times 10^{-9}} = 6,3 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

26. 1. a. $3T_1 = 3,4$ ms soit :

$$T_1 = \frac{3,4}{3} = 1,13 \text{ ms} \quad \text{et} \quad f_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{3}{3,4 \times 10^{-3}} = 8,82 \times 10^2 \text{ Hz}$$

L'axe des abscisses est gradué toutes les à 0,5 ms. L'incertitude-type sur la mesure de $3T_1$ peut être estimée à :

$$s = \frac{0,5}{\sqrt{12}} = 0,14 \text{ ms}$$

Ainsi, sans tenir compte de l'incertitude élargie :

$$\Delta T_1 = \frac{0,14}{3} = 0,047 \text{ ms, que l'on arrondie à } 0,05 \text{ ms}$$

Or : $\frac{\Delta T_1}{T_1} = \frac{\Delta f_1}{f_1}$ soit $\Delta f_1 = \frac{\Delta T_1}{T_1} f_1 = \frac{0,047}{1,13} \times 8,82 \times 10^2 = 0,37 \times 10^2 \text{ Hz}$, arrondie à $0,4 \times 10^2 \text{ Hz}$.

Finalement, on peut écrire :

$$T_1 = 1,13 \pm 0,05 \text{ ms} \quad \text{et} \quad f_1 = (8,8 \pm 0,4) \times 10^2 \text{ Hz}$$

b. Un encadrement de la valeur de la fréquence f_1 du fondamental est :

$$0,75 \text{ kHz} \leq f_1 \leq 1,0 \text{ kHz}$$

La valeur donnée en 1.a. est comprise dans cet intervalle.

Valeurs approchées des harmoniques de rang 2 et 3 :

$$f_2 \approx 1,7 \text{ kHz} \text{ et } f_3 \approx 2,5 \text{ kHz}$$

c. $f_2 = 2f_1 = 2 \times 8,8 \times 10^2 = 1,8 \times 10^3 \text{ Hz} \approx 1,7 \text{ kHz}$.

De même, $f_3 = 3f_1 = 3 \times 8,8 \times 10^2 = 2,6 \times 10^3 \text{ Hz} \approx 2,5 \text{ kHz}$.

2. a. Les signaux ont même fréquence (même période) ce que confirme la lecture des spectres : la fréquence du fondamental est la même sur les figures **(b)** et **(d)**. La hauteur du son est identique dans les deux cas.

b. Les formes des signaux sont différentes, ce que confirme la lecture des spectres : les compositions spectrales sont différentes. Par exemple, l'amplitude de l'harmonique de rang 3 est d'environ 0,4 sur le spectre **(b)** et de 0,1 sur le spectre **(d)**.

Les sons se distinguent par leur timbre.

27. Dans le manuel élève, la donnée en fin d'exercice a été corrigée. Le décalage Doppler-Fizeau respecte bien la relation :

$$\frac{|\Delta\lambda|}{\lambda} = \frac{v}{c}$$

a. O se rapprochant de l'observateur terrestre :

$$f_{\text{récepteur}} > f_{\text{source}} \quad \text{et donc} \quad \lambda_{\text{récepteur}} < \lambda_{\text{source}}$$

La partie correspondant à O est donc décalée vers les courtes longueurs d'onde. La partie supérieure de la raie correspond à O. Celle du centre, qui ne subit donc pas de décalage, correspond à S car ce point n'a pas de mouvement relatif par rapport à la terre suivant la direction de visée :

$$f_{\text{récepteur}} = f_{\text{source}}$$

La raie en bordure supérieure est décalée de 3 pixels vers la gauche ($\lambda' < \lambda$) : ainsi, le décalage de longueur d'onde est telle que :

$$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda \quad \text{avec} \quad \Delta\lambda = -3 \times 0,099 = 0,30 \text{ nm}$$

$$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda = 658,4 - 0,30 = 658,1 \text{ nm}$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} \Leftrightarrow v = \frac{c\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{3,00 \times 10^8 \times 0,30 \times 10^{-9}}{658,4 \times 10^{-9}} = 1,4 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

28. Cet exercice est également proposé dans le dossier Objectif BAC, page 549, en exemple de sujet ECE n°2.

Le fichier image indiqué dans l'énoncé est disponible sur le site élève :

www.nathan.fr/siriuslycee/eleve-termS

Les fiches techniques des logiciels sont à fournir au candidat. Elles sont données ci-après mais sont également disponibles sur le site élève avec l'exercice. Deux exemples de fiche technique sont données ici : une pour le logiciel de traitement d'image SalsaJ et l'autre pour le logiciel de traitement de données Regressi.

FICHE TECHNIQUE DU LOGICIEL SALSALJ (TRAITEMENT D'IMAGES)

- Pour lancer SalsalJ

Cliquer l'icône de raccourci « SalsalJ » :



- Quelques boutons et fonctions associées



Ouvrir un
fichier image



Annuler la dernière
opération



Tracer un trait



Zoom
avant/arrière



Déplacement
dans le cadre
de l'image

- Pour ouvrir un fichier image

- 4) Effectuer « Fichier » puis « Ouvrir » ou cliquer sur le bouton adapté (voir tableau ci-dessus).
- 5) Rechercher le fichier en se déplaçant dans l'arborescence.
- 6) Cliquer sur le fichier désiré puis « Ouvrir ».

- Pour étalonner l'échelle d'une image

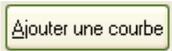
- 1) Tracer un trait entre deux points séparés d'une distance connue. Pour cela, cliquer sur le bouton adapté (voir tableau ci-dessus) puis cliquer et glisser entre les deux points. Penser à utiliser le zoom avant (voir tableau ci-dessus) au préalable pour gagner en précision.
- 2) Dans la barre de menu du logiciel, cliquer « Analyse » et « Indiquer l'échelle... ».
- 3) Compléter ou modifier les informations dans la fenêtre qui apparaît, cocher « Global » puis cliquer « OUI ».

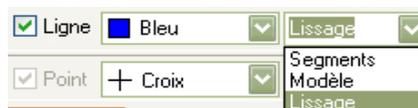
- Pour obtenir le graphe donnant l'intensité des pixels d'une image le long d'une ligne

- 1) Tracer un trait le long de la ligne désiré. Pour cela, cliquer sur le bouton adapté (voir tableau ci-dessus) puis cliquer et glisser entre les deux points. Penser à utiliser le zoom avant (voir tableau ci-dessus) au préalable pour gagner en précision.
- 2) Dans la barre de menu du logiciel, cliquer « Analyse » et « Coupe ».
- 3) Déplacer le pointeur sur le graphe qui apparaît pour accéder au coordonnées des points.
- 4) Cliquer le bouton « Liste » dans la fenêtre du graphique permet d'accéder aux coordonnées de chaque pixel de la ligne tracée.

Remarque : la valeur de l'abscisse tient compte de l'étalonnage de l'échelle de l'image si celui-ci a été réalisé au préalable.

FICHE TECHNIQUE DU LOGICIEL *REGRESSI* (TRAITEMENT DE DONNEES)

- Pour lancer *Regressi*
Cliquer l'icône de raccourci « *Regressi* » : 
- Pour préparer un tableau de données saisies au clavier
 - 1) Effectuer « Fichier » puis « Nouveau » et « Clavier »
 - 2) Renseigner chaque ligne de la fenêtre qui apparaît :
 - nom des grandeurs, dont les valeurs seront saisies au clavier ;
 - unité. Choisir celle du système international et pas un sous multiple. Exemple : m et non km ;
Remarque : les lettres grecs sont accessibles par la touche Ctrl.
Exemple : Ctrl + Maj + w permet d'écrire Ω .
 - ne pas indiquer de minimum et de maximum.
 - 3) Cliquer « OK » une fois le nom de chaque grandeur et unité bien définies.
 - 4) Saisir les valeurs au clavier. La puissance de 10 se note « E ». Exemple : pour $2,0 \times 10^{-3}$, taper « 2E-3 ».
- Pour créer une grandeur
 - 1) Dans la fenêtre du tableur, cliquer sur l'icône « Y+ ».
 - 2) Choisir le type de grandeur (expérimentale, calculée, dérivée...) puis entrer le nom de la grandeur et son unité, pas de commentaire sauf si cela est demandé.
 - 3) Entrer la formule permettant le calcul de la nouvelle grandeur (la puissance de 10 se note "E"). Valider.
- Pour supprimer ou modifier l'expression d'une grandeur créée
 - 1) Dans la fenêtre du tableur, mettre l'intercalaire « Expressions » au premier plan.
 - 2) Supprimer ou modifier l'expression de la grandeur.
 - 3) Effectuer une mise à jour en cliquant sur l'icône  qui clignote.
- Pour afficher une courbe
 - 1) Dans la fenêtre du grapheur, cliquer sur l'icône « Coordonnées ». 
 - 2) Choisir la grandeur à placer en abscisse puis la grandeur à placer en ordonnée.
Cliquer sur  si plusieurs grandeurs doivent être en ordonnée.
 - 3) Choisir le type de tracé (points et/ou lignes : segments, modèle, lissage) et valider.



- Pour modéliser une courbe

- 1) Dans la fenêtre du grapheur, afficher uniquement la courbe à modéliser
- 2) Cliquer sur l'icône « Modélisation » (icône ci-contre) pour ouvrir l'encadré destiné à saisir l'expression du modèle.
- 3) Il y a alors deux possibilités :
 - 1^{re} possibilité : dans l'encadré blanc de la fenêtre de modélisation qui apparaît, saisir au clavier l'expression du modèle. Effectuer une mise à jour en cliquant sur l'icône  qui clignote ;
 - 2^e possibilité : dans la fenêtre de modélisation qui apparaît, cliquer sur l'icône « Modèle prédéfini » et choisir parmi les neuf modèles proposés celui qui convient le mieux à la courbe que l'on souhaite modéliser puis valider.
- 4) Ajuster.
- 5) Les paramètres de la modélisation apparaissent (expression du modèle, valeurs numériques des coefficients, erreurs...).

- Pour accéder aux coordonnées d'un point du graphe

Dans la fenêtre du grapheur, cliquer sur la flèche  « Outils gr. » en haut à gauche pour dérouler le menu « Outils graphiques » ou « Curdeur » et choisir  Réticule .
Les coordonnées du curseur sont indiquées en bas à gauche de la fenêtre graphique.

Remarques

Pour affiner le déplacement, appuyer sur les flèches du clavier plutôt que de déplacer la souris.

Pour accéder à l'écart horizontal (de durée par exemple, si l'axe des abscisses est un axe des temps t) entre deux points, cliquer sur le point de départ, et sans relâcher la pression sur le clic gauche de la souris, aller jusqu'au deuxième point. Sans relâcher la pression, lire l'écart en bas à gauche de la fenêtre graphique (exemples : « $\delta t = \dots$ » ou « $\Delta t = \dots$ »).

Résultats du travail à effectuer par le candidat

1. a. Protocole 1

Lancer le logiciel de traitement d'images *SalsaJ* puis ouvrir le fichier contenant l'image du spectre présenté dans les documents au format jpeg. Agrandir la fenêtre.

Étalonner l'échelle du spectre d'Hydra en utilisant les raies de longueurs d'onde connues. Pour gagner en précision, penser à utiliser les raies les plus éloignées : ici, a et g avec :

$$\lambda_g - \lambda_a = 112,7 \text{ nm}$$

Mesurer le décalage Doppler $\Delta\lambda$ de longueur d'onde de la raie H. Pour cela, obtenir le graphe donnant l'intensité lumineuse de chaque pixel le long d'une ligne passant par-dessus la flèche matérialisant ce décalage et l'utiliser pour déterminer la longueur de cette flèche.

En déduire les valeurs de $\lambda' = \lambda + \Delta\lambda$ (avec $\lambda = 396,85 \text{ nm}$ d'après l'énoncé) et $v = \frac{c\Delta\lambda}{\lambda}$.

b. $\lambda' = \lambda + \Delta\lambda = 396,85 + 83 = 469,85 \text{ nm}$.

c. Vitesse v de la récession d'Hydra :

$$v = \frac{c\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{3,00 \times 10^8 \times 83 \times 10^9}{396,85 \times 10^9} = 6,3 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

2. a. Protocole 2

Renouveler le protocole 1 dans le cas des quatre autres galaxies.

Consigner les résultats dans le tableau.

Utiliser le logiciel de traitement de données pour tracer la courbe $v = f(D)$ et la modéliser.

b. Résultats obtenus après la mise en œuvre du protocole :

Galaxie	Hydra	Bootes	Corona Boréalis	Ursa Major	Virgo
$D \text{ (m)}$	$2,4 \times 10^{25}$	$1,4 \times 10^{25}$	$1,0 \times 10^{25}$	$4,5 \times 10^{24}$	$1,3 \times 10^{24}$
$v \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	$6,3 \times 10^7$	$4,0 \times 10^7$	$2,5 \times 10^7$	$1,7 \times 10^7$	$0,4 \times 10^7$
NB : valeurs de $\Delta\lambda$	83 nm	53 nm	33 nm	22 nm	5 nm

v en ordonnée et D en abscisse. $v = H_0 \times D$.

c. Le modèle convient. L'écart relatif est de 7,4 %. Il est inférieur à 15 %.

$$H_0 = (2,69 \pm 0,27) \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}.$$

D'après le document, $H_0 = 77 \text{ (km/s)/Mpc}$ avec une incertitude de 15 %.

Dans le système d'unité international :

$$H_0 = \frac{77 \times 10^3}{3,086 \times 10^{16} \times 10^6} = 2,5 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1} \text{ avec une incertitude de 15 \%}$$

ce qui signifie que : $2,1 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1} \leq H_0 \leq 2,9 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$

La valeur que nous avons obtenue appartient à cet encadrement. Elle est donc compatible avec la valeur de la constante Hubble du texte introductif.

FICHE D'ÉVALUATION

Compétences expérimentales	Exemples de compétences contextualisées	Question	Évaluation A, B, C ou D
S'approprier	Extraire et exploiter les informations présentes dans l'énoncé du sujet afin de comprendre les objectifs fixés	2.c.	
Analyser	Concevoir un protocole	1.a.* et 1.b.*	
Réaliser	Suivre un protocole, utiliser le matériel (dont l'outil informatique) de manière adaptée, effectuer des mesures avec précision (zoom, pointage précis...)	Mise en œuvre des protocoles	
Valider	Exploiter des résultats expérimentaux et valider le choix du modèle, commenter, porter un jugement critique sur le résultat de la mesure de H_0	1.b., 1.c., 2.b. et 2.c.	
Communiquer	Utiliser les notions et le vocabulaire scientifique adaptés, présenter et formuler une argumentation de manière cohérente complète et compréhensible	Cette compétence est transversale : elle est mobilisée sur l'ensemble de l'épreuve sans être nécessairement évaluée	
Être autonome et faire preuve d'initiative	Travailler seul avec discernement et responsabilité, prendre des initiatives, demander une aide pertinente	Cette compétence est transversale : elle est mobilisée sur l'ensemble de l'épreuve en participant à la définition du niveau de maîtrise des autres compétences	

Niveau A : le candidat a réalisé l'ensemble du travail demandé de manière satisfaisante selon les critères précisés dans le sujet ou avec une ou deux interventions de l'examineur, concernant des difficultés identifiées et explicitées par le candidat et auxquelles il apporte une réponse quasiment de lui-même.

Niveau B : le candidat a réalisé l'ensemble du travail demandé de manière satisfaisante selon les critères précisés dans le sujet mais avec quelques interventions de l'examineur concernant des difficultés ou erreurs non identifiées par le candidat mais résolues par celui-ci :

- après avoir réfléchi suite à un questionnement ouvert mené par l'examineur ;
- ou par l'apport d'une solution partielle dans le cas d'une compétence affectée d'un fort coefficient.

Niveau C : le candidat reste bloqué dans l'avancement de la tâche demandée, malgré les questions posées par l'examineur. Des éléments de solutions lui sont apportés, ce qui lui permet de poursuivre la tâche.

Niveau D : le candidat a été incapable de réaliser la tâche demandée malgré les éléments de réponses apportés par l'examineur. Cette situation conduit l'examineur à fournir une solution complète de la tâche : par exemple un protocole à réaliser ou des valeurs à exploiter pour permettre l'évaluation des autres compétences du sujet.

29. Rédiger une synthèse de documents

Rédiger une synthèse de documents (ou de connaissances) consiste à extraire des informations de documents ou de connaissances et à les mettre en relation pour répondre à une problématique. Elle est parfois guidée, comme c'est le cas ici, mais le guide ne donne que certains éléments attendus. Les réponses apportées en suivant le guide ne sont pas forcément les seules à fournir et surtout, elles doivent être liées les unes aux autres pour constituer la rédaction de la synthèse.

La rédaction d'une synthèse ne fait pas appel à d'autres sources, comme le dictionnaire ou Internet. Les documents, le cours et la culture générale suffisent à sa rédaction.

Eléments attendus	Exemples	
<p>Réponses à l'aide à aux questions du guide « aide à la rédaction »</p>	<p>1. Deux difficultés pour la détection directe</p> <p>2. Objectif de la synthèse</p> <p>3. Observation concernant la position de raies</p> <p>4. Utilisation de l'effet Doppler</p> <p>5. Confirmation</p> <p>6. Mise en relation : connaissances + docs 2 et 3</p> <p>7. Interprétation des observations précédentes en utilisant le document 4</p> <p>8. Éléments permettant de détecter la présence de l'exo-planète</p>	<p>Doc 1 : petite taille et faible luminosité par rapport à l'étoile</p> <p>Expliquer comment l'effet Doppler permet de mettre en évidence la présence d'une exo-planète autour de l'étoile étudiée</p> <p>Doc 2 : déplacement (périodique) des raies d'absorption</p> <p>Connaissances : mouvement (périodique) de la source par rapport au récepteur</p> <p>Doc 3. : évolution périodique de v</p> <p>La mesure du décalage Doppler de longueur d'onde permet de calculer la valeur v de la vitesse radiale de l'étoile dans la direction de visée.</p> <p>Doc 4. : le caractère périodique de l'évolution de v peut-être associée au mouvement de révolution de l'étoile causée par la présence d'une exoplanète en révolution autour de l'étoile</p> <p>La détection d'une exoplanète s'appuie sur l'observation du spectre de la lumière provenant de l'étoile. La présence d'une exoplanète de masse suffisamment grande et à proximité d'une étoile entraîne un mouvement de révolution de l'étoile et un décalage Doppler périodique de longueur d'onde des raies</p>
<p>Rédaction</p>	<p>Structure et documents cités</p> <p>Extraction des informations : pertinence exactitude intégralité</p> <p>Expression :</p> <p>lien</p> <p>réponse à la problématique</p>	<p>Introduction avec réponses 1 et 2 Développement avec réponses 3 à 7 Conclusion avec 8</p> <p>Absence d'information non nécessaire et place correcte de l'information utile dans l'argumentation</p> <p>Pas de déformation de l'information (ne pas lui faire dire autre chose et encore moins le contraire)</p> <p>Toutes les informations à extraire sont présentes (ici 1,2, 3, 4, 7)</p> <p>Orthographe, formulation, argumentation (cause → conséquence), paraphrase évitée (ou copier/coller), concision (30 lignes max)</p> <p>Liaison logique entre les différentes parties (pas de 1, 2, 3...) + mise en relation des informations pour répondre à la problématique</p> <p>Réponse claire mettant en évidence la compréhension du sujet traité</p>

Chapitre 4 - Diffraction des ondes

Manuel pages 71 à 88

Choix pédagogiques

Ce chapitre est la suite des chapitres consacrés aux ondes, il permet d'étudier l'une des propriétés des ondes : la diffraction.

Seront abordés l'influence de la taille a de l'ouverture ou de l'obstacle et l'influence de la longueur d'onde λ sur le phénomène de diffraction et l'écart angulaire de diffraction.

Des animations, des simulations, des vidéos documentaires et d'expériences illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et, certaines d'entre elles, sur les sites Internet compagnon Sirius.

Page d'ouverture

La photographie d'ouverture illustre le phénomène de diffraction des ondes à la surface de l'eau. Les vagues créées par la houle (une onde rectiligne) subissent un phénomène de diffraction au passage des rochers (une ouverture). L'onde rectiligne génère une onde circulaire ; l'onde ainsi diffractée ne se propage plus seulement dans la direction initiale, mais dans plusieurs directions.

On peut interroger les élèves sur l'influence de la dimension de l'ouverture sur le phénomène observé.

Activités

Activité documentaire 1. Une propriété des ondes

Commentaires

Cette activité permet de découvrir le phénomène de diffraction avec des ondes ultrasonores.

La dernière question invite à une recherche documentaire.

Cette activité documentaire peut aussi se transformer en activité expérimentale.

Réponses

1. Analyser les documents

a. La valeur de l'amplitude de la tension mesurée U est la plus élevée pour $\alpha = 0^\circ$.

Série 1 : $U_{\max} = 400$ mV.

Série 2 : $U_{\max} = 350$ mV.

Série 3 : $U_{\max} = 200$ mV.

b. Les courbes 1 et 2 sont quasiment semblables, l'amplitude de la tension est maximale pour $\alpha = 0^\circ$, et ensuite, elle diminue nettement de manière symétrique.

Pour la courbe 3, l'amplitude de la tension est maximale pour $\alpha = 0^\circ$, et diminue de manière symétrique mais moins rapidement que les deux autres. À partir de $\alpha = \pm 30^\circ$, l'amplitude de la tension de la courbe 3 est plus importante que celles des courbes 1 et 2.

2. Interpréter

a. Lorsqu'il y a une ouverture de largeur a sur le trajet de l'onde ultrasonore, l'amplitude U_{\max} est plus faible que lorsqu'il n'y a pas d'obstacle. Plus la largeur de la fente est faible, plus la tension U_{\max} est faible.

b. Si la largeur de la fente est de 20 mm, la propagation de l'onde n'est pas modifiée : les courbes 1 et 2 sont quasiment identiques.

Par contre, si la largeur de la fente est de 4 mm, alors la propagation de l'onde est modifiée : pour les courbes 1 et 3, au-delà de $\alpha = \pm 30^\circ$, l'amplitude de la tension U est plus importante pour la courbe 3.

c. Plus la largeur a est faible, plus le phénomène observé est important.

On aurait pu s'attendre à une propagation de l'onde dans le prolongement de la fente uniquement.

3. Conclure

a. La diffraction se manifeste par un étalement des directions de propagation de l'onde lorsque celle-ci rencontre une ouverture (ou un obstacle).

b. Écoute d'une discussion derrière une porte ouverte, propagation des ondes radio malgré le relief naturel.

Activité expérimentale 2. Ondes et obstacles

Commentaires

Cette activité expérimentale permet de faire travailler les élèves en autonomie, ils peuvent émettre des hypothèses, puis les vérifier avec les vidéos proposées. L'objectif est d'illustrer certaines propriétés du phénomène de diffraction.

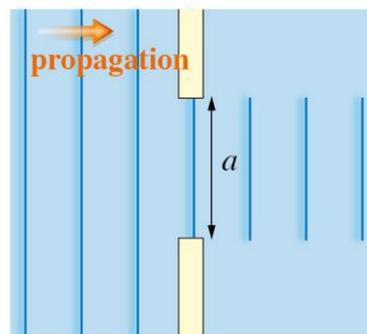
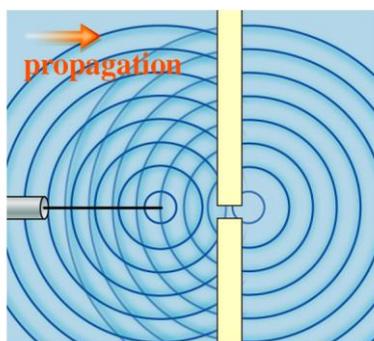
Réponses

1. Étude préalable

Les réponses peuvent être différentes suivant les élèves.

Voici des exemples de schémas que les élèves peuvent proposer :

1^{er} cas : onde circulaire/fente/onde circulaire 2^e cas : onde rectiligne/fente/ onde rectiligne

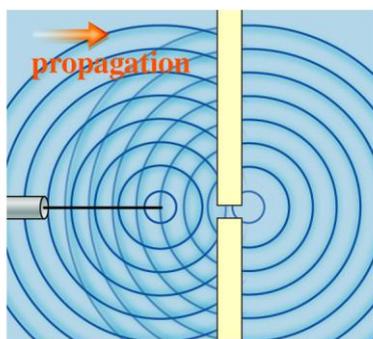


Dans le 1^{er} cas, l'élève dessine une onde circulaire après la fente et dans le 2^e cas, il dessine une onde rectiligne (diaphragmée). Souvent, il ne tient pas compte de la longueur d'onde avant et après la fente.

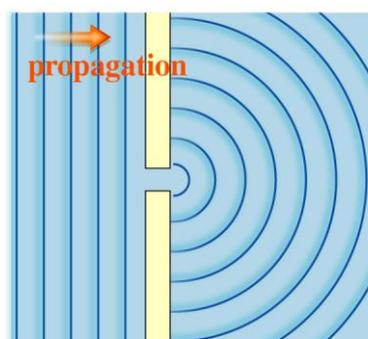
2. Observer

- a. Lorsqu'une onde rectiligne (ou une onde circulaire) à la surface de l'eau franchit :
- une fente dont l'ouverture est de l'ordre du cm, la fente arrête partiellement l'onde, on dit que l'onde est diaphragmée ;
 - une fente dont l'ouverture est de l'ordre du mm, il y a étalement des directions de propagation de l'onde. L'onde générée est circulaire.

Onde circulaire/ fente/ onde circulaire



Onde rectiligne/fente/ onde rectiligne



b. Selon la réponse des élèves.

3. Exploiter

- Plus la largeur de la fente est faible, plus le phénomène observé est important.
- Le franchissement de l'obstacle ne modifie pas la longueur d'onde.

4. Conclure

Lorsqu'une onde rectiligne (ou circulaire) de longueur d'onde λ rencontre une ouverture ou un obstacle de « faible » dimension, elle est diffractée. L'onde générée est circulaire et de même longueur d'onde.

Activité expérimentale 3. Diffraction de la lumière par un fil

Commentaires

L'objectif de cette activité expérimentale est d'étudier l'influence de la dimension de l'objet diffractant sur la figure de diffraction.

Cette activité permet à l'élève de manipuler l'outil informatique, de se familiariser avec les incertitudes, de proposer un protocole et de le mettre en œuvre.

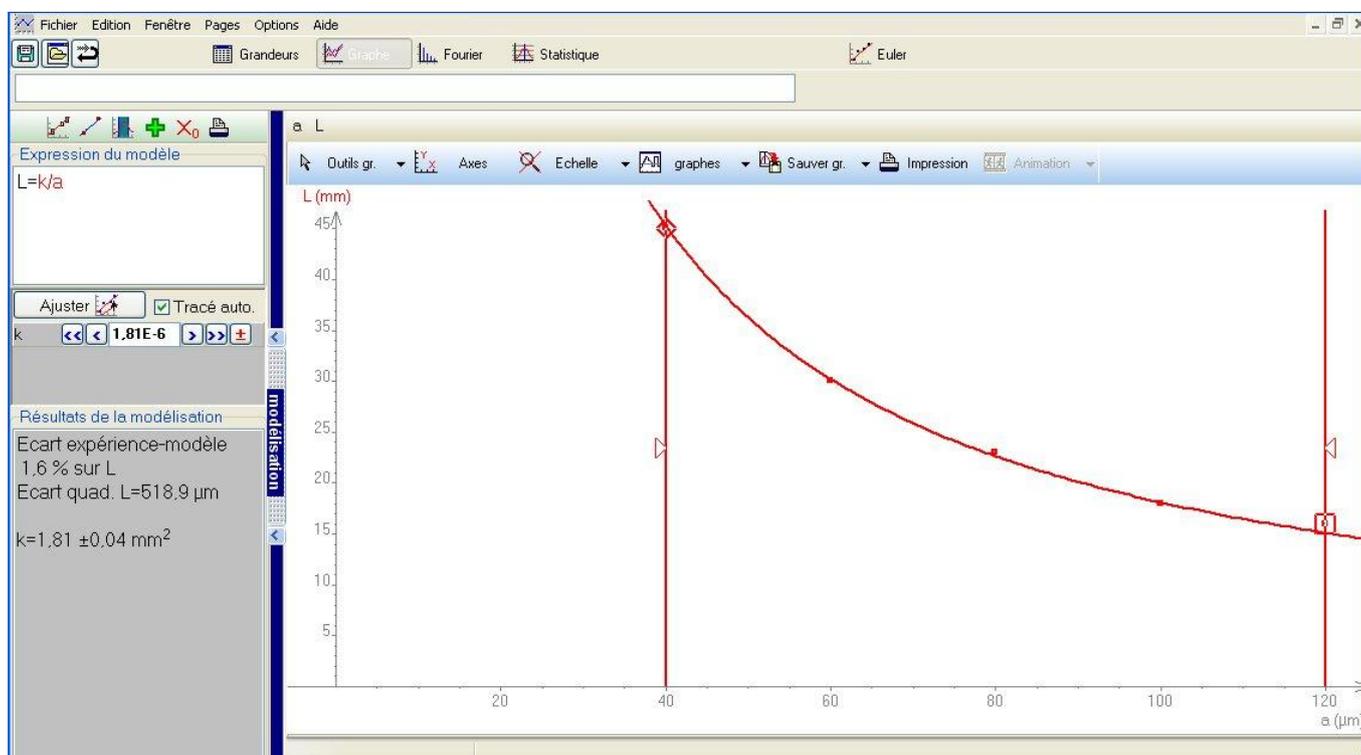
Réponses

1. Observer et exploiter

- Lorsque le diamètre a augmente, la largeur de la tache centrale L diminue.
- $D = 1,60 \text{ m}$ et $a = 40, 60, 80, 100$ et $120 \mu\text{m}$.

Le traitement de l'ensemble des points est réalisé sous *Regressi* : la fonction modèle est :

$$L = \frac{k}{a}$$



La valeur de k ajustée par la modélisation est $k = 1,81 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ (l'affichage ci-dessus donne 1,81, mais en mm^2).

2. Interpréter

a. $k = 1,81 \times 10^{-6} \text{ m}^2$. En identifiant $L = \frac{k}{a}$ et la relation donnée $L = \frac{2\lambda D}{a}$, on obtient :

$$k = 2\lambda D$$

Donc, $\lambda = \frac{k}{2D} = \frac{1,81 \times 10^{-6}}{2 \times 1,60} = 5,65 \times 10^{-7} \text{ m}$.

b. La valeur constructeur est $\lambda = 632,8 \text{ nm}$.

L'écart relatif est de $\frac{632,8 - 565}{632,8} = 0,11$ soit 11 %.

3. Conclure

a. Dans les mêmes conditions que précédemment (on ne modifie pas la source et la distance D), on remplace le fil calibré par le fil de diamètre inconnu.

On mesure la largeur de la tache centrale L' .

En utilisant la question 2.a. ou la courbe 1.b., on détermine la valeur de a' .

b. Selon les valeurs des élèves.

Simulation 4. Diffraction de la lumière blanche par une fente

Commentaires

Cette activité permet d'étudier, à l'aide d'une simulation disponible sur le site élève www.nathan.fr/siriuslycee/eleve-termS et le Manuel Numérique Enrichi, la figure de diffraction de la lumière blanche par une fente. Cette simulation permet de modifier les valeurs de différents paramètres.

L'élève peut travailler en autonomie.

Réponses

1. Formuler des hypothèses

a. La longueur d'onde λ , la distance objet fente-écran D et la largeur de la fente a peuvent influencer la largeur de la tache de diffraction L .

b. Si λ augmente, L augmente. Si D augmente, L augmente. Si a augmente, L diminue.

2. Interpréter

a. $\lambda_{\text{violet}} = 400 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{rouge}} = 800 \text{ nm}$.

b. Si la longueur d'onde augmente, L augmente : $L_{\text{violet}} < L_{\text{rouge}}$.

Si la longueur d'onde augmente, l'écart angulaire de diffraction θ augmente : $\theta_{\text{violet}} < \theta_{\text{rouge}}$.

3. Conclure

a. Le centre de la figure de diffraction sera blanc (superposition de toutes les lumières colorées visibles) et on observera des irisations sur les bords.

Exercices d'application

5 minutes chrono !

1. Mots manquants

- a. diffraction
- b. longueur d'onde
- c. inférieure
- d. écart angulaire ; diffraction ; augmente ; diminue
- e. lumière blanche

2. QCM

- a. Diffractée.
 - b. Verticale, composée d'une tache centrale très lumineuse et de taches latérales symétriques moins lumineuses.
 - c. $\frac{\lambda}{a}$.
 - d. $\lambda = 800 \text{ nm}$.
 - e. Blanche.
-

Compétences exigibles

3. a. L'étalement des directions est plus important dans le cas a, donc le phénomène de diffraction est plus important dans ce cas a.
b. Plus la dimension du trou est petite, plus le phénomène de diffraction est important, donc le diamètre du trou a est plus petit que le diamètre du trou b.
-

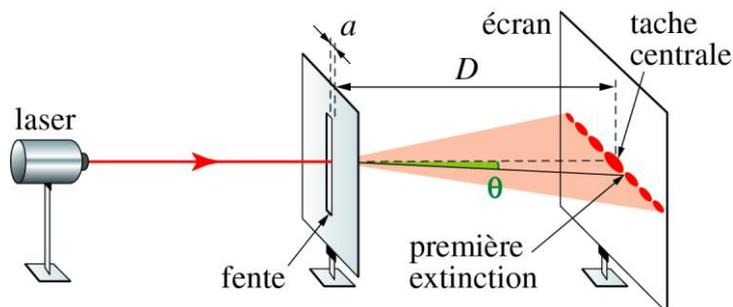
4. a. L'ouvreuse peut entendre le son grâce au phénomène de diffraction. Lorsque l'onde sonore franchit l'ouverture, il y a étalement des directions de propagation.
b. Plus la dimension de l'ouverture est inférieure à la longueur d'onde, plus le phénomène de diffraction est important.
 $a > \lambda_a = 0,11 \text{ m} = 11 \text{ cm}$, et $a < \lambda_g = 3,0 \text{ m} = 3,0 \times 10^2 \text{ cm}$.
Le son grave est donc plus diffracté que le son aigu.
-

5. a. L'écart angulaire de diffraction, $\theta = \frac{\lambda}{a}$, diminue si la largeur de la fente a augmente et augmente si la longueur d'onde λ augmente.
b. $\lambda_{\text{rouge}} > \lambda_{\text{violet}}$ donc $\theta_{\text{rouge}} > \theta_{\text{violet}}$.
-

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 4. Diffraction des ondes

6. a. L'écart angulaire de diffraction θ est l'angle entre la direction de propagation en l'absence de diffraction et la direction donnée par le milieu de la première extinction.

b.

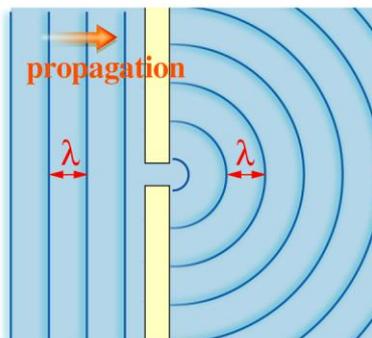


c. $\theta = \frac{\lambda}{a}$.

Compétences générales

7. a. a et λ sont du même ordre de grandeur, il est donc pertinent de prendre en compte le phénomène de diffraction.

b.



8. a. Liste du matériel nécessaire : émetteur d'ultrasons + alimentation + récepteur, oscilloscope + fils, disque gradué et fente réglable.

b. Alimenter un émetteur d'ultrasons réglé en mode continu.

Placer devant lui une fente réglable.

Placer face à lui un récepteur relié à un oscilloscope.

Déplacer le récepteur d'un angle α sur un arc de cercle.

Mesurer, tous les 10° , l'amplitude U de la tension aux bornes du récepteur.

Faire les mesures avec une fente de largeur 20 mm, puis avec une fente de largeur 4 mm.

9. a. Si la fente est verticale, la figure de diffraction est horizontale et composée d'une tache centrale très lumineuse, encadrée par des taches secondaires moins intenses.

b. Si la fente est horizontale, la figure de diffraction est verticale et composée d'une tache centrale très lumineuse, encadrée par des taches secondaires moins intenses.

c. Si l'élève tourne la fente dans le sens des aiguilles d'une montre, la figure de diffraction tourne dans le plan de l'écran dans le sens des aiguilles d'une montre.

10. a. La largeur de la tache centrale est $L = 24 \text{ mm}$.

b. On a $a = \frac{2\lambda D}{L}$, donc $a = 1,1 \times 10^{-4} \text{ m}$.

c. $100\lambda = 633 \times 10^2 \text{ nm} = 6,33 \times 10^{-5} \text{ m}$. Ainsi, $a > 100\lambda$, mais ces deux valeurs ont le même ordre de grandeur. Le résultat est donc cohérent.

11. Les fils du rideau fin jouent le rôle d'obstacle de faible dimension. Le phénomène de diffraction intervient donc dans le troisième cas.

Exercices de méthode

12. Exercice résolu.

13. a. Pour le point d'abscisse 20 mm^{-1} , on mesure une longueur de 27 mm pour son ordonnée. L'échelle pour l'ordonnée est de 37 mm pour la valeur $L = 60 \text{ mm}$.

Donc :

$$L_{(20\text{mm})} = 27 \times \frac{60}{37} = 44 \text{ mm}$$

$$L = \frac{m}{a} \text{ avec } m = \frac{44 - 0}{20 - 0} = 2,2 \text{ mm}^2$$

b. θ est proportionnel à $\frac{1}{a}$, $\theta = \frac{m}{a}$ avec $m = \frac{0,020 - 0}{3,44 \times 10^4 - 0} = 5,8 \times 10^{-7} \text{ m}$.

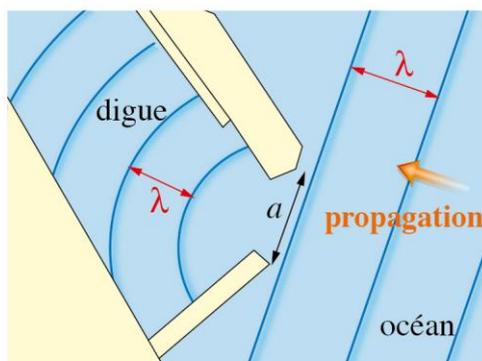
14. a. λ longueur d'onde de l'onde en m ; v vitesse de l'onde en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ et T période temporelle de l'onde en s.

$\lambda = v \times T$ avec la célérité $v = 58 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1} = 16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et la période temporelle $T = 5,0 \text{ s}$.

$$\lambda = 81 \text{ m}$$

b. $a < \lambda$, on peut donc observer le phénomène de diffraction.

c.



Exercices d'entraînement

15. 1. La photographie b illustre le phénomène de diffraction. On observe, nettement sur cette photographie, l'étalement des directions de propagation après l'ouverture.

2. a. Si on diminue la fréquence, l'écart angulaire augmente.

Si on diminue la dimension de l'ouverture, l'écart angulaire augmente : le phénomène de diffraction est de plus en plus visible.

b. La diffraction ne modifie pas la longueur d'onde de l'onde incidente.

Plus la longueur d'onde est grande, plus l'écart angulaire de diffraction est grand.

16. a. Une onde est diffractée si elle rencontre un obstacle (ou une ouverture) dont la dimension est du même ordre de grandeur ou inférieure à la longueur d'onde de l'onde. Si l'obstacle est beaucoup plus grand, elle sera arrêtée.

Une émission centimétrique, dont la longueur d'onde est de l'ordre du cm sera arrêtée par une petite colline de quelques dizaines de mètres.

b. $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3,00 \times 10^8}{162 \times 10^3} = 1,85 \times 10^3 \text{ m} = 1,85 \text{ km}$, l'ordre de grandeur de la longueur d'onde

est 1 km.

c. La largeur de l'entrée de la vallée (ouverture) et la longueur d'onde sont du même ordre de grandeur, il y a aura diffraction de l'onde radio et donc étalement des directions de propagation de l'onde. Les habitants pourront donc être prévenus.

17. a. $\theta = \frac{\lambda}{a} = \frac{\lambda}{k\lambda} = \frac{1}{k}$.

Si $k = 1$ $\theta = 1,0 \text{ rad} = 57^\circ$;

Si $k = 10$ $\theta = 0,10 \text{ rad} = 5,7^\circ$;

Si $k = 100$ $\theta = 0,010 \text{ rad} = 0,57^\circ$.

b. Le phénomène de diffraction est le plus important lorsque l'écart angulaire de diffraction est le plus grand ; donc pour $k = 1$.

c. Si $a = 0,5 \text{ cm}$, $\theta = 1 \times 10^{-4} \text{ rad}$.

Si $a = 50 \mu\text{m}$, $\theta = 1 \times 10^{-2} \text{ rad}$, le phénomène de diffraction est donc plus visible avec la fente de $50 \mu\text{m}$.

18. Plus la largeur de la fente est grande, plus l'intensité maximale est grande donc la fente n°3 correspond à la courbe a.

$\theta = \frac{\lambda}{a}$. Si $a_1 = \frac{a_3}{10}$ alors $\theta_1 = 10 \times \theta_3$; donc la fente n°1 correspond à la courbe b.

Et la fente n°2 correspond alors à la courbe c.

19. a. D'après les expériences 2 et 3, si a diminue alors L augmente, donc a se trouve au dénominateur de l'expression : la première expression est fausse.

D'après les expériences 2 et 4, si D diminue alors L diminue, donc D se trouve au numérateur de l'expression : la deuxième expression est fausse.

b. $\dim\left(\frac{2\lambda D}{a}\right) = \frac{\dim \lambda \times \dim D}{\dim a} = \frac{L^2}{L} = L$.

La troisième expression est bien homogène à une longueur.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 4. Diffraction des ondes

c. $L_1 = \frac{2\lambda_1 D}{a}$ et $L_2 = \frac{2\lambda_2 D}{a}$; $\frac{L_1}{L_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$.

d. $\lambda_1 = \frac{L_1}{L_2} \times \lambda_2$; $\lambda_1 = \frac{3,4 \times 10^{-2}}{2,1 \times 10^{-2}} \times 405 \times 10^{-9} = 6,6 \times 10^{-7}$ m.

e. Calcul de l'écart relatif :

$$\left| \frac{\text{valeur obtenue} - \text{valeur attendue}}{\text{valeur attendue}} \right| = \frac{6,6 \times 10^2 - 658}{658} = 3,0 \times 10^{-3} = 0,30 \%$$

Cette valeur est compatible avec celle du fabricant.

20. a. Si $\lambda = 400$ nm alors $L = 0,040$ m = 4,0 cm.

Si $\lambda = 550$ nm alors $L = 5,5$ cm.

Si $\lambda = 800$ nm alors $L = 8,0$ cm.

b. Dans le cas de la diffraction de la lumière blanche par une fente, la figure de diffraction obtenue présente une tache centrale blanche (superposition de toutes les lumières colorées visibles) et des taches latérales irisées.

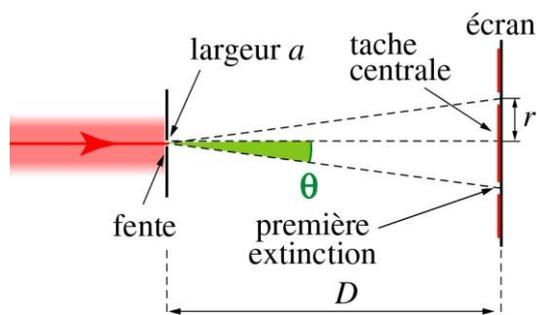
21. a. $\lambda = \frac{v}{f}$; $1450 < v < 1700$ m·s⁻¹ ; $1,5 \times 10^{-3} < \lambda < 1,7 \times 10^{-3}$ m.

b. Si la dimension de l'obstacle devient inférieure à la longueur d'onde alors le phénomène de diffraction devient trop important.

c. Si on souhaite diminuer la longueur d'onde pour détecter des détails plus petits, il faut augmenter la fréquence.

d. Les fréquences utilisées sont de 2,0 MHz pour les organes profonds, de 6,0 MHz pour les petits organes et la pédiatrie, et de 15 MHz pour l'ophtalmologie.

22. a.



b. $\tan\theta \approx \theta = \frac{r}{D}$; $\frac{r}{D} = 1,22 \frac{\lambda}{a}$ donc $r = 1,22 \times \frac{\lambda D}{a}$.

c. Si la longueur d'onde λ augmente alors le rayon r augmente.

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} ; r_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} r_1 ; r_2 = 8,6 \text{ mm}$$

23. 1. a. On observe un étalement des directions de propagation, le phénomène mis en évidence est donc celui de la diffraction.

b. Si la longueur d'onde augmente, la largeur de la tache centrale augmente ; donc on élimine $L = \frac{aD}{\lambda}$.

Si la distance D augmente, la largeur de la tache centrale augmente, on élimine $L = k \frac{\lambda a}{D}$.

L n'est pas proportionnelle à $\frac{1}{a^2}$ car la courbe b n'est pas une droite, on élimine $L = k \frac{\lambda D^2}{a^2}$.

L est proportionnelle à $\frac{1}{a}$ car la courbe c est une droite qui passe par l'origine, on élimine $L = kaD\lambda$.

On retient $L = k \frac{\lambda D}{a}$.

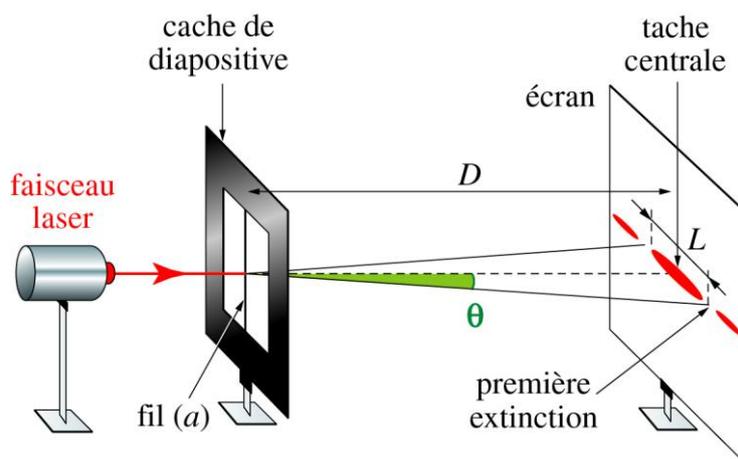
c. On calcule le coefficient directeur de la droite $m = \frac{20 \times 10^{-3} - 0}{1,0 \times 10^4 - 0} = 2,0 \times 10^{-6} \text{ m}^2$.

Or $m = k\lambda D$, donc $k = \frac{m}{\lambda D}$; $k = \frac{2}{633 \times 10^{-9} \times 1,60} = 2$.

2. $a' = \frac{2\lambda D}{L}$. $a' = 1,0 \times 10^4 \text{ m}$.

Exercices de synthèse

24. a.



b. $L = \frac{2\lambda D}{a}$.

c. $\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{L_2}{L_1}$; $\lambda_2 = \frac{L_2}{L_1} \lambda_1$.

d. $\lambda_2 = 5,6 \times 10^2 \text{ nm}$.

25. a. Avec $h_1 = 4\,000$ m, la houle est classée en ondes courtes.

b. $v_1 = \sqrt{\frac{g\lambda_1}{2\pi}}$. $v_1 = 11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. $T = \frac{\lambda_1}{v_1}$. $T = 7,3 \text{ s}$.

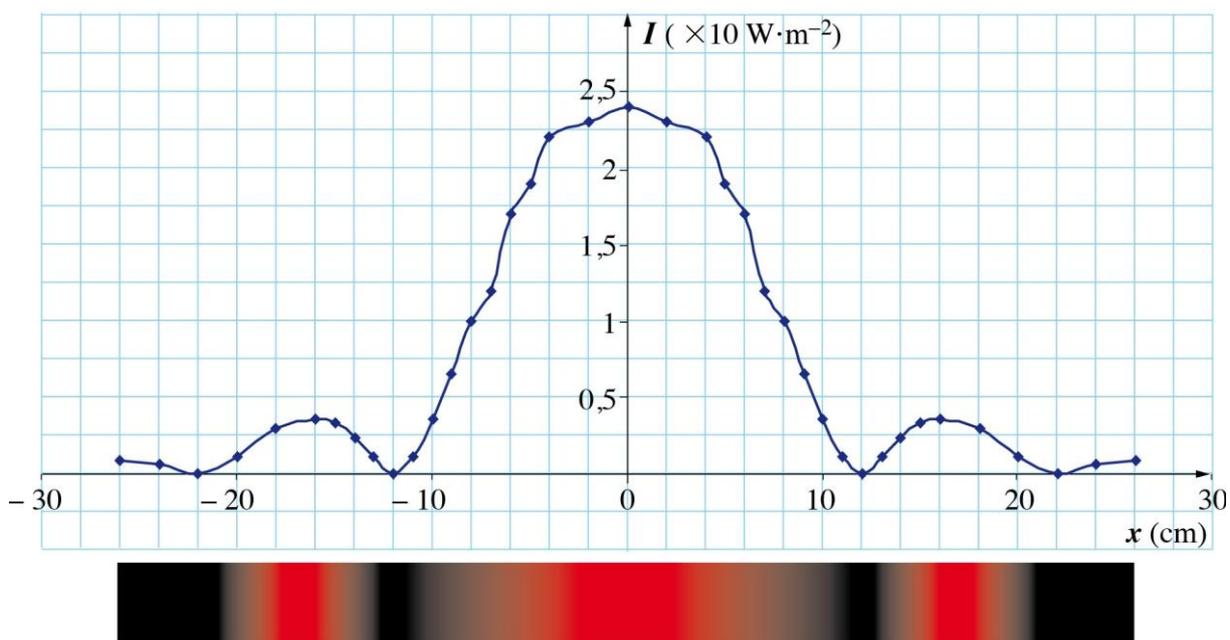
c. $v_2 = \sqrt{gh_2}$. $v_2 = 5,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. $\lambda_2 = v_2 T$. $\lambda_2 = 40 \text{ m}$.

d. Le phénomène de diffraction est observé si a est du même ordre de grandeur ou inférieure à la longueur d'onde. Il ne sera observé que dans le cas où $a = 30 \text{ m}$.

26. a. et b.

X en cm	Intensité courbe rouge $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	Intensité courbe verte $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	Intensité courbe bleue $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	Couleur
0	10	10	10	blanche
5,5	0,15	0	0,15	magenta
6	0,02	0,10	0,15	cyan
7	0,1	0,1	0	jaune

27. a. et b. Tracé de la figure de diffraction avec $L = 24 \text{ mm}$.



On observe que la tache lumineuse centrale concentre presque la totalité de l'intensité lumineuse et qu'elle est deux fois plus large que les taches secondaires.

c. L'écart angulaire de diffraction est l'angle entre la direction de propagation de l'onde en l'absence de diffraction et la direction définie par le milieu de la première extinction :

$$\theta = \frac{\lambda}{a}$$

d. $\theta = \frac{\lambda}{a} = \frac{L}{2D}$; $\theta = 4,8 \times 10^{-3} \text{ rad}$.

28. a. et b. c avec e avec $\alpha < \alpha_{\text{lim}}$; b avec d avec $\alpha = \alpha_{\text{lim}}$; a avec f avec $\alpha > \alpha_{\text{lim}}$.

c. $\alpha_{\text{lim}} = 1,22 \frac{\lambda}{a}$. $\alpha_{\text{lim}} = 1,3 \times 10^{-7}$ rad.

En utilisant la valeur non arrondie pour continuer le calcul, on trouve :

$$\alpha_{\text{lim}} \approx 7,7 \times 10^{-6} = 2,8 \times 10^{-2}$$

d. $\alpha = \frac{2}{3,84 \times 10^5} = 5,2 \times 10^{-6}$ rad $> \alpha_{\text{lim}}$ donc les deux images seront séparées.

29. Matériel : diode laser, fils (ou fentes) de différents calibres a , écran.

Protocole : Diriger le faisceau de la diode laser vers un écran.

Placer sur le trajet du faisceau laser, un fil placé verticalement (ou horizontalement). La distance fil-écran est de 2,0 m.

Mesurer la largeur de la tache centrale de diffraction L pour chaque fil.

Mesurer dans les mêmes conditions, la largeur de la tache centrale de diffraction L' pour le fil d'épaisseur inconnue a' .

Déterminer une relation entre L et $\frac{1}{a}$.

Utiliser cette relation, pour déterminer a' .

30. Exemple de rédaction

Un **microscope acoustique** (le premier date de 1974) utilise des **ondes ultrasonores**, ondes mécaniques longitudinales de fréquences supérieures à 20 kHz.

Il permet d'étudier la structure interne d'échantillons (même ceux en matériaux opaques) sans les endommager. On peut obtenir des images acoustiques d'échantillons de quelques cm² de surface sur quelques dizaines de μm d'épaisseur.

Ces images fournissent des informations sur les propriétés mécaniques et sur la structure des matériaux, cette technique est utilisée dans la **recherche et l'industrie** pour détecter des défauts dans les matériaux mais aussi dans le **domaine médical** pour explorer des échantillons d'os et de cartilage ainsi que dans le domaine **agroalimentaire** pour le contrôle de certains produits.

Le fonctionnement d'un microscope à ultrasons est le suivant : un générateur d'ultrasons convertit un signal électrique en un signal acoustique. Le faisceau focalisé en une petite tache est recueillie par **réflexion** (ou transmission) après interaction entre l'onde incidente et les **irrégularités du matériau**. L'onde est ensuite reconvertie en un signal électrique.

La **résolution spatiale** de l'instrument, c'est-à-dire la dimension des plus petits détails repérables, est de l'ordre de **0,1 μm** pour une onde ultrasonore de fréquence 1 GHz.

La résolution est limitée par le phénomène de **diffraction** qui intervient lorsque la taille des irrégularités est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde de l'onde ultrasonores. L'image obtenue est alors de trop mauvaise qualité pour repérer des défauts de taille inférieure à 0,1 μm .

Chapitre 5 - Interférences

Manuel pages 89 à 108

Choix pédagogiques

Dans ce chapitre, qui suit le chapitre consacré à la diffraction des ondes, figure une compétence expérimentale : « Pratiquer une démarche expérimentale visant à étudier quantitativement le phénomène d'interférence dans le cas des ondes lumineuses ». Avant de proposer cette activité à réaliser en séance de TP avec des fentes d'Young et des diodes laser de couleurs rouge et verte, nous proposons trois autres activités pour découvrir le phénomène d'interférence. En effet, même s'il est très facile d'obtenir une figure d'interférence avec des fentes d'Young, le phénomène est assez difficile à comprendre par un élève non préparé. C'est pourquoi nous proposons une approche en trois temps : une activité documentaire « Extraire et exploiter des informations » pour aborder « avec les mains » la notion de phase et d'opposition de phase, une activité de simulation pour visualiser la superposition en un point de deux ondes sinusoïdales, puis, pour finir, une activité expérimentale utilisant des ondes ultrasonores.

Des animations, des simulations et des vidéos documentaires illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et, certaines d'entre elles, sur les sites Internet compagnon Sirius.

Page d'ouverture

Qu'elle est étrange cette photographie d'ouverture sur les interférences ! Elle fait penser à une vague déferlante, à un liquide qui brûle... Heureusement, la légende indique qu'il s'agit d'un film de savon. Tout le monde a déjà vu les couleurs d'une bulle, mais en dehors de la bulle et du savon, où voit-on apparaître des couleurs qui changent lorsque l'on modifie la direction du regard ? Les CD, les taches d'huile sont des réponses fréquentes. Les ailes de papillon, de paons ou de certaines mouches seront certainement moins citées. D'où proviennent toutes ces couleurs et pourquoi changent-elles, contrairement à la couleur de la plupart des objets qui nous entourent ? Ce chapitre va nous apporter la réponse.

Activités

Activité documentaire 1. Les casques antibruit actifs

Commentaires

Réservés il y a quelques années aux personnes travaillant dans un environnement bruyant (chantier, aéroport...), les casques antibruit actifs sont maintenant à la disposition de tous et on trouve actuellement dans le commerce des casques audio qui intègrent une fonction antibruit pour écouter de la musique en sourdine, sans être dérangé par des bruits extérieurs.

Cette activité est le premier contact des élèves avec la notion de déphasage, indispensable à la compréhension des interférences.

Nous avons choisi dans un premier temps de travailler « avec les mains » comme le préconise le préambule du programme, c'est-à-dire sans formules ni calculs, juste en observant des représentations graphiques.

Cette première activité est aussi l'occasion de travailler la compétence « Extraire et exploiter des informations », très présente dans ce nouveau programme.

Réponses

1. Analyser les documents

a. Les trois éléments d'un casque antibruit actif sont :

- le micro qui permet de capter le bruit intérieur. C'est le bruit extérieur avec une amplitude plus faible car le casque contient de la mousse isolante phonique ;
- le circuit électronique qui analyse le bruit transmis (sous forme de tension) par le micro et génère une « antitension » ;
- le haut-parleur qui diffuse l'antibruit correspondant.

b. La pression de l'air fluctue autour de sa valeur moyenne avec la même fréquence que la vibration de la membrane du haut-parleur. En vibrant, la membrane crée une succession de surpressions et de dépressions.

c. L'émission d'un son en opposition de phase commence par une dépression car les modifications de la pression de l'air provoquée par l'antibruit doivent annuler les variations de la pression provoquée par le bruit lui-même.

Les courbes (1) et (2) sont en « opposition de phase » : quand l'une passe par un maximum, l'autre passe par un minimum. Ainsi, le micro intégré dans le casque provoque une dépression si le bruit extérieur provoque une surpression.

2. Conclure

a. Non, il faut que le bruit reçu au niveau du micro ait la même distance à parcourir jusqu'à l'oreille que l'antibruit créé par le haut-parleur.

Remarque pour le professeur : il n'y a pas de problème dans un casque car la distance qui sépare le micro du haut-parleur est très inférieure à la longueur d'onde des ondes sonores à supprimer.

b. Non, car dans une pièce, le bruit arrive de partout alors que l'antibruit n'est émis que par le haut-parleur. Il y aura des endroits dans la pièce où les deux sons arriveront en opposition de phase et d'autres où ils seront en phase, ce qui augmentera encore le niveau sonore.

c. Même s'il est très rapide, il faut un minimum de temps au circuit électronique pour analyser le bruit. Le son émis par le haut-parleur est donc légèrement en retard et ne correspond pas exactement à l'antibruit. Pour les sons graves (basse fréquence), la différence est plus faible que pour les sons aigus (haute fréquence) dont l'amplitude varie plus rapidement.

Simulation 2. Addition d'ondes

Commentaires

La notion de déphasage ayant été abordée « avec les mains » dans la première activité, nous proposons ici une approche plus « mathématique » en utilisant un tableur. Plus mathématique ne signifie pas qu'on va se lancer dans des calculs qui, de toute façon, ne sont pas au programme de T^{erm} S. Le tableur permet, sans calcul, de visualiser le résultat de la superposition en un point de deux ondes sinusoïdales de même fréquence. C'est donc encore une approche très visuelle que nous proposons. Cette approche n'est pas indispensable pour la suite car les interférences ne font appel qu'à deux situations particulières (phase et opposition de phase) qui se comprennent très bien « avec les mains ».

Réponses

1. Observer

Quand le paramètre φ augmente, la courbe y_2 se déplace horizontalement par rapport à la courbe y_1 .

2. Interpréter

- a. Lorsque le déphasage est nul, les courbes sont superposées.
- b. À chaque fois que φ est un multiple entier de 2π , les deux courbes sont superposées.
- c. Les courbes sont en phase quand elles passent au même instant par leurs valeurs maximales ou minimales. Elles sont en opposition de phase quand l'une est au maximum alors que l'autre est à son minimum.

3. Interpréter

- a. L'amplitude de $y(t)$ augmente, passe par un maximum puis diminue avant d'augmenter à nouveau. Suivant l'amplitude de chacune des fonctions, la valeur minimale de l'amplitude peut être nulle ou non.
- b. L'amplitude est maximale pour $\varphi = 2k\pi$, k étant un entier.
Elle est minimale ou nulle (suivant la valeur des amplitudes) pour :

$$\varphi = (2k + 1)\pi$$

4. Conclure

Les interférences sont constructives lorsque le déphasage est nul ou multiple entier de 2π .
Les interférences sont destructives lorsque le déphasage est un multiple entier impair de π .

Activité expérimentale 3. Interférences avec des ultrasons

Commentaires

Cette étude expérimentale des interférences avec des ultrasons ne peut être proposée aux élèves que si l'une des deux activités précédentes a été faite. En effet, elle nécessite la connaissance du déphasage entre deux signaux. L'intérêt de réaliser des interférences avec des ultrasons réside dans le fait que l'on peut allumer ou éteindre indépendamment les émetteurs et observer ce qui se passe (sur l'écran d'un oscilloscope), manipulation qu'il est impossible de réaliser avec de la lumière.

Sur la photographie d'expérience du manuel, les deux interrupteurs ont été placés juste à côté des émetteurs pour qu'ils figurent sur le cadrage mais il est préférable de les placer assez loin pour pouvoir les manipuler sans perturber le dispositif (réflexion parasite des ondes ultrasonores par exemple).

Dans ces conditions, on vérifie facilement que dans le premier cas, l'amplitude du signal lorsque les deux interrupteurs sont fermés, est égale à la somme des amplitudes des signaux reçus individuellement. De même, et c'est plus surprenant pour les élèves, dans l'étape 2, l'amplitude du signal obtenu avec les deux interrupteurs fermés, est plus petite. On vérifie facilement qu'elle est égale à la différence des amplitudes des signaux reçus individuellement.

Réponses

1. Interpréter

a. Comme nous venons de le voir dans les commentaires, les résultats de la première colonne sont la somme où la différence des résultats des colonnes suivantes.

b. Les signaux arrivent en phase sur le récepteur dans le cas de l'étape 1 et en opposition de phase dans le cas de l'étape 2.

c. Le déphasage ne peut provenir que de la différence des distances entre les émetteurs et le récepteur.

d. $\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340}{40000} = 8,5 \times 10^{-3} \text{ m} = 8,5 \text{ mm}.$

La différence des distances mesurées dans l'étape 2 est de l'ordre de 4 mm soit $\frac{\lambda}{2}$ aux incertitudes près.

e. Quand la différence des distances est égale à λ , un des signaux arrive avec un retard d'une période par rapport à l'autre. Les deux signaux sont donc en phase. On doit vérifier que l'amplitude résultante est maximale.

f. La longueur d'onde est beaucoup plus grande (de l'ordre du mètre), ce qui nécessite d'éloigner considérablement le micro. Dans ces conditions, les phénomènes de réflexion et de diffraction des ondes sonores cachent le phénomène d'interférence sans parler du bruit généré par neuf binômes travaillant simultanément et se gênant mutuellement.

2. Conclure

Ce qui est vrai pour une différence des distances égale à λ l'est aussi pour une différence égale à 2 ou 3λ . On peut donc conclure que les interférences sont constructives si la différence des distances est un multiple entier de la longueur d'onde.

De même, ce qui est vrai pour $\frac{\lambda}{2}$ l'est aussi pour $\lambda + \frac{\lambda}{2}$, $2\lambda + \frac{\lambda}{2}$, c'est à dire pour $(2k + 1)\frac{\lambda}{2}$.

Les interférences sont alors destructives.

Activité expérimentale 4. Interférences lumineuses

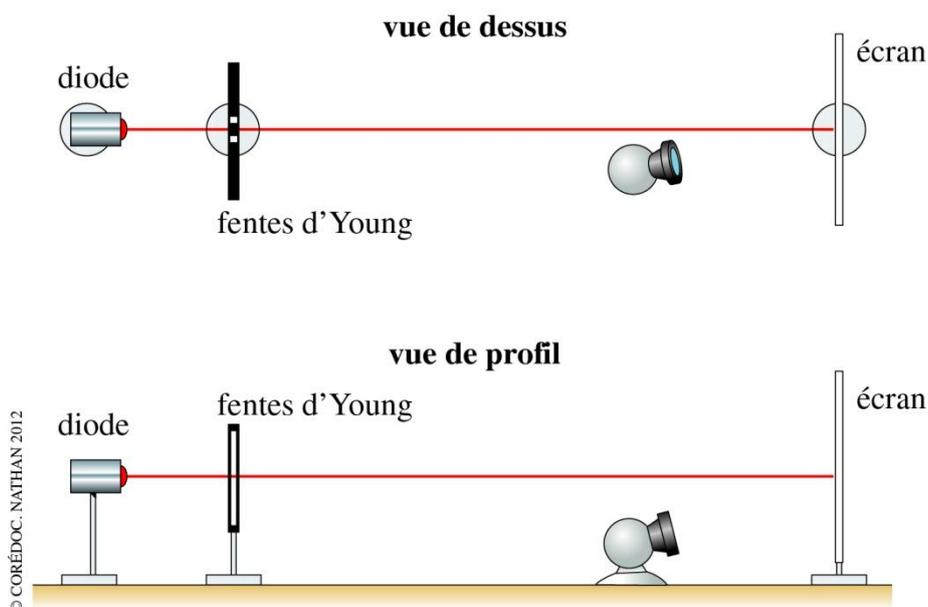
Commentaires

Pour étudier quantitativement le phénomène d'interférences lumineuses (compétence exigible), il faut disposer de diodes laser de couleurs différentes. Tous les lycées sont équipés de diodes laser rouges (650 nm). Il faut donc se procurer des diodes laser vertes et si possible quelques bleues (plus chères). On trouve sur Internet de nombreux sites vendant des diodes laser à très bon prix (prix inférieur à 13 euros par exemple pour une diode laser verte), mais attention, pour utiliser ces diodes en classe en toute légalité, elles doivent avoir une puissance inférieure à 2 mW. Voici par exemple l'adresse d'un site où l'on peut se procurer des diodes laser à bon prix : <http://www.acheterlaser.com/acheter-stylo-laser-vert-1mw.html>

D'autre part, pour vérifier expérimentalement l'expression de l'interfrange, il faut faire des mesures précises, ce qui n'est pas facile car l'interfrange est de l'ordre de quelques millimètres.

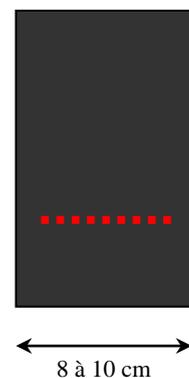
Une solution possible pour améliorer la précision de la mesure consiste à photographier la figure d'interférence à l'aide d'une webcam de bonne qualité (webcam haute définition avec mise au point automatique) ou d'un appareil photo numérique.

Pour cela, placer la webcam dans l'axe du montage mais légèrement au-dessus ou en dessous pour ne pas couper le faisceau laser comme le montre le schéma ci-dessous.



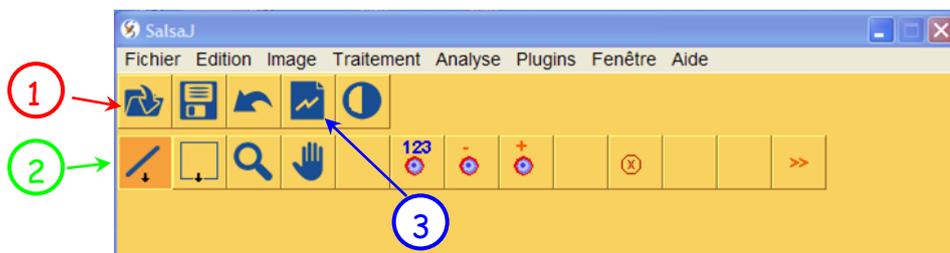
Pour qu'il n'y ait pas saturation de l'image au niveau des franges brillantes de la tache centrale, il faut utiliser un écran noir (type papier Canson[®]). Il n'est pas utile de faire l'obscurité dans la salle.

Découper une bande de papier de 8 à 10 cm de largeur et centrer la figure d'interférence sur cette bande. Prendre une photo en réglant la position (ou le zoom) de la webcam de telle sorte que le champ soit un peu plus large que la bande (il doit y avoir un peu de blanc de chaque côté de l'écran noir pour qu'on puisse étalonner en largeur la figure d'interférence). Ce blanc permet également de faire la mise au point. Il peut être coupé ensuite à l'aide d'un logiciel de retouche d'image mais ce n'est pas indispensable. On peut également tracer deux traits verticaux sur le Canson[®] noir qui serviront de repère. Cette méthode permet d'obtenir une plus grande amplitude pour les franges brillantes lorsque l'on utilise *SalsaJ*.

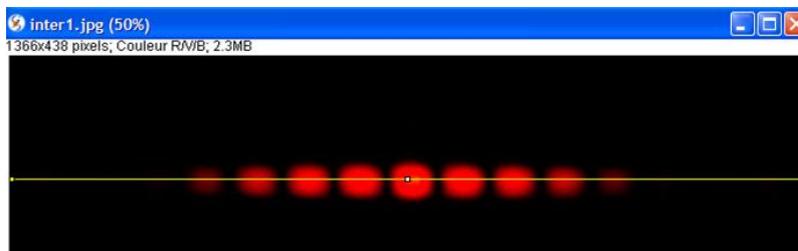


UTILISATION DU LOGICIEL SALSAJ

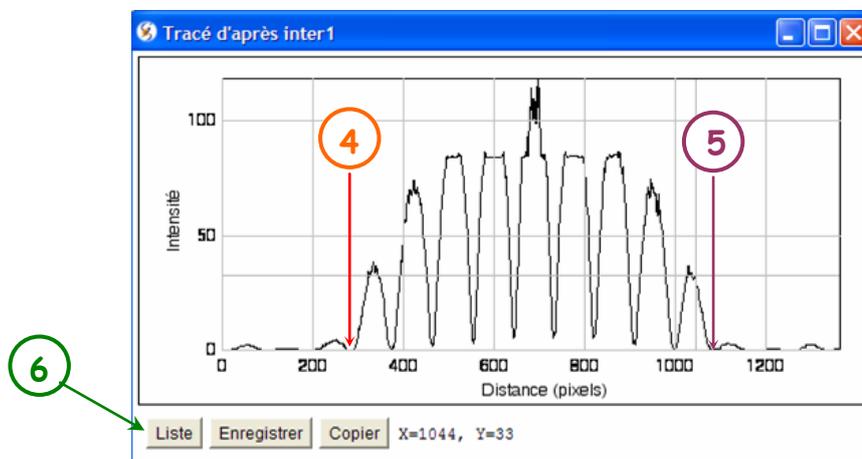
- Ouvrir le logiciel *SalsaJ* en cliquant sur son icône. 
- Ouvrir la photo en cliquant sur la première icône (1).



- Choisir l'outil sélection rectiligne (2) puis tracer un trait horizontal sur toute la largeur de la photo. En appuyant sur la touche shift, la ligne reste horizontale même si on se déplace un peu vers le haut ou le bas.



- Choisir enfin l'outil coupe (3) qui donne l'intensité lumineuse en fonction de la position sur la ligne choisie.



X	Y
1067	7.667
1068	6.333
1069	5.000
1070	4.667
1071	3.333
1072	2.667
1073	2.000
1074	2.000
1075	2.000
1076	1.000
1077	0.333
1078	0.667
1079	0.667
1080	1.000
1081	0.000

- L'axe des abscisses est gradué en pixels mais la largeur de la photo (largeur de la bande noire de papier Canson[®]) étant connue, on peut étalonner cet axe en mm.

Déplacer le réticule avec la souris pour le placer sur la première frange noire de la tache centrale (4). Noter la valeur en pixels écrite en bas puis faire la même chose avec la dernière frange sombre (5). On peut ainsi calculer l'interfrange en pixels puis en mm.

En cliquant sur la liste en bas à gauche de l'écran précédent, on fait apparaître l'intensité lumineuse de tous les pixels. On peut choisir plus facilement celui qui correspond à l'intensité la plus faible.

Réponses

1. Observer

a. Les franges d'interférence sont situées principalement dans la partie commune des taches centrales de diffraction des fentes. On peut observer des franges dans les taches latérales si on photographie la figure d'interférence avec une webcam ou un appareil photo numérique (voir plus haut). L'interfrange dépend de la longueur d'onde de la lumière (il augmente avec la longueur d'onde) et de la distance entre les fentes : l'interfrange est d'autant plus grand que la distance entre les fentes est petite.

b. Voici les résultats obtenus avec les fentes d'Young de Jeulin pour un écran placé à 1,500 m et deux diodes laser : une rouge de longueur d'onde 650 nm et une verte de longueur d'onde 532 nm.

Distance entre les fentes	0,20 mm	0,30 mm	0,50 mm
Laser rouge	4,9 mm	3,3 mm	2,0 mm
Laser vert	4,0 mm	2,7 mm	1,6 mm

2. Interpréter

a. L'interfrange est inversement proportionnel à la distance qui sépare les fentes.

b. L'interfrange est proportionnel à la longueur d'onde.

c. Les mesures effectuées sont en accord avec l'expression proposée, au moins en ce qui concerne λ et a_{1-2} . Pour la distance D , il faudrait faire une série de mesures en modifiant uniquement la distance qui sépare les fentes de l'écran.

d. Plus la distance D est grande, plus l'interfrange est grand, ce qui permet d'avoir une meilleure précision sur la mesure.

3. Formuler des hypothèses et débattre

a. Avec la lumière blanche qui possède une infinité de radiations de couleurs différentes, on peut s'attendre à des hypothèses très diverses !

b. Pour simplifier et lancer le débat, on limite à deux le nombre de radiations : une rouge et une verte. Les élèves, qui viennent de voir que l'interfrange est proportionnel à la longueur d'onde, peuvent imaginer la figure que l'on doit observer.

Il faut pour cela qu'ils se souviennent que l'addition d'une lumière rouge et d'une verte donne une lumière jaune (programme de 1^{re} S, voir corrigé de l'exercice n°16).

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 5. Interférences

5. Expérimenter pour conclure

La figure d'interférence en lumière blanche est assez difficile à réaliser, c'est pourquoi elle n'est pas demandée aux élèves. Le professeur la réalisera au bureau après avoir fait l'obscurité dans la salle.

Remarque : le chapitre 26 offre une occasion de prolonger cette expérience par une étude détaillée d'une figure d'interférence en lumière blanche.

Exercices d'application

5 minutes chrono !

1. Mots manquants

- se modifier
- maximale ; constructives
- opposition ; destructives
- la différence de marche ; constructives
- cohérentes ; déphasage
- interfrange ; d'interférences
- destructives

2. QCM

- De même largeur que les autres franges.
- À n'importe quelle distance des fentes.
- Une seule lampe monochromatique munie d'une fente et un système permettant d'obtenir deux sources secondaires.
- Une frange blanche et des franges irisées.

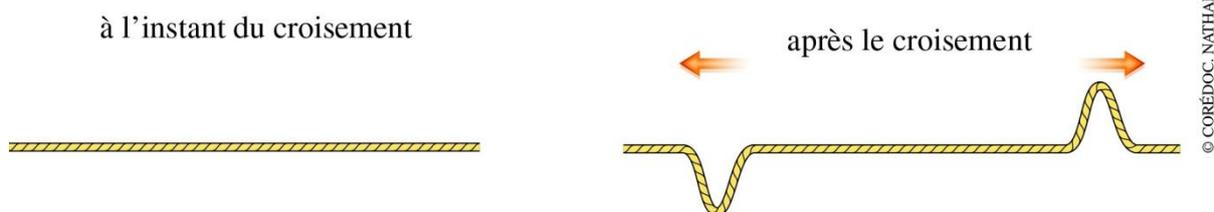
Compétences exigibles

3. a. Les deux perturbations vont se croiser au milieu car la célérité ne dépend pas du sens de propagation.
b. À l'instant où les déformations se croisent, elles ajoutent leurs effets. Elles continuent ensuite sans être modifiées

Premier cas :



Deuxième cas :



Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 5. Interférences

4. a. $\lambda = vT = \frac{v}{f} \Rightarrow \lambda = \frac{340}{4,25 \times 10^4} = 8,00 \times 10^{-3} \text{ m} ; \lambda = 8,00 \text{ mm}.$

b. Les deux émetteurs, branchés sur le même GBF, constituent des sources d'ondes cohérentes qui émettent en phase. Dans ces conditions, on peut observer des interférences dans la partie commune aux deux faisceaux.

c. Les sources émettent sans déphasage. Il y a interférences constructives en un point du milieu de propagation si la différence de trajets entre les sources et ce point n'introduit pas de déphasage, c'est-à-dire si $d_2 - d_1 = k\lambda$ (en appelant d_2 la distance entre le point et E_2 et d_1 la distance entre le point et E_1).

Au contraire, si $d_2 - d_1 = \frac{(2k+1)\lambda}{2}$, les ondes arriveront au point considéré en opposition de phase et les interférences seront destructives.

Points	<i>M</i>	<i>N</i>	<i>P</i>
Distance à E_1 (en mm)	234	252	312
Distance à E_2 (en mm)	226	256	328
$d_2 - d_1$ (en mm)	-8	4	16

Les interférences sont constructives en *M* et en *P* ($k = -1$ et $k = 2$) et destructives en *N* ($k = 0$ et $d_2 - d_1 = \frac{\lambda}{2}$).

5. En mesurant dans chaque cas la largeur de 7 interfranges (pour une meilleure précision), on trouve :

$$7i_R = 32,5 \text{ mm} ; 7i_V = 27 \text{ mm}$$

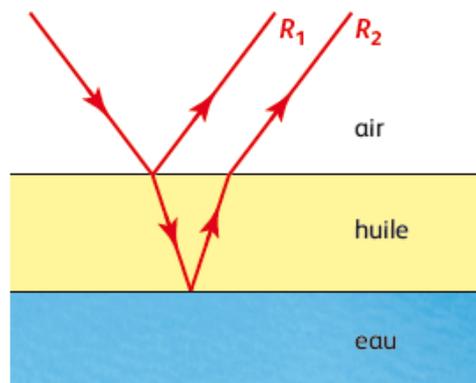
S'il y a proportionnalité entre i et λ , on doit vérifier :

$$\frac{i_R}{i_V} = \frac{\lambda_R}{\lambda_V} \quad \frac{7i_R}{7i_V} = 1,2 \quad \frac{\lambda_R}{\lambda_V} = \frac{650}{532} = 1,18$$

Aux erreurs de mesure près, l'interfrange est proportionnel à la longueur d'onde.

6. a. L'huile ou l'essence qui recouvre la route mouillée forme une fine couche transparente. La lumière se réfléchit à la surface de séparation air-huile et à la surface de séparation huile-eau. Les rayons réfléchis interfèrent. Pour certaines longueurs d'ondes, les interférences sont destructives : la lumière réfléchie n'est plus blanche mais colorée.

b. Quand on baisse ou lève la tête, les rayons qui pénètrent dans l'œil n'ont pas la même inclinaison. La différence de marche entre les deux rayons n'est plus la même (elle est minimale en incidence normale). Les interférences sont destructives pour d'autres longueurs d'onde : les couleurs changent.



7. a. La courbe sur l'écran a une amplitude maximale si les deux ondes ultrasonores arrivent en phase sur le récepteur. Puisqu'elles sont émises en phase, il faut que :

$$D_2 - D_1 = k\lambda$$

b. La plus petite distance entre les deux émetteurs correspond à la plus petite valeur de k non nulle (non nulle car les deux émetteurs ne peuvent pas être au même endroit) donc $k = 1$.

$$D_2 = D_1 + \lambda, \text{ d'une part, et } D_2^2 - D_1^2 = d^2$$

$$(D_1 + \lambda)^2 - D_1^2 = d^2$$

$$\lambda(2D_1 + \lambda) = d^2$$

$$d = \sqrt{\lambda(2D_1 + \lambda)} = \sqrt{8,0 \times (2 \times 200 + 8)} = 57 \text{ mm}$$

c. La courbe sur l'écran a une amplitude minimale si les deux ondes ultrasonores arrivent en opposition de phase sur le récepteur. Puisqu'elles sont émises en phase, il faut que :

$$D_2 - D_1 = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

On peut prendre $k = 0$ si on considère que les émetteurs sont de petites tailles (diamètre de 16 mm).

On obtient alors : $D_2 = D_1 + \frac{\lambda}{2}$.

Il suffit donc de remplacer λ par $\frac{\lambda}{2}$ dans l'expression précédente :

$$d = \sqrt{\frac{\lambda}{2} \left(2D_1 + \frac{\lambda}{2} \right)} = \sqrt{4,0 \times (2 \times 200 + 4)} = 40 \text{ mm}$$

Remarque : dans les deux cas, on peut négliger λ ou $\frac{\lambda}{2}$ devant $2D_1$.

d. Il peut y avoir plusieurs causes expliquant que l'amplitude ne soit pas nulle : l'émetteur 2 est un peu plus loin du récepteur que l'émetteur 1. Le signal est donc un peu plus atténué. D'autre part, il n'est pas tout à fait en face du récepteur et les émetteurs ultrasonores sont assez directifs. Enfin, pour la même fréquence imposée par le GBF, l'amplitude de l'onde émise peut varier d'un émetteur à l'autre.

Compétences générales

8. a. La relation $i = f(D)$ indique que pour une longueur d'onde et une distance entre les fentes données, l'interfrange est proportionnel à la distance D . Le graphe $i = f(D)$ est donc une droite passant par l'origine.

b. Le coefficient directeur de la droite est proportionnel à λ . Il est donc plus petit pour le laser vert (courbe du dessous).

c. Pour $D = 2,20 \text{ m}$, $\frac{i_R}{i_V} = \frac{5}{4} \Rightarrow \frac{\lambda_R}{\lambda_V} = \frac{5}{4} \Rightarrow \lambda_V = \frac{4}{5} \lambda_R = \frac{4}{5} \times 650 = 520 \text{ nm}$

d. La distance entre les deux fentes est donnée par :

$$a_{1-2} = \frac{\lambda D}{i}$$

A.N. : pour $D = 2,20 \text{ m}$, $i_{\text{rouge}} = 5 \text{ mm}$

$$a_{1-2} = \frac{650 \times 10^{-9} \times 2,20}{5 \times 10^{-3}} = 3 \times 10^{-4} \text{ m soit } 0,3 \text{ mm}$$

9. a. La longueur d'onde d'une radiation rouge est comprise entre 600 et 800 nm soit 10^{-6} m pour l'ordre de grandeur.

b.
$$i = \frac{\lambda D}{a_{1-2}} \Rightarrow a_{1-2} = \frac{\lambda D}{i} = \frac{10^{-6} \times 1}{10^{-3}} = 10^{-3} \text{ m.}$$

c. Avec une distance a_{1-2} 10 fois plus grande, l'interfrange est 10 fois plus petit soit 0,1 mm. Dans ces conditions, il est difficile d'observer le phénomène.

10. L'interfrange est proportionnel au produit λD . Si on diminue λ , il faut augmenter D pour que le produit reste inchangé, la distance entre les fentes n'étant pas modifiée.

11. Si on utilise une diode laser pour réaliser la figure d'interférence, la longueur d'onde est connue avec une très grande précision de l'ordre de 10^{-4} .

La distance D de l'ordre de 2 m peut être mesurée au mm près soit une précision de 5×10^{-4} .

C'est l'interfrange qui limite la précision car même en mesurant plusieurs interfranges, on ne dépasse pas une précision de 10^{-2} dans le meilleur des cas.

Exercices de méthode

12. Exercice résolu.

13. a. La dimension d'une grandeur est son expression en fonction des grandeurs de base du système international.

b. Les trois grandeurs sont des longueurs donc :

$$\dim i = \frac{L \times L}{L} = L$$

L'interfrange est bien une longueur : la relation est homogène.

c. Si la relation est homogène, elle n'est pas forcément juste.

La relation $i = \frac{a_{1-2}D}{\lambda}$ est homogène mais elle est fautive.

Si la relation n'est pas homogène, elle est forcément fautive.

d. On peut utiliser l'expression de l'énergie cinétique :

$$\mathcal{E}_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Le coefficient $\frac{1}{2}$ est sans dimension :

$$\dim \mathcal{E}_c = ML^2T^{-2}$$

e. $\dim h = \frac{\dim \mathcal{E}}{\dim v} = \frac{ML^2T^{-2}}{T^{-1}} = ML^2T^{-1}$.

14. a. Il y a interférences constructives si $d_2 - d_1 = k\lambda$, avec k entier.

Calculons le rapport $\frac{\delta}{\lambda}$ en exprimant δ en nm :

$$\frac{\delta}{\lambda} = \frac{2,60 \times 10^3}{650} = 4$$



On trouve $k = 4$: le point A se trouve au centre d'une frange brillante.

b. Utilisons la même méthode qu'à la question précédente :

$$\frac{\delta}{\lambda} = \frac{3,90 \times 10^3}{650} = 6$$

Le point B se trouve donc également au milieu d'une frange brillante.

Dessignons les franges pour déterminer le nombre de franges entre A et B .

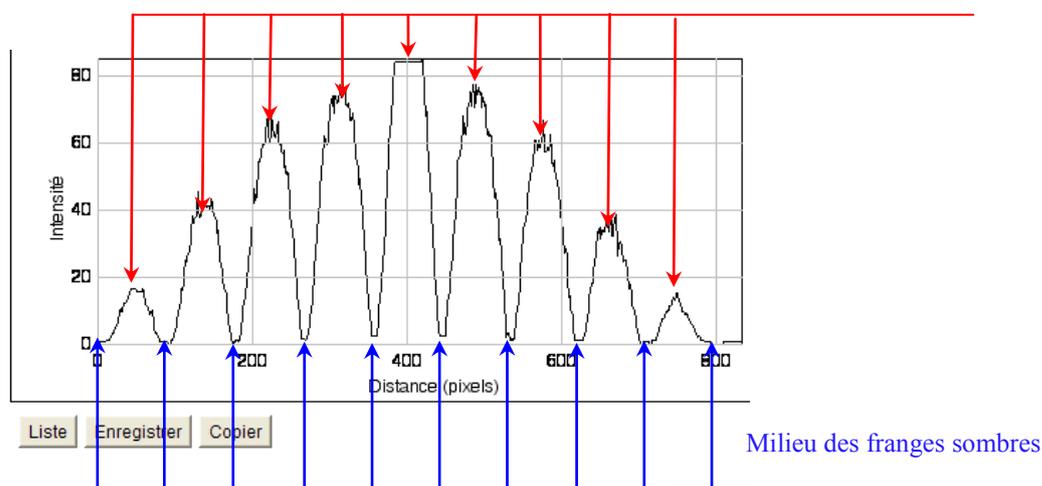
Il n'y a qu'une frange brillante qui correspond à la valeur $k = 5$.

c. Les différences de marche entre S_1 ou S_2 et A ne sont pas modifiées puisque les points A et B sont toujours à la même place. La différence de marche n'introduit pas de déphasage supplémentaire mais comme les sources vibrent maintenant en opposition de phase, les ondes arrivent en opposition de phase en A et B . Ces deux points sont donc maintenant au milieu de franges sombres.

Exercices d'entraînement

15. a.

Milieu des franges brillantes



b. Pour avoir la précision maximale, il faut prendre le plus grand nombre d'interfranges. Sur la totalité de l'image, il y a 9 interfranges pour 800 pixels, ce qui donne :

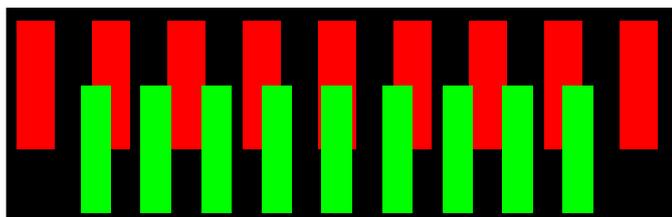
$$\frac{800}{9} = 89 \text{ pixels pour un interfrange}$$

c. 1 000 pixels pour 3 cm

$$89 \text{ pixels pour } x \text{ cm} \quad \Rightarrow \quad x = \frac{89 \times 3}{1000} = 0,27 \text{ cm}$$

16. Les deux radiations de la source de lumière jaune n'interfèrent pas entre elles car elles sont incohérentes. La figure d'interférence observée est donc la superposition de deux figures d'interférence obtenues avec une source de lumière rouge et une source de lumière verte. Les deux franges centrales, rouge et verte sont superposées et donnent une lumière jaune mais l'interfrange dépendant de la longueur d'onde, il n'en est pas de même pour les autres franges.

Dans le cas présent, le rapport des longueurs d'onde est de $\frac{5}{4}$. On peut donc représenter les deux figures d'interférences comme ci-dessous :



La frange centrale est jaune (en synthèse additive : vert + rouge = jaune) irisée de rouge (les franges vertes sont plus étroites que les franges rouges). Les franges latérales sont jaunes avec une bande verte à l'intérieur et une bande rouge à l'extérieur. Il y a ensuite disparition de l'interfrange noir pour une succession de franges rouges et vertes. L'interfrange noir revenant un peu plus loin si le champ des interférences est assez large.

17. a. La lumière blanche est la superposition d'une infinité de radiations monochromatiques dont les longueurs d'onde sont comprises entre 400 et 800 nm.

b. La frange centrale est la frange blanche non irisée.

c. Elle est blanche car sa position ne dépend pas de la longueur d'onde. Toutes les radiations de la lumière blanche ont une frange centrale colorée située au même endroit car la position correspond à $d_2 - d_1 = 0$

d. Pour les autres franges, la position dépend de la longueur d'onde ($d_2 - d_1 = k\lambda$), ce qui explique que les franges soient rouges à l'extérieur et bleues à l'intérieur ($\lambda_B < \lambda_R$).

e. Une lumière monochromatique ne permet pas de savoir où se trouve la frange centrale (celle qui correspond à $k = 0$), puisque toutes les franges brillantes sont identiques.

18. a. Le point O étant sur l'axe de symétrie des deux sources, les distances S_1O et S_2O sont égales et n'introduisent pas de déphasage supplémentaire. Les deux sources étant en phase, la frange centrale est une frange brillante.

b. La première frange sombre correspond à $\delta = \frac{\lambda}{2}$. On obtient donc :

$$x = \frac{\lambda D}{2a_{1-2}}$$
$$x = \frac{680 \times 10^{-9} \times 1,20}{2 \times 0,20 \times 10^{-3}} = 2,0 \times 10^{-3} \text{ m}$$

L'interfrange est deux fois plus grand soit 4,1 mm.

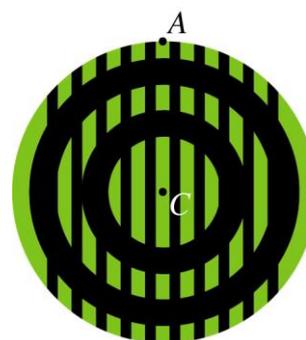
19. a. Les deux trous sont éclairés par la même source de lumière monochromatique. Ils se comportent comme deux sources cohérentes. On peut donc observer une figure d'interférence dans la partie commune des deux faisceaux.

b. Le centre de la figure d'interférence est sur l'axe de symétrie des deux sources. Les distances entre les sources et le point C sont égales. Elles n'introduisent pas de déphasage supplémentaire. La différence de marche est nulle. Comme les sources émettent en phase, le point C est sur une frange brillante.

c. Le point A est dans le plan de symétrie des sources car les sources sont dans un plan horizontal et A dans le plan vertical contenant C . Les distances entre les sources et A sont donc égales et le point A est sur une frange brillante, la même que C puisqu'elle correspond à $\delta = 0$.

d. On peut en déduire que les franges d'interférences sont des droites verticales sur l'étendue de la figure de diffraction.

Remarque : il s'agit en réalité d'arcs d'hyperbole, lieu des points dont la différence des distances à deux points fixes est constante, mais on peut localement les assimiler à des segments de droite.



© COREDOC, NATHAN 2012

20. a. La grandeur qui est connue avec la plus faible précision est l'interfrange car il est de l'ordre de quelques millimètres mesurés au millimètre près. Il est donc connu avec une très faible précision contrairement à la distance D ou à la longueur d'onde de la lumière utilisée.

b. Dans les deux propositions, seule la mesure de l'interfrange est modifiée. La méthode qui donne la meilleure précision sur la distance qui sépare les deux fentes est celle qui donne la meilleure précision sur l'interfrange.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 5. Interférences

Les deux méthodes de mesure sont différentes et l'évaluation des incertitudes également. Dans la première méthode l'incertitude est de type A (incertitude sur une série de mesures) alors que la deuxième méthode, c'est une incertitude de type B (mesure unique).

Le dossier « Mesures et incertitudes » permet de calculer l'incertitude sur la mesure dans chacun des cas.

Dans la première proposition, on réalise une moyenne des N résultats obtenus. C'est mieux que de mesurer un seul interfrange. L'écart type expérimental, σ_{n-1} , est voisin de l'incertitude sur une mesure soit 1 mm. L'incertitude type élargie, avec une dizaine de mesures et un intervalle de confiance de 95 %, est voisin de $\frac{2}{10^{1/2}}$.

Dans le cas d'une mesure unique, l'incertitude est la même que sur chacune des mesures précédentes mais le résultat doit être divisé par 10 puisque l'on mesure la totalité des interfranges. Cette méthode est donc plus précise que la précédente.

21. a. On peut observer un phénomène d'interférence stable à la surface de l'eau car les deux pointes étant solidaires du même vibreur, elles constituent des sources cohérentes.

b. L'axe de symétrie correspond à un maximum d'amplitude car les deux ondes arrivent en phase sur cet axe. En effet, elles ont émises en phase et les distances entre un point de l'axe et les deux pointes étant égales, elles n'introduisent pas de déphasage.

c. Ce sont des arcs d'hyperboles, la constante C notée dans l'énoncé étant un multiple entier de la longueur d'onde.

d. Les distances d_1 et d_2 entre les sources vérifient les deux conditions :

$$d_1 + d_2 = 5\lambda \quad \text{et} \quad d_2 - d_1 = k\lambda$$

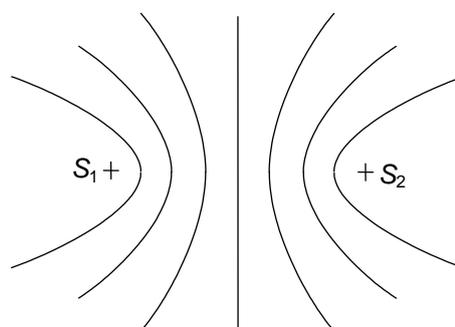
En faisant la somme de ces deux égalités, on obtient :

$$d_2 = (k + 5) \frac{\lambda}{2} \quad \text{avec} \quad d_2 < 5\lambda$$

Il y a donc 9 valeurs possibles de k :

$$-4 ; -3 ; -2 ; -1 ; 0 ; 1 ; 2 ; 3 ; 4$$

Soit 9 franges d'amplitude maximale.



22. a. Elles émettent en phase car elles sont situées à la même distance de la fente source. Il n'y a donc pas de retard d'une source par rapport à l'autre.

b. Le point O étant situé sur l'axe de symétrie, la différence de marche entre les deux ondes est nulle et les interférences sont constructives.

c.
$$i = \frac{\lambda D}{a_{1-2}} = \frac{650 \times 10^{-9} \times 2,0}{0,20 \times 10^{-3}} = 6,5 \times 10^{-3} \text{ m} = 6,5 \text{ mm.}$$

d. Le point M est au centre d'une frange brillante puisqu'il est situé à une distance du point O égale à deux interfranges.

e. Non, les sources n'émettent plus en phase car la source S_2 est placée plus loin de S que S_1 .

f. La source S_2 est en retard sur S_1 car l'onde émise par S met plus de temps à lui parvenir.

g. Les deux sources émettent maintenant en opposition de phase. Comme la différence de marche entre les deux ondes qui arrivent en O est nulle, les interférences sont destructives car les ondes arrivent en opposition de phase.

h. L'interfrange n'est pas modifié car aucune des trois grandeurs qui interviennent dans son expression n'est modifiée.

Si la source est étendue, chaque point constitue une source incohérente par rapport aux points voisins.

Sur l'écran, les différentes figures d'interférence vont se superposer. Elles ont le même interfrange mais elles sont décalées : les franges vont se brouiller et on n'observera pas de figure d'interférence.

23. a. Pour étudier l'influence de la distance qui sépare les fentes d'Young sur l'interfrange, il faut réaliser une figure d'interférence et mesurer l'interfrange pour différentes fentes, sans changer la distance entre les fentes et l'écran.

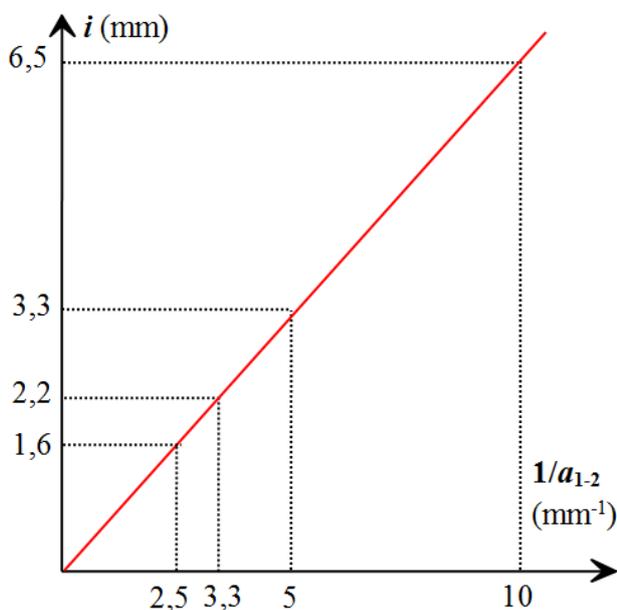
b. Pour obtenir l'interfrange avec le maximum de précision, il faut mesurer la distance qui sépare les franges sombres extrêmes et diviser cette distance par le nombre d'interfranges.

c. Si l'interfrange est inversement proportionnel à la distance qui sépare les fentes, il faut tracer $i = f\left(\frac{1}{a_{1-2}}\right)$.

On doit obtenir une droite qui passe par l'origine.

d. Voir la figure ci-contre. L'interfrange est bien inversement proportionnel à la distance qui sépare les deux fentes.

f. Il faut placer l'écran le plus loin possible car dans ce cas, l'interfrange est le plus grand possible et la précision de la mesure est meilleure.



24. a. $\delta = 2(L_2 - L_1)$ car la lumière fait un aller-retour entre le point B et les miroirs.

b. Si $L_1 = L_2$, la différence de marche est nulle et les deux faisceaux arrivent en phase sur le capteur qui enregistre donc une plage brillante (interférences constructives).

c. La distance L_2 devient $L_2 + d$ et la différence de marche $\delta = 2d$.

d. Si les interférences sont constructives, la différence de marche vérifie la relation $\delta = k\lambda$.

e. Lorsque $\delta = 0$, $k = 0$: c'est la plage brillante de la question **b**.

Pour $\delta = 2d$, $k = 526$ (c'est la 527^e frange brillante puisque l'on a vu défiler 526 franges sombres mais la première correspond à $k = 0$) :

$$\lambda = \frac{2d}{k} = \frac{0,300}{526} = 5,70 \times 10^{-4} \text{ mm} = 570 \text{ nm}$$

Exercices de synthèse

25. a. Oui, les deux HP constituent des ondes cohérentes puisqu'ils sont branchés sur le même GBF. On suppose que les ondes sont émises en phase.

b. Quand l'amplitude de la courbe observée sur l'oscilloscope est maximale, les interférences sont constructives.

On a alors $OS_1 - OS_2 = k\lambda$, avec k entier :

$$(L - \ell) - \ell = k\lambda \quad \text{ou} \quad L - 2\ell = k\lambda \quad (1)$$

c. Soit x la distance dont il faut déplacer le micro pour passer au maximum suivant. Le micro étant déplacé vers la gauche, ℓ devient $\ell + x$ et $L - \ell$ devient $L - (\ell + x)$.

La relation (1) devient : $L - (\ell + x) - (\ell + x) = (k - 1)\lambda$.

(la valeur de k diminue d'une unité lorsque l'on passe au maximum suivant car la différence de marche diminue quand on se rapproche du milieu entre les HP).

$$L - 2\ell - 2x = (k - 1)\lambda = k\lambda - \lambda$$

Comme $L - 2\ell = k\lambda$, on en déduit : $2x = \lambda$ ou $x = \frac{\lambda}{2}$

d. La distance $d = 0,500\text{m}$ correspond à $8x$ d'après l'énoncé, donc : $0,500 = 4\lambda$, ce qui donne :

$$\lambda = 0,125 \text{ m}$$

On en déduit :

$$\lambda = \frac{v}{f} \Rightarrow v = \lambda f = 0,125 \times 2720 = 340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

26. Pour obtenir une figure d'interférence stable à la surface de l'eau, il faut que les deux sources soient cohérentes c'est-à-dire qu'elles gardent un déphasage constant dans le temps. Dans le cas de la figure (b), ce déphasage est nul et il le reste obligatoirement puisque les deux pointes sont sur le même vibreur.

Dans le cas de la figure (a), les vibreurs sont indépendants. Ils vibrent à la même fréquence, mais cette fréquence peut fluctuer un peu par rapport à la valeur affichée. Les deux GBF fluctuant de façon aléatoire, le déphasage varie lui aussi de façon aléatoire et la figure d'interférence n'est pas stable.

Remarque : dans le cas de la figure (b), le GBF fluctue aussi mais cela n'a pas de conséquence sur le déphasage.

27. a. Deux trains d'onde émis successivement par le même atome sont incohérents. On ne peut donc faire interférer deux faisceaux que s'ils proviennent du même train d'onde. La figure d'interférence produite par ce train d'onde a une durée de 10^{-11} s d'où le nom de durée de cohérence.

b. Pendant la durée t , la lumière se déplace d'une longueur :

$$d = ct = 3,0 \times 10^8 \times 1,0 \times 10^{-11} = 3,0 \times 10^{-3} \text{ m} = 3,0 \text{ mm}$$

c. Pour calculer le nombre d'oscillations dans un train d'onde, il faut connaître la période de la radiation jaune du sodium :

$$\lambda = cT \quad \text{soit} \quad T = \frac{\lambda}{c} = \frac{589 \times 10^{-9}}{3,0 \times 10^8} = 2,0 \times 10^{-15} \text{ s}$$

$$n = \frac{\tau}{T} = \frac{10^{-11}}{2,0 \times 10^{-15}} = 5 \times 10^3$$

L'ordre de grandeur du nombre d'oscillations dans un train d'onde est 10^4 .

d. Aux points O et M , les radiations issues des sources S_1 et S_2 proviennent du même train d'onde : les interférences sont visibles. Au point P , le retard de la radiation provenant de la source S_1 est supérieur à la durée de cohérence : les interférences seront brouillées.

e. Chaque train d'onde a sa propre figure d'interférence qui ne dure que 10^{-11} s mais toutes les figures d'interférence sont identiques puisque le déphasage ne dépend que de la position du point sur l'écran. Elles se superposent donc sur l'écran, ce qui rend visible le phénomène qui dure tant que la source est allumée.

f. Pour un même point P , plus les sources sont proches l'une de l'autre, plus le déphasage est petit. On peut donc éloigner davantage le point P du centre O de l'écran sans que la différence de marche soit supérieure à la longueur de cohérence. La largeur de la figure d'interférence sur l'écran est donc plus grande quand les sources sont proches l'une de l'autre.

28. a. Le rayon R_1 subit juste une réflexion. Il a donc une intensité :

$$I_{R1} = 0,02 I$$

Le rayon T_1 subit deux transmissions. Il a donc une intensité :

$$I_{T1} = 0,98 \times 0,98 I = 0,96 I$$

Le rayon R_2 subit deux transmissions et une réflexion. Il a donc une intensité :

$$I_{R2} = 0,98 \times 0,02 \times 0,98 I = 0,019 I$$

Le rayon T_2 subit deux transmissions et deux réflexions. Il a donc une intensité :

$$I_{T2} = 0,98 \times 0,02 \times 0,02 \times 0,98 I = 3,8 \times 10^{-4} I$$

b. C'est entre les rayons transmis que la différence d'intensité est la plus grande. Les rayons réfléchis ont pratiquement la même intensité.

c. Les interférences destructives sont plus marquées lors de la réflexion : l'intensité est pratiquement nulle. On voit donc mieux les couleurs par réflexion. Par transmission, il n'y a pratiquement pas de différence entre les maxima et les minima d'intensité. Les interférences sont très peu contrastées.

29. a. Pour supprimer le reflet, il faut supprimer les rayons réfléchis. Il faut donc des interférences destructives entre les rayons 1 et 2.

b. Pour que l'onde résultante soit nulle, il faut que les deux rayons aient la même intensité.

c. On en déduit : $n = 1,2$.

d. En incidence normale, le rayon 2 a deux fois l'épaisseur de la couche antireflet à traverser et la différence de marche est $\delta = 2ne$.

e. Les interférences doivent être destructives entre les rayons 1 et 2, donc :

$$\delta = 2ne = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

$$2\sqrt{N}e = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

$$e = \frac{(2k + 1)}{2\sqrt{N}} \times \frac{\lambda}{2}$$

La plus petite valeur de e correspond à la plus petite valeur de k , soit $k = 0$.

$$e = \frac{\lambda}{4\sqrt{N}}$$

A. N. :
$$e = \frac{650 \times 10^{-9}}{4\sqrt{1,5}} = 1,326 \times 10^{-7} \text{ m}$$

En tenant compte des chiffres significatifs, la plus petite épaisseur est d'environ $0,13 \mu\text{m}$.

30. Proposition de synthèse de documents

Comme nous l'avons vu en classe de 1^{re} S, la couleur d'un objet provient :

- de la composition de la lumière émise par la source ;
- du comportement de l'objet vis-à-vis de la lumière qu'il reçoit ;
- de la synthèse faite par le cerveau de la lumière captée par les cônes.

Si le texte de 25 ou 30 lignes commence par ce rappel, c'est très bien ! Cela montre que certains élèves ont bien retenu les notions d'optique abordées en 1^{re} S. Mais il ne faut pas pénaliser un élève qui n'en parle pas car dans cet exercice de synthèse, seul le deuxième point (comportement de l'objet face à la lumière) intervient.

La synthèse doit clairement faire apparaître qu'il existe deux origines différentes pour les couleurs :

- Une origine pigmentaire : la couleur est due aux pigments qui absorbent une partie de la lumière qu'ils reçoivent et renvoient donc une lumière colorée (complémentaire de celle absorbée). C'est la couleur pigmentaire la plus répandue puisque les pigments sont présents partout (mélanines, ptérides, caroténoïdes...). Cette couleur est d'origine chimique puisque l'absorption dépend des liaisons chimiques dans et entre les molécules. C'est ce que rappelle le document 1.
- Une origine structurale : dans certains cas (ailes de papillons par exemple), à la couleur pigmentaire se superpose une couleur due à la structure externe de la surface qui renvoie la lumière. Cette couleur est d'origine physique puisqu'elle fait intervenir des phénomènes comme :
 - La diffraction : les couleurs observées sur les ailes de certains papillons (type morpho) ont la même origine que celles observées sur les CD.
 - Les interférences : les couleurs de la nacre par exemple ont la même origine que celles des bulles de savon : interférences des rayons lumineux réfléchis par des couches minces transparentes.
 - On peut également parler de la diffusion Rayleigh, diffusion d'une lumière bleutée provoquée par la présence de microparticules (c'est le bleu du ciel).

On peut noter pour finir que la couleur structurale dépend de l'angle d'observation alors que la couleur pigmentaire n'en dépend pas.

Chapitre 6 – Spectres UV-visible et IR

Manuel pages 109 à 130

Choix pédagogiques

Le cours de ce premier chapitre de chimie (organique) présente tout d'abord les formules topologiques, dont l'emploi généralisé en chimie organique permet de réduire considérablement le temps nécessaire à la représentation des molécules.

Ensuite, les nouvelles classes fonctionnelles, spécifiques au programme de T^{erm} S sont présentées juste avant d'aborder leur nomenclature associée, présentées par analogie avec les règles déjà vues en 1^{re} S. Par manque de place, mais aussi pour éviter l'aspect souvent considéré comme « rébarbatif » de ce domaine, nous nous sommes restreints au strict minimum : pas de rappels des règles de nomenclature abordées en 1^{re} S (les règles de nomenclature sont reprises en totalité dans la fiche méthode 7), et uniquement le traitement du cas des espèces monofonctionnelles relativement simples (les espèces polyfonctionnelles sont traitées au chapitre 25 ainsi que dans la fiche méthode 7).

La suite du cours est consacrée aux spectroscopies d'absorption UV-visible et IR (la spectroscopie de RMN étant présentée au chapitre 7 suivant). Les principes généraux de ces différentes spectroscopies sont donnés avant de s'intéresser à la spectroscopie UV-visible, déjà abordée par les élèves en 1^{re} S.

Nous insistons essentiellement sur l'aspect qualitatif de la spectroscopie UV-visible, qui permet de caractériser une espèce solubilisée dans un solvant donné. Nous rappelons le lien entre la longueur au maximum d'absorption λ_m et la couleur de la solution analysée (l'exercice 26 a pour but de revenir sur le caractère simpliste de ce lien !). La loi de Beer-Lambert ne sert dans ce chapitre qu'à déterminer le coefficient d'absorption molaire $\epsilon_{\max}(\lambda_m)$ au maximum d'absorption afin de caractériser l'intensité de la coloration de l'espèce. L'aspect quantitatif de cette spectroscopie sera essentiellement abordé au chapitre 22.

Enfin, la partie finale du cours traite de la spectroscopie IR, et à nouveau uniquement de son aspect qualitatif, permettant de mettre en évidence la présence de certains types de liaison dans une molécule organique. L'activité 3 est fortement recommandée afin de se familiariser avec la présentation et l'exploitation de ces spectres. Nous avons délibérément choisi de ne pas parler des harmoniques, qui interviennent pourtant fréquemment dans les spectres expérimentaux (notamment l'harmonique de la bande intense relative à la liaison C=O située aux environs de $1\ 750\ \text{cm}^{-1}$, qui apparaît donc aux environs de $3\ 500\ \text{cm}^{-1}$...).

Pour finir, nous mettons l'accent sur l'impact des liaisons hydrogène sur les spectres, comme le recommande le programme. Le modèle mécanique des vibrations des liaisons des molécules est abordé dans l'exercice 4 du dossier Objectif BAC, et un peu dans l'exercice 27.

Des animations, des simulations, des vidéos documentaires et d'expériences illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et, certaines d'entre elles, sur les sites Internet compagnon Sirius.

Le logiciel de simulation présent dans le manuel numérique Sirius Term S spécifique propose une banque de données de spectres IR comprenant les exemples du manuel. Ce logiciel est également téléchargeable à l'adresse suivante : <http://www.chimsoft.com/>

Page d'ouverture

Ces pièces de jeux d'échecs sont en ivoire

Mais même les experts ne parviennent pas toujours à distinguer l'ivoire véritable de matériaux synthétiques l'imitant. Il est bon de préciser que la spectroscopie IR est désormais largement utilisée, grâce notamment à des appareils portatifs : fini l'appareil d'antan qui occupe toute la paillasse et nécessite un ordinateur pour sa gestion.

Activités

Activité documentaire 1. Représenter et nommer des molécules

Commentaires

Nous essayons ici de mélanger révisions et acquisition de nouvelles connaissances sous une forme « ludique ». Il s'agit de relier chaque formule semi-développée à une formule topologique, un nom et une classe fonctionnelle donnée. Nous avons choisi d'introduire deux nouvelles classes fonctionnelles parmi les cinq candidats : celles des alcènes et des amides.

La deuxième partie invite à réemployer ses acquis sur deux exemples, dans un sens (du nom vers la structure) et dans l'autre (de la structure vers le nom).

Réponses

1. Analyser les documents

a. I-4 ; II-5 ; III-3 ; IV-2 ; V-1.

b.

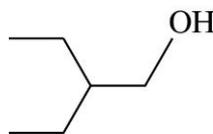


c. On connaît déjà les classes fonctionnelles des alcools (5), des alcanes (2), et des acides carboxyliques (1). Les deux nouvelles classes fonctionnelles sont : celle des alcènes (4 d'après l'indication de l'énoncé) et celle des amides (3 par élimination).

d. 1-b (connu); 2-a (connu); 3-e (vu le nombre d'atomes de carbone); 4-c (par élimination); 5-d (connu)

2. Utiliser la représentation topologique

a. $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}(\text{CH}_2\text{-CH}_3)\text{-CH}_2\text{-OH}$;



b. $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}(\text{CH}_3)\text{-CH=O}$; 2-méthylbutanal.

Activité expérimentale 2. Utiliser un spectrophotomètre UV-visible

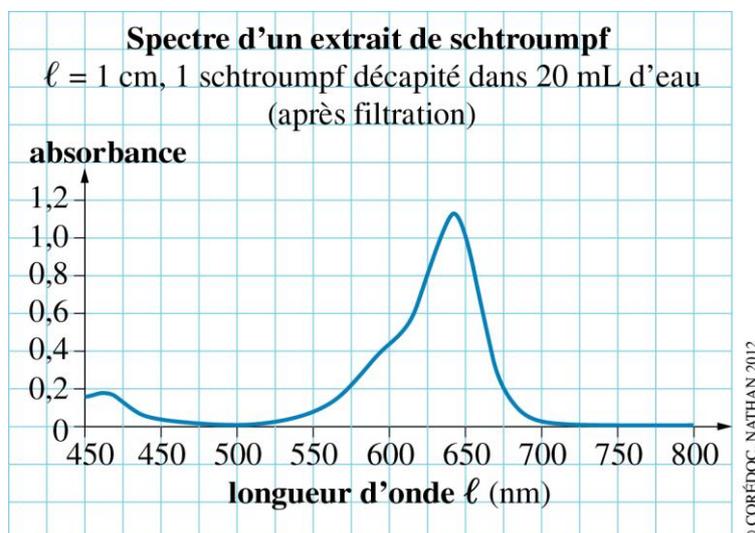
Commentaires

La spectrophotométrie étant déjà connue, nous avons envisagé une démarche d'investigation dont le but est de mettre en évidence les deux aspects, qualitatif et quantitatif, de la spectrophotométrie. Les teintes des différents colorants bleus ne sont en effet pas distinguables à l'œil : seul le spectrophotomètre pourra confirmer l'indication du paquet de bonbon (bleu patenté V : E131, à ne pas confondre avec le bleu patenté VF !). Cette expérience nécessite de posséder ce colorant sous forme solide. En revanche, si vous ne disposez pas des autres colorants alimentaires sous forme solide, vous pouvez toujours utiliser n'importe quel solide menant à une couleur bleue (sulfate de cuivre, bleu de méthylène, etc).

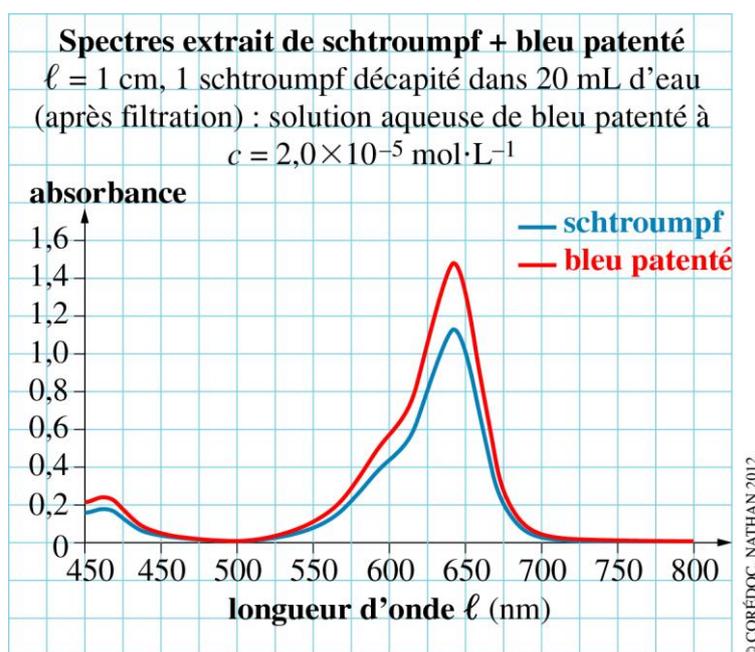
Réponses

1. Formuler des hypothèses et 2. Expérimenter

Il faut tout d'abord extraire le colorant bleu, et seulement le bleu, d'un schtroumpf. Pour cela, il suffit de dissoudre le corps (après décapitation du chapeau si celui-ci est jaune ou rouge...) dans un peu d'eau tiède, par exemple $V_0 = 20$ mL. La solution obtenue est trouble, mais une simple filtration par gravité permet de récupérer une belle solution bleue, et surtout limpide, qui ne nécessite aucune dilution pour en obtenir le spectre, reproduit ci-dessous, qui présente un maximum pour $\lambda_m = 640$ nm à environ $A_{\max, \text{extrait}} = 1,10$ pour une cuve de $\ell = 1,00$ cm d'épaisseur.



Parallèlement, il faut réaliser le spectre du bleu patenté V (et éventuellement celui des autres colorants pour bien voir la différence entre les différents spectres). Pour pouvoir déterminer la masse de colorant contenu dans un schtroumpf, il faut toutefois préparer une solution aqueuse de bleu patenté de concentration connue. Une pesée, suivie d'une (ou de deux) dilutions seront donc nécessaires. Par exemple, on peut prélever 116 mg du sel sodique de bleu patenté ($M = 582,7$ g·mol⁻¹) et le dissoudre dans une fiole jaugée de 2 L, et diluer 5 fois la solution obtenue afin d'obtenir une solution de bleu patenté V à $c_0 = 2,00 \times 10^{-5}$ mol·L⁻¹, dont le spectre présente un maximum pour $\lambda_m = 640$ nm à environ $A_{\max, \text{ref}} = 1,48$ pour une cuve d'épaisseur $\ell = 1,00$ cm.



3. Conclure

La comparaison des spectres du bleu patenté et de l'extrait de schtroumpf permet de confirmer la présence du bleu patenté dans les schtroumpfs. Pour information, on relève les positions suivantes des maxima d'absorption pour différentes solutions bleues :

Colorant	Bleu patenté V	Indigotine	Bleu brillant	Bleu de méthylène	Sulfate de cuivre	Bleu patenté VF
λ_m (nm)	640	608	630	666 (+ épaulement vers 615 nm)	815	632

Pour l'aspect quantitatif, on repart du spectre de référence du bleu patenté V pour en déduire la valeur du coefficient d'absorption maximal du bleu patenté V :

$$\varepsilon_{\max}(\lambda_m = 640 \text{ nm}) = \frac{A_{\max, \text{ref}}(\lambda_m)}{\ell c} = \frac{1,48}{1,00 \times 2,00 \times 10^{-5}} = 7,40 \times 10^4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$$

L'espèce est intensément colorée.

Puis, on en déduit la concentration molaire en bleu patenté V dans l'extrait de schtroumpf :

$$c_{\text{extrait}} = \frac{A_{\max, \text{extrait}}}{\varepsilon_{\max} \ell} = \frac{1,10}{7,40 \times 10^4 \times 1,00} = 1,49 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

Enfin, on remonte à la masse de bleu patenté (contre-ion exclu, cf. définition de la DJA) dans un schtroumpf :

$$m = c_{\text{extrait}} \times V_0 \times M(\text{bleu patenté}) = 1,49 \times 10^{-5} \times 0,020 \times 560 = 1,66 \times 10^{-4} \text{ g}$$

Ainsi, un consommateur de 60 kg ne doit pas ingérer plus de $\frac{60 \times 2,5}{0,166} \approx 900$ schtroumpfs par jour. Cela laisse donc un peu de marge !

Activité documentaire 3. Étude de spectres infrarouges

Commentaires

Le but de cette activité est d'introduire progressivement la lecture de spectres IR, puis d'étudier quels sont les renseignements qu'ils peuvent nous apporter. Nous avons décidé de maintenir la présentation « classique » des spectres en chimie organique, notamment avec le nom des axes en anglais, l'axe des ordonnées en transmittance (nous présentons, dans l'exercice 22, un spectre présenté en absorbance), et l'axe des abscisses « renversé ».

Réponses

1. Observer le document 1

a. La transmittance $T (= \frac{I}{I_0})$ est une grandeur sans dimension, qui peut être présentée sans unité (cas des spectres proposés).

Puisque $0 < T < 1$, T peut aussi être exprimée en pourcentage.

b. Les bandes d'absorption se présentent vers le bas, puisque plus l'absorption est intense, plus la transmission est faible et donc plus la valeur de transmittance est basse.

c. Le nombre d'onde, σ , s'exprime usuellement en cm^{-1} .

d. L'axe des abscisses est orienté vers la gauche : la valeur du nombre d'onde diminue lorsque l'on avance de la gauche vers la droite.

e. Sur chaque spectre, on observe toujours « une » bande (de forme variable) juste en dessous (donc juste à droite...) de $3\,000\text{ cm}^{-1}$.

2. Analyser le document 1

a. Calculons les longueurs d'onde relatives aux nombres d'onde extrêmes :

$$\lambda_{\min} = \frac{1}{\sigma_{\max}} = \frac{1}{4000 \times 10^2} = 2,5\ \mu\text{m} ; \lambda_{\max} = \frac{1}{\sigma_{\min}} = \frac{1}{1500 \times 10^2} = 6,7\ \mu\text{m}$$

Les radiations infrarouge correspondent à des longueurs d'onde supérieures à $0,8\ \mu\text{m}$. La plage de longueur d'onde utilisée ici correspond donc bien à des radiations IR.

b. Dans le pentane (spectre A), il n'y a que des liaisons C-C et des liaisons C-H. Dans le méthoxyméthane, il n'y a que des liaisons C-O et des liaisons C-H. La seule liaison commune à ces deux espèces chimique est donc la liaison C-H, que l'on retrouve par ailleurs dans les trois autres espèces chimiques, et qui se traduit donc par la présence dans un spectre IR d'une bande d'absorption aux alentours de $3\,000\text{ cm}^{-1}$.

c. Présentons le résultat sous forme d'un tableau :

Liaison	C-H	C=O	C=C	O-H (en phase gazeuse)
Nombre d'onde (en cm^{-1})	~3 000	1 750	1 600	3 600
Spectre(s) et bande(s) correspondante(s)	A.a ; B.a ; C.a. D.a. ; E.b.	D.b.	C.b.	E.a.

3. Observer le document 2

a. Sur la plage de nombres d'onde compris entre $1\,500\text{ cm}^{-1}$ et $4\,000\text{ cm}^{-1}$, on ne constate quasiment aucune différence entre les deux spectres, avec deux bandes qui ont une position

commune : une première, assez intense, un peu avant $3\,000\text{ cm}^{-1}$ et la seconde, moins prononcée, aux environs de $3\,600\text{ cm}^{-1}$.

En revanche, sur la plage de nombres d'onde compris entre 400 cm^{-1} et $1\,500\text{ cm}^{-1}$, beaucoup plus riche en bandes d'absorption, les deux spectres diffèrent très nettement (le nombre, les positions et les allures des bandes).

b. On retrouve (une fois de plus) les deux mêmes bandes d'absorption : la première, la plus intense, un peu avant $3\,000\text{ cm}^{-1}$ et la seconde, moins intense, aux environs de $3\,600\text{ cm}^{-1}$.

4. Analyser le document 2

a. σ_{\max} et donc λ_{\min} ne sont pas modifiés (en revanche, $\lambda_{\max} = \frac{1}{\sigma_{\min}} = \frac{1}{400 \times 10^2} = 25\ \mu\text{m}$), on

reste donc dans le domaine de l'IR.

b. La similitude entre les deux spectres du document 2 et le spectre E du document 1 sur la plage de nombres d'onde [$1\,500\text{ cm}^{-1}$; $4\,000\text{ cm}^{-1}$] signifie que, dans cette zone de nombres d'onde, les bandes d'absorption semblent être caractéristiques de certains types de liaisons, et non pas de la molécule étudiée. On retrouve en effet dans tous ces spectres la bande d'absorption relative à la liaison O-H (bande a, aux environs de $3\,600\text{ cm}^{-1}$), et celle relative à la liaison C-H (bande b, un peu en-dessous de $3\,000\text{ cm}^{-1}$).

c. La partie du spectre comprise entre 400 cm^{-1} et $1\,500\text{ cm}^{-1}$ dépend en revanche fortement de la nature de l'espèce chimique. Même deux isomères, qui ont donc une structure chimique relativement semblable, sont donc discernables par spectroscopie IR. Cette partie du spectre IR d'une molécule est caractéristique de cette molécule.

5. Mise en évidence d'une interaction

a. Lorsque l'échantillon est en phase gazeuse, la bande d'absorption caractéristique de la liaison O-H, située aux alentours de 3600 cm^{-1} est relativement fine, et d'intensité relativement faible : elle n'atteint que le quart de la bande d'absorption relative aux liaisons C-H. En revanche, en phase gazeuse, alors que la bande d'absorption relative aux liaisons C-H ne semble pas modifiée, on remarque qu'une bande très large, d'intensité comparable à celle des C-H, intervient, centrée aux environs de $3\,300\text{ cm}^{-1}$ (on ne peut ici, *a priori*, pas dire si elle remplace ou si elle recouvre la petite bande observée en phase gazeuse...).

b. Les élèves ont vu en 1^{re} S que les liaisons hydrogène sont des interactions qui peuvent intervenir entre molécules possédant (entre autres) le groupe hydroxyle. Ces interactions ne sont pas (ou très peu) présentes en phase gazeuse, étant donné l'écart spatial moyen « très grand » entre molécules. En revanche, elles interviennent en phase condensée, et sont responsables de cette « déformation » de la bande d'absorption relative aux liaisons O-H.

Afin d'expliquer cet élargissement, on peut utiliser le modèle de la vibration mécanique par un ressort de constante de raideur k et de masse réduite μ , modèle largement hors programme pour les élèves. Le nombre d'onde d'absorption dépend de la constante de raideur, et mécaniquement, celle-ci dépend de la "force" de la liaison entre les deux atomes impliqués dans la liaison. La force de la liaison O-H dépend de l'implication de l'atome d'hydrogène dans les liaisons hydrogène. Ces liaisons hydrogènes n'étant pas les mêmes pour toute la population des liaisons absorbantes, on observe une dispersion assez large des nombres d'onde d'absorption. Attention à une erreur courante qui consiste à dire que la bande d'absorption est celle de la liaison hydrogène.

Exercices d'application

5 minutes chrono !

1. Mots manquants

- topologique ; ligne brisée
- double
- hydroxyle
- amines
- longueur d'onde ; coefficient

2. QCM

- 3-méthylbutan-2-one.
 - Carbonyle.
 - Esters.
 - Le nombre d'onde.
 - D'identifier la présence de certains types de liaisons.
-

Compétences exigibles

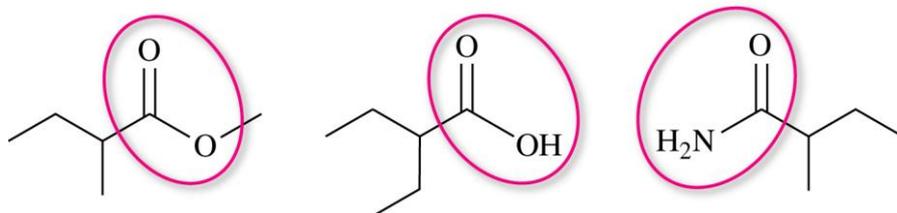
3. a. C₅H₁₀

b. C₆H₁₂O₂

c. C₆H₁₂O₂

d. C₅H₁₁NO

4. a. et b.



c. a est un alcène, b un ester, c un acide carboxylique et d un amide.

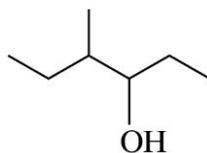
5. a est le 2-méthylbut-2-ène

b est le 2-méthylbutanoate de méthyle

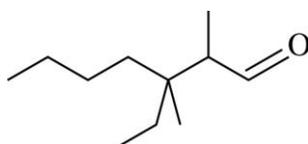
c est l'acide 2-éthylbutanoïque

d est le 2-méthylbutanamide

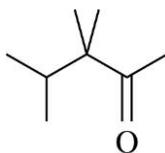
6. a. 4-méthylhexan-3-ol :



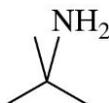
b. 3-éthyl-2,3-diméthylheptanal :



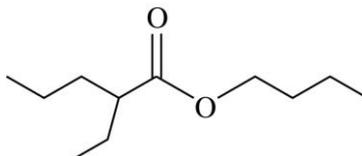
c. 3,3,4-triméthylpentan-2-one :



d. 2-méthylpropan-2-amine :



e. 2-éthylpentanoate de butyle :



7. a. On relève $\lambda_{1,m} = 310 \text{ nm}$, $\lambda_{2,m} = 340 \text{ nm}$ et $\lambda_{3,m} = 530 \text{ nm}$.

b. Seule $\lambda_{3,m}$ correspond à une radiation dans le visible. Les radiations de couleur verte sont donc principalement absorbées (mais aussi un peu le bleu à cause de l'épaule à 500 nm). On en déduit que l'éosine est rouge/rosée en solution aqueuse.

c. On relève $A_{\max} = 1,1$ et donc :

$$\epsilon_{\max} = \frac{A_{\max}}{\ell c} = \frac{1,1}{1,0 \times 1,0 \times 10^{-5}} = 1,1 \times 10^5 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} > 10^3 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$$

L'éosine est donc une espèce fortement absorbante.

8. a. La large bande de très forte absorption aux alentours de $3\ 350 \text{ cm}^{-1}$ correspond à la liaison O-H du groupe hydroxyle. On observe par ailleurs la bande fine de moyenne absorption associée à la même liaison aux alentours de $3\ 600 \text{ cm}^{-1}$.

b. On n'observe plus que la bande fine de moyenne absorption au voisinage de $3\ 600 \text{ cm}^{-1}$, la large bande de très forte absorption a « disparu ». C'est parce que cette bande est liée à la présence de liaisons hydrogène présentes en solution, mais pas en phase gazeuse.

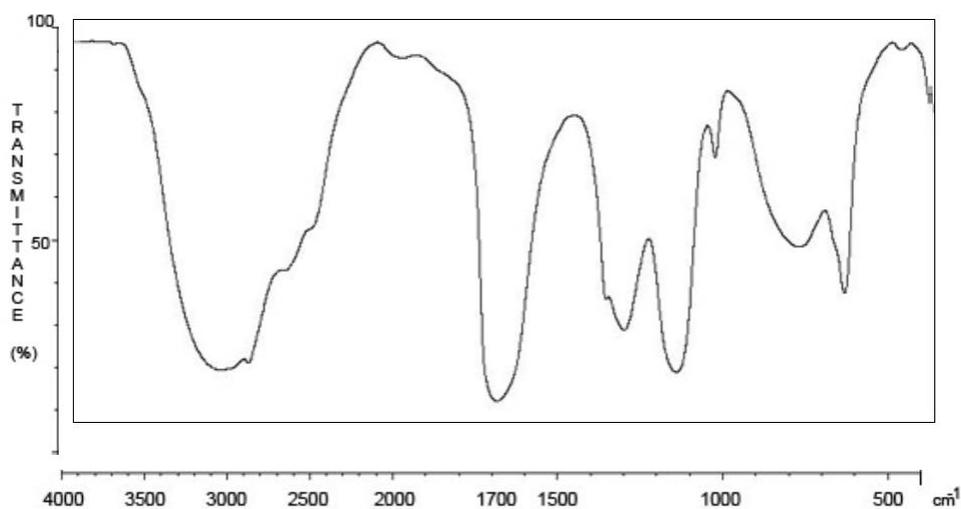
Compétences générales

9. Il faut :

- Peser une masse de tartrazine à l'aide d'une coupelle de pesée et consigner soigneusement la valeur exacte de la masse ainsi prélevée ;
- Verser cette masse dans une fiole jaugée ;
- Rincer la coupelle de pesée tout en récupérant l'eau de rinçage dans la fiole jaugée ;
- Remplir la fiole aux deux-tiers avec de l'eau distillée ;
- Agiter latéralement la fiole jusqu'à dissolution complète du solide ;
- Remplir la fiole jusqu'au trait de jauge ;
- Boucher et agiter la fiole jaugée en la retournant plusieurs fois ;
- Diluer la solution ainsi obtenue (à l'aide de pipettes et de fioles jaugées) jusqu'à obtenir une solution suffisamment claire ($A_{\max} < 1,5$) ;
- Faire le blanc (avec une assistance informatique) avec une cuve d'eau distillée, afin de s'affranchir de l'absorption due aux parois de la cuve et au solvant ;
- Réaliser le spectre (avec une assistance informatique).

10. a. Capture d'écran du spectre IR de l'acide méthanoïque avec le logiciel SPIREX.

Spectre

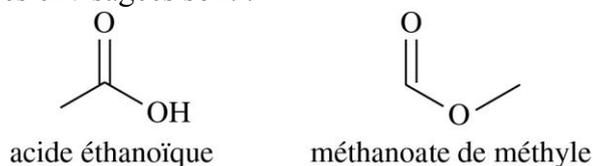


b. Au niveau de la rigueur scientifique, il faut préciser le nom de l'axe des abscisses et l'état physique de l'échantillon.

Au niveau du vocabulaire, il faut parler de classe fonctionnelle et non de « fonctions ».

L'assignation des bandes ne tient pas compte de l'environnement particulier des liaisons : elle est « statique ».

11. a. Les deux molécules envisagées sont :



b. La bande fine et de forte absorption aux alentours de 1710 cm^{-1} , caractéristique de la liaison C=O, permet déjà d'envisager qu'il s'agit d'un acide carboxylique et non pas d'un ester (pour lequel la liaison C=O absorbe des radiations de nombres d'onde compris entre 1735 cm^{-1} et 1750 cm^{-1}).

La bande très large et intense présente au voisinage de 3050 cm^{-1} correspond à la liaison O-H du groupe carboxyle et permet donc de confirmer sans aucune ambiguïté qu'il s'agit de l'acide éthanoïque.

12. a. Il s'agit d'une indication concernant la précision de la verrerie. Lorsque la fiole jaugée est correctement utilisée, la valeur réelle de la mesure a 95 % de chance de se trouver dans l'intervalle $[25,00 - 0,05\text{ mL} ; 25,00 + 0,05\text{ mL}]$ soit $[24,95\text{ mL} ; 25,05\text{ mL}]$.

b. Proposer aux fabricants de ces matériels des améliorations à porter sur les écritures des grandeurs physiques. Il serait plus judicieux que le constructeur de la fiole jaugée indique un volume de $25,00\text{ mL} \pm 0,05\text{ mL}$.

De même, un fabricant de cuve de spectrophotométrie devrait préciser l'incertitude liée à la valeur de la largeur de ses cuves. En admettant (raisonnablement) que cette incertitude soit de $0,01\text{ cm}$, l'indication devrait être : $\ell = 1,00\text{ cm} \pm 0,01\text{ cm}$.

Exercices de méthode

13. Exercice résolu.

14. a. On repère, au-delà de la zone de l'empreinte digitale, une bande fine et de forte absorption au voisinage de $1\,700\text{ cm}^{-1}$, correspondant sans aucune ambiguïté possible à la liaison C=O. La bande plus large aux alentours de $3\,000\text{ cm}^{-1}$ correspond sans aucun doute à la liaison C-H. En revanche, la dernière bande, de faible absorption aux alentours de $3\,500\text{ cm}^{-1}$ peut tout aussi bien être attribuée à la liaison O-H qu'à la liaison N-H.

b. Il faut un renseignement concernant la nature des atomes de la molécule : combien contient-elle d'atomes d'oxygène et/ou d'azote ? L'analyse élémentaire peut apporter ce renseignement.

c. La bande à $3\,500\text{ cm}^{-1}$ correspond donc à la liaison N-H (en phase gazeuse). Et on a dit qu'elle possédait aussi une liaison C=O.

Deux classes fonctionnelles sont définies à partir de la présence d'une liaison N-H : celle des amides et celle des amines. Deux groupes caractéristiques (au programme) contiennent la liaison C=O avec un unique atome d'oxygène : le groupe carbonyle et celui associé aux amides. La molécule étudiée ici peut donc être un amide (et c'est le cas : l'éthanamide), mais il peut aussi s'agir d'une molécule polyfonctionnelle, c'est-à-dire qui appartient à au moins deux classes fonctionnelles : amine + aldéhyde ou amine + cétone.

15. a. Pour diluer cent fois la solution étalon, on prélève, par exemple, 10 mL de cette solution à l'aide d'une pipette jaugée, que l'on verse dans une fiole jaugée de 1 L, préalablement remplie au tiers d'eau distillée. On complète jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée, puis on homogénéise une dernière fois.

Il faut ensuite faire le blanc, en mesurant l'absorbance de la cuve et de l'eau distillée, puis réaliser le spectre de la solution préalablement diluée.

b. Les deux spectres ont exactement la même allure. Seule une homothétie les distingue, ce qui correspond à une dilution différente de l'espèce absorbante. Ce sont donc bien les ions permanganate qui colorent l'eau de Dakin. La couleur rose pâle correspond au violet de la solution d'ions permanganate très diluée. La teinte d'une solution dépend en effet fortement de sa concentration (cf. exercice 26)

c. D'après la loi de Beer-Lambert, pour chaque longueur d'onde :

$$A_\lambda = \varepsilon_\lambda \ell c$$

où c est la concentration molaire en ions permanganate dans la solution, ℓ la largeur de l'échantillon traversé, et ε_λ le coefficient d'absorption molaire associé.

En se plaçant au maximum d'absorption des ions permanganate, pour $\lambda_m = 525\text{ nm}$, on relève pour la solution étalon diluée 100 fois : $A_{\max} = 0,36$.

On en déduit :

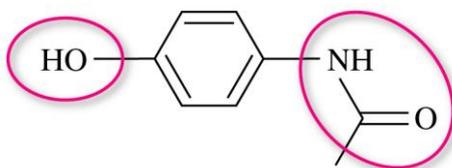
$$\varepsilon_{\max} = \frac{0,36}{\frac{1,0 \times 1,5 \times 10^{-2}}{100}} = 2,4 \times 10^3 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$$

Puisque dans la solution de Dakin, on relève $A'_{\max} = 0,15$; on en déduit la concentration molaire des ions permanganate dans l'eau de Dakin :

$$c' = \frac{A'_{\max}}{\varepsilon_{\max} \ell} = \frac{0,15}{2,4 \times 10^3 \times 1,0} = 6,3 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

Exercices d'entraînement

16. a.



b. -OH est le groupe hydroxyle.

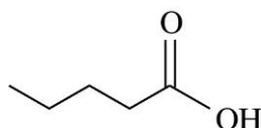
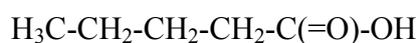
c. Cette molécule appartient à la classe fonctionnelle des amides. En revanche, elle n'appartient pas à la classe fonctionnelle des alcools, mais à celle des phénols du fait de la fixation du groupe hydroxyle sur un noyau aromatique.

d. Non, le paracétamol n'absorbe que des radiations du domaine de l'UV. La solution n'apparaît donc pas colorée.

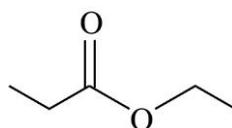
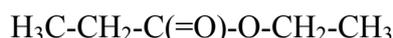
e. La bande à $3\,600\text{ cm}^{-1}$ correspond à la liaison O-H, celle à $3\,400\text{ cm}^{-1}$ à la liaison N-H, celle à $3\,000\text{ cm}^{-1}$ aux liaisons C-H, celle à $1\,750\text{ cm}^{-1}$ à la liaison C=O et enfin celle à $1\,500\text{ cm}^{-1}$ aux liaisons C=C.

f. En phase condensée, il apparaîtra une bande très large et de forte absorption centrée aux alentours de $3\,300\text{ cm}^{-1}$, correspondant aux liaisons hydrogène impliquant à la fois des liaisons N-H et des liaisons O-H entre différentes molécules présentes en solution.

17. a. Acide pentanoïque : classe fonctionnelle des acides carboxyliques.



Propanoate d'éthyle : classe fonctionnelle des esters.



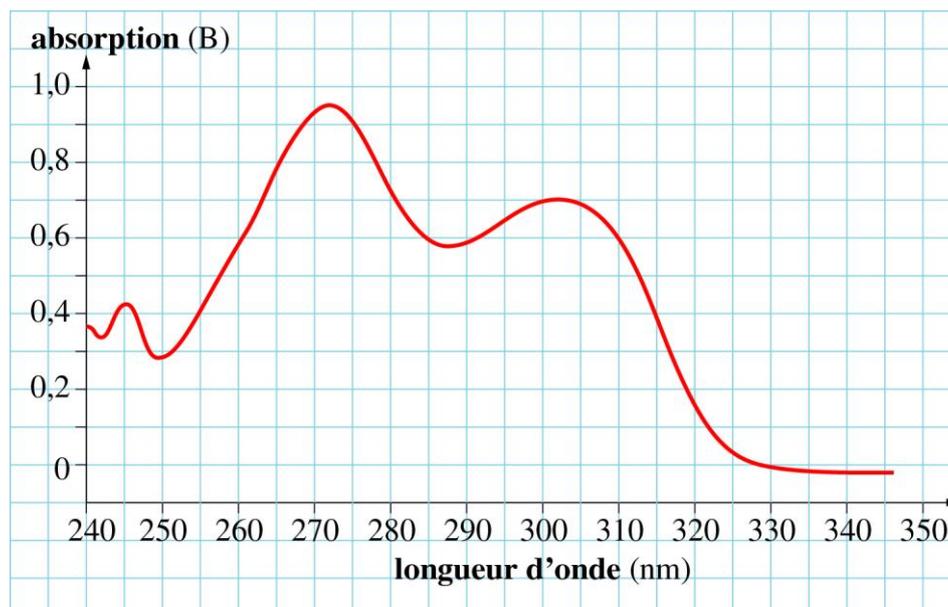
b. Pour les deux molécules, on détermine la même formule brute : $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_2$. Elles sont donc isomères.

c. La présence de la bande caractéristique associée à la liaison O-H, très facilement reconnaissable sur un spectre réalisé à l'état condensé par une bande large et de très forte absorption au voisinage de $3\,300\text{ cm}^{-1}$, permettra de distinguer très facilement ces deux isomères.

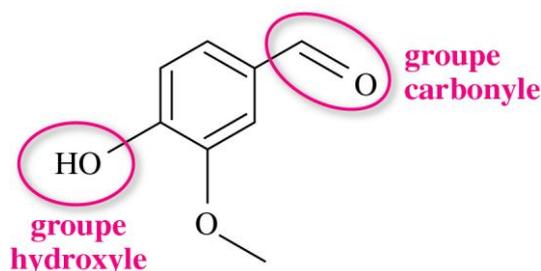
18. a. - Préparation de l'échantillon, suffisamment dilué pour que $A_{\text{max}} < 1,5$.

- Faire le blanc avec le spectrophotomètre avec une cuve remplie du solvant (ici, de l'acétate d'éthyle).

- Réaliser le spectre.



b.



c. Non, la solution de vanilline apparaît incolore sur les images. Il n'y a en effet que 4 doubles liaisons conjuguées dans la molécule. Il en faut plus de 7 pour avoir une molécule absorbant des radiations du visible.

d. On constate sur le spectre obtenu qu'aucune longueur d'onde des radiations du visible n'est absorbée. Cela confirme que la solution n'apparaît pas colorée. Néanmoins, les rayonnements du proche-UV sont absorbés. On relève ainsi $A_{\max} = 0,97$ pour $\lambda_m = 272$ nm. Grâce aux données du film, on détermine la concentration molaire en vanilline :

$$c = \frac{m}{MV} = \frac{6,5 \times 10^{-3}}{152 \times 0,500} = 8,6 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

avec la masse molaire de la vanilline ($\text{C}_8\text{H}_8\text{O}_3$) :

$$M = 8M(\text{C}) + 8M(\text{H}) + 3M(\text{O}) = 152 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

On peut alors remonter à la valeur du coefficient d'extinction molaire au maximum d'absorption, connaissant la largeur de la cuve utilisée $\ell = 1,0$ cm :

$$\varepsilon_{\max} = \frac{A_{\max}}{1c} = \frac{0,97}{1,0 \times 8,6 \times 10^{-5}} = 1,1 \times 10^4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} > 10^3 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$$

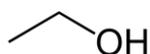
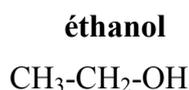
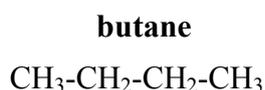
La vanilline est donc une espèce fortement absorbante pour des radiations du proche-UV.

e. On compte 8 atomes de carbone, 8 atomes d'hydrogène et 3 atomes d'oxygène : $\text{C}_8\text{H}_8\text{O}_3$. Son nom dans la base de données est : 4-hydroxy-3-méthoxybenzaldéhyde.

f. La liaison C=O est très facilement repérable par sa bande d'absorption très fine et de forte absorption à $1\,670 \text{ cm}^{-1}$. Les liaisons C=C apparaissent sous la forme d'une double bande à $1\,540$ et $1\,590 \text{ cm}^{-1}$. Les liaisons C-H apparaissent vers $2\,900 \text{ cm}^{-1}$. Et enfin, la large bande associée à la liaison O-H apparaît autour de $3\,100 \text{ cm}^{-1}$.

19. a. Les molécules organiques sont essentiellement constituées d'atomes de carbone et d'oxygène. Les représenter eux-mêmes, ainsi que les liaisons qui les relient, sur des schémas traduisant la structure de la molécule est donc coûteux en temps et en espace. On améliore donc l'efficacité de la représentation des molécules avec les formules topologiques, pour lesquelles seules les liaisons entre atomes de carbone figurent par l'intermédiaire d'une ligne brisée. Les quelques atomes autre que ceux de carbone et d'hydrogène figurent explicitement sur la formule, ainsi que les éventuels atomes d'hydrogène qui leur sont liés.

Exemples :



Outre la facilité d'écriture, les formules topologiques permettent d'identifier plus vite les chaînes carbonées et les groupes caractéristiques.

b. Si la matière apparaît colorée, c'est parce qu'elle absorbe sélectivement certaines radiations de la lumière blanche (comportant l'ensemble des longueurs d'onde du visible) qui nous entoure. Un spectrophotomètre est capable de quantifier cette absorption par la matière colorée en fonction de la longueur d'onde du rayonnement qui la traverse. Le graphique correspondant s'appelle le spectre d'absorption (UV-)visible de la matière.

Lorsque des radiations dans le domaine du visible sont absorbées par l'échantillon, celui-ci apparaît coloré. D'autre part, des radiations de longueur d'onde plus basse (celle du domaine de l'ultraviolet) peuvent aussi être absorbées.

20. a. Plus il y a de doubles liaisons (C=C) conjuguées, plus la longueur d'onde correspondant au maximum d'absorption augmente.

b. En grec : « batho » signifie vers le fond, « chroma » signifie la couleur.

c. Plus le nombre de doubles liaisons conjuguées est important, plus l'énergie des photons absorbés par une molécule contenant la conjugaison est faible, et donc plus la longueur d'onde correspondante est élevée puisque $\mathcal{E} = \frac{hc}{\lambda}$.

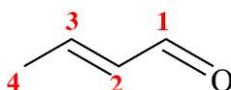
d. On peut extrapoler les résultats du tableau et admettre très raisonnablement que pour un nombre suffisant de doubles liaisons conjuguées, on parvienne à une valeur de λ_m suffisamment grande pour parvenir à une radiation du visible (à partir de 400 nm). Cette limite interviendra vraisemblablement pour environ 7 doubles liaisons conjuguées.

e. On dénombre 11 doubles liaisons doubles C=C conjuguées dans le β -carotène. Cela confirme l'effet bathochrome puisque λ_m (β -carotène) = 450 nm > 400 nm.

f. Puisque le β -carotène absorbe principalement les radiations de couleur bleu, il apparaît donc jaune (et pas rose : le flamant est un piège...). N.B. : en réalité, il est plutôt jaune-orangé...

21. a. Ces deux molécules possèdent un groupe carbonyle. Elles font par ailleurs partie de la classe fonctionnelle des aldéhydes et à celle des alcènes.

b. Dans le but-2-éнал, les deux doubles liaisons C=C et C=O sont conjuguées :



Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 6. Spectres UV-visible et IR

c. D'après les tables : a correspond aux liaisons C-H ; b correspond à la liaison C=O ; c correspond à la liaison C=C.

d. La conjugaison des doubles liaisons déplace les nombres d'onde du minimum des bandes d'absorption vers de plus faibles valeurs. Il s'agit du même effet bathochrome que celui observé en spectrophotométrie UV-visible (cf. exercice 20).

22. a. En ordonnée n'est pas portée la transmittance, mais l'absorbance. Par conséquent, les bandes d'absorption sont orientées avec des maxima d'absorption vers le haut, comme en spectroscopie UV-visible, puisque $T = 10^{-A}$.

b. On reconnaît une bande plutôt large et d'intensité moyenne pour les nombres d'onde proches de 2900 cm^{-1} . Il s'agit de la bande caractéristique des liaisons C-H.

Par ailleurs, on reconnaît la bande assez fine et de forte absorption pour des nombres d'onde voisins de 1700 cm^{-1} , correspondant à des liaisons C=O.

La bande à un peu moins de 1600 cm^{-1} pourrait par ailleurs correspondre à des liaisons C=C (aromatiques) et/ou à des N-H (déformation)...

c. Ce sont visiblement les liaisons C=O qui sont le plus affectées par le vieillissement du bois. Puisque leur absorption décroît dans le temps, c'est que le nombre de ces liaisons diminue dans le temps.

d. Il suffit a priori de relever la hauteur du maximum d'absorbance pour la bande relative aux liaisons C=O pour déterminer l'âge du bois. On procède ensuite par étalonnage, puisque l'on connaît la hauteur relative du maximum pour des âges de référence.

23. a. Le protocole 2, puisque la concentration n'a pas besoin d'être connue avec précision. On gagne ainsi du temps.

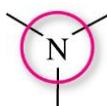
Attention toutefois à suffisamment diluer l'échantillon pour que $0,1 < A_{\max} < 1,5$.

b. Le protocole 1, puisque pour accéder à la valeur de ϵ_{\max} , la concentration en bleu de méthylène doit être connue (avec suffisamment de précision).

D'après la loi de Beer-Lambert :

$$\epsilon_{\max} = \frac{A_{\max}}{\ell c}$$

24. 1. a.

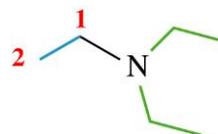


Tout comme les alcools, il existe des amines primaires (une seule chaîne carbonée liée à l'atome d'azote), secondaires (deux chaînes carbonées liées à l'atome d'azote) et tertiaires (trois chaînes carbonées liées à l'atome d'azote).

b. A est une amine tertiaire, B une amine primaire et C une amine secondaire.

c. Il s'agit de la 3-méthylbutan-1-amine.

d. Avec un peu de bon sens, A est la N,N-diéthyléthanamine :



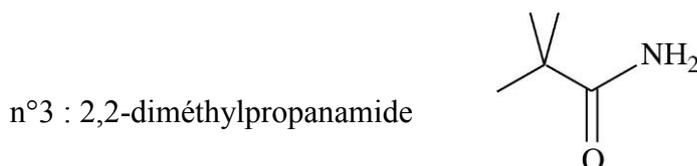
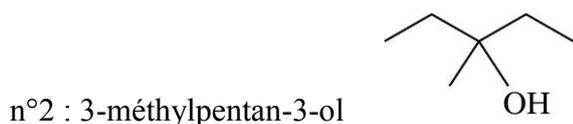
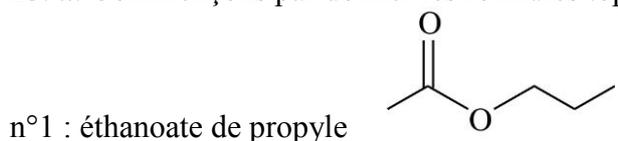
C est la N-méthyl-2-méthylpropan-1-amine :



- 2. a.** Dans le spectre 1, on ne discerne aucune bande d'absorption au delà de $3\,000\text{ cm}^{-1}$. Dans le spectre 2, on discerne une bande double entre $3\,300$ et $3\,400\text{ cm}^{-1}$. Dans le spectre 3, on discerne une simple bande large centrée autour de $3\,300\text{ cm}^{-1}$.
- b.** Pour les spectres 2 et 3, les bandes observées correspondent aux liaisons N-H en phase condensée.
- c.** La seule amine qui ne possède pas de liaison N-H est l'amine tertiaire, dont le spectre est le spectre 1.
- d.** Pour une amine secondaire, il existe deux modes de vibration, donc deux énergies différentes, donc deux nombres d'onde différents pour l'absorption. On n'a pas une seule, mais deux bandes d'absorption très proches pour une amine primaire, contenant le groupe amino-NH₂.
- e.** Le spectre 2 contient une double bande au voisinage de $3\,300\text{ cm}^{-1}$: il s'agit du spectre de l'amine primaire B. Le spectre de l'amine secondaire A est donc le spectre 3.
-

Exercices de synthèse

- 25. a.** Commençons par donner les formules topologiques des différents « candidats » :



b. et c. On identifie sur le spectre une bande (double) de forte absorption aux alentours de $1\,650\text{ cm}^{-1}$. Il s'agit donc a priori de la bande d'absorption d'une liaison C=O, ce qui exclut l'alcool (n°2). Mais d'après les tables, le nombre d'onde ne peut pas correspondre à la liaison C=O d'un aldéhyde (n°4) ou d'un ester (n°1), puisqu'il serait alors compris entre $1\,720$ et $1\,750\text{ cm}^{-1}$. Il s'agit donc de l'amide (n°3).

Par ailleurs, le reste du spectre confirme cette attribution. En effet, la bande fine et intense qui est centrée autour de $1\,620\text{ cm}^{-1}$ correspond à l'absorption d'une liaison N-H (déformation).

Et on repère deux bandes larges et intenses pour $3\,200\text{ cm}^{-1}$ et $3\,400\text{ cm}^{-1}$ qui correspondent à l'absorption des liaisons N-H d'un amide qui possède le groupe fonctionnel -C(=O)NH₂ (cf. exercice 24).

26. 1. a. Non. D'après la photographie, la solution d'ions triiodure apparaît jaune pâle pour la plus faible concentration, et brun foncé pour la plus forte concentration, en passant par l'orange et le rouge pour les concentrations intermédiaires. La couleur perçue d'une solution d'une même espèce dépend donc considérablement de sa concentration.

b. On relève sur le spectre le maximum d'absorbance $A_{\max} = 0,80$ pour une valeur de longueur d'onde $\lambda_m = 350$ nm (environ).

On en déduit par la loi de Beer-Lambert la valeur du coefficient d'absorption molaire au maximum d'absorption :

$$\varepsilon_{\max} = \frac{A_{\max}}{\ell c} = \frac{0,80}{0,50 \times 2,6 \times 10^{-4}} = 6,2 \times 10^3 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} > 10^3 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$$

Les ions triiodure sont donc fortement absorbants, essentiellement dans l'UV, mais aussi en partie dans le visible (cf. question suivante).

c. Le maximum de l'absorption de la solution a lieu pour des radiations de l'UV, mais on remarque que la bande d'absorption « déborde » dans le domaine du visible. Ainsi, le bleu-violet est également absorbé. La couleur complémentaire étant le jaune et le jaune-vert, il s'agit bien de la couleur perçue pour la solution.

d. D'après la loi de Beer-Lambert, l'absorbance est directement proportionnelle, pour chaque longueur d'onde, à la concentration en ions triiodure en solution. Si cette dernière augmente, l'absorbance augmente, et la bande du spectre subit une homothétie vers les plus grandes valeurs d'absorbance.

e. Il n'y a alors pas que les radiations violettes qui sont absorbées, mais aussi le bleu, puis le vert. Ainsi, la couleur perçue évolue également, passant progressivement du jaune à l'orange, puis au rouge. Le brun foncé correspond quant à lui à l'absorption de quasiment toutes les radiations du visible.

2. a. On relève un maximum d'absorption $A_{\max} = 0,12$ pour une longueur d'onde $\lambda_m = 430$ nm. On en déduit, par la loi de Beer-Lambert :

$$\varepsilon_{\max} = \frac{A_{\max}}{\ell c} = \frac{0,12}{1,0 \times 0,025} = 4,8 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$$

b. $\lambda_m = 430$ nm correspond à des radiations de couleur bleu. La couleur complémentaire est donc le jaune.

c. Pour le sulfate en solution aqueuse : $\varepsilon_{\max} = 4,8 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} < 10^2 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$.

Le sulfate de nickel est donc faiblement absorbant dans le visible.

d. On constate clairement que la couleur du sulfate de nickel n'est pas jaune, mais verte ! On n'a pas pris en compte l'existence de l'autre bande du spectre, aux alentours de 700 nm. Elle est certes moins intense, mais elle traduit l'absorption d'une bonne partie des longueurs d'onde correspondant aux radiations de couleur rouge. La couleur perçue de la solution correspond en fait à celle des radiations visibles les moins absorbées (et donc transmises), correspondant au minimum d'absorption, aux alentours de $\lambda = 550$ nm. La solution paraît effectivement verte.

27. *Attention, sur le livre spécimen, la formule topologique présente dans l'exercice 27 correspond en fait à la molécule de l'exercice 28. Cette erreur de mise en page a été corrigée dans le manuel élève.*

Commençons par déterminer les masses réduites des deux liaisons C-H et C-D, avec l'hypothèse simplificatrice de l'énoncé :

$$\frac{1}{\mu_{\text{C-H}}} = \frac{1}{m_{\text{C}}} + \frac{1}{m_{\text{H}}} \approx \frac{1}{m_{\text{H}}}$$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 6. Spectres UV-visible et IR

puisque la masse d'un atome de carbone est environ 12 fois plus grande que celle d'un atome d'hydrogène.

Par ailleurs, $\frac{1}{\mu_{C-D}} = \frac{1}{m_C} + \frac{1}{m_D} \approx \frac{1}{m_D} \approx \frac{1}{2m_H}$, puisqu'un atome de deutérium possède 2 nucléons

(1 p + 1 n) tandis que l'atome d'hydrogène ne possède qu'un seul proton.

Ainsi, $\mu_{C-D} \approx 2 \mu_{C-H}$. Enfin, puisque le nombre d'onde σ est supposé proportionnel à $\frac{1}{\sqrt{\mu}}$, on

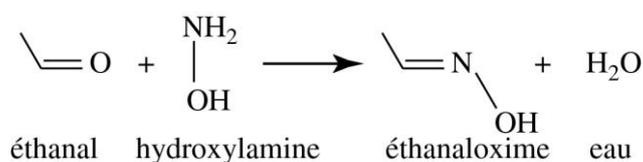
en déduit, par un produit en croix :

$$\sigma_{C-D} = \sigma_{C-H} \times \sqrt{\frac{\mu_{C-H}}{\mu_{C-D}}} = \sigma_{C-H} \times \sqrt{\frac{1}{2}}$$

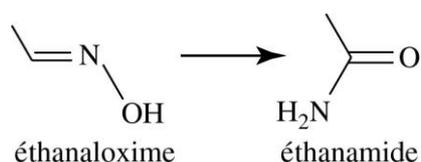
$$\text{A.N. : } \sigma_{C-D} = \frac{2975}{\sqrt{2}} \approx 2100 \text{ cm}^{-1}$$

28. *Attention, sur le livre spécimen, la formule topologique présente dans l'exercice 27 correspond en fait à la molécule de l'exercice 28. Cette erreur de mise en page a été corrigée dans le manuel élève.*

a. L'éthanal a pour formule brute C₂H₄O, l'hydroxylamine NH₃O, et l'éthanaloxime C₂H₅NO. On s'aperçoit donc que pour que la conservation de la matière soit respectée, la production d'une molécule d'éthanolamine s'accompagne de celle d'une molécule d'eau H₂O.



b.



Les deux molécules ont exactement les mêmes atomes, mais ils sont disposés différemment. Ils ont donc même formule brute et sont isomères.

c. Le spectre B est le seul à ne pas faire apparaître la bande caractéristique de la liaison C=O aux environs de 1 700 cm⁻¹, présente dans les spectres A et C. B est donc le spectre de l'éthanaloxime. On y distingue au passage la bande fine (mais intense) caractéristique, en phase gazeuse, de la liaison O-H à un peu plus de 3 600 cm⁻¹.

Sur le spectre A, on distingue deux bandes de faible absorption pour environ 3 450 et 3 550 cm⁻¹. Il s'agit des deux bandes caractéristiques des liaisons N-H en phase gazeuse pour un amide (ou une amine...) qui contient le groupe caractéristique -C(=O)NH₂. Il s'agit donc du spectre de l'éthanamide.

Le spectre C correspond par élimination à celui de l'éthanal.

Remarque : on relève une petite bande au voisinage de 3 440 cm⁻¹ qui correspond à la première harmonique de la bande d'absorption de la liaison C=O à 1 720 cm⁻¹.

29. Exemple de rédaction de synthèse de documents

L'atmosphère est globalement transparente au rayonnement solaire : elle n'absorbe pas le rayonnement émis par le Soleil, correspondant au domaine du visible (l'atmosphère laisse donc passer la lumière...), mais elle absorbe une grosse partie du rayonnement UV grâce à la présence de l'ozone (stratosphérique). Le rayonnement appartenant au domaine du visible, porteur d'énergie, va donc parvenir jusqu'à la surface de la Terre, et (ré)chauffer cette dernière. En « retour », la Terre émet elle-même un rayonnement électromagnétique, dans le domaine de l'infrarouge. Notons que si les choses en restaient là, la température moyenne à la surface de la Terre serait de -22°C ! Mais certains gaz, principalement la vapeur d'eau, mais aussi le dioxyde de carbone, le protoxyde d'azote et le méthane (et d'autres non présentés dans les documents), absorbent ces radiations infrarouges émises par la Terre. L'énergie captée est alors (pour moitié) renvoyée vers la surface de la Terre, qui voit donc un apport supplémentaire d'énergie lui arriver. La conséquence est qu'à l'heure actuelle, la température moyenne à la surface de la Terre est de 15°C , ce qui est favorable à la vie.

Et pour le futur ? Il est logique d'envisager qu'une augmentation de la teneur en gaz à effet de serre dans l'atmosphère aurait pour conséquence d'augmenter l'énergie captée par l'atmosphère, et donc l'énergie renvoyée vers la surface de la Terre, ce qui engendrerait une plus grande température de surface. Mais les mécanismes qui interviennent sont nombreux et les conséquences difficiles à prévoir (augmentation de la vapeur d'eau produite, et donc amplification du phénomène ? meilleure absorption du CO_2 par les végétaux ? ...). Qui vivra verra !

Chapitre 7 - Spectres de RMN

Manuel pages 131 à 151

Choix pédagogiques

Ce chapitre suit immédiatement le chapitre sur les autres techniques spectroscopiques : IR et UV-visible.

Les lycées ne disposant pas de spectromètre de RMN, certains exercices et certaines activités ont recours à l'utilisation d'un logiciel simulant les spectres.

Le BO insiste sur l'interprétation des spectres. Nous avons donc choisi de privilégier cet aspect, sans définir complètement le déplacement chimique dans le cours ; des exercices permettent néanmoins aux élèves les plus à l'aise et aux plus curieux d'aller plus loin dans la notion de déplacement chimique.

Nous avons souhaité aborder le principe physique de la spectroscopie de RMN en première activité pour que les élèves puissent connaître la nature du phénomène mis en jeu. Les activités suivantes permettent de mettre en place la démarche de lecture d'un spectre à partir de spectres de RMN simples.

Des animations, des simulations et des vidéos documentaires illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et, certaines d'entre elles, sur les sites Internet compagnon Sirius.

Un logiciel de simulation de spectres de RMN est disponible dans le manuel numérique Sirius Term S spécifique. Ce logiciel est également téléchargeable à l'adresse suivante : <http://www.chimsoft.com/>

Page d'ouverture

La page d'ouverture présente des images obtenues par IRM : l'imagerie par résonance magnétique est une technique utilisée pour les diagnostics médicaux, et son existence est bien connue du grand public. L'IRM utilise un phénomène d'abord étudié par les physiciens, la résonance magnétique nucléaire (RMN), et les chimistes ont ensuite développé des applications de ces découvertes pour mettre au point un formidable outil d'analyse, en particulier couramment utilisé en chimie organique : la spectroscopie de RMN, qui est l'objet de ce chapitre. Les techniques de RMN sont très évoluées et permettent de tracer des spectres pour lesquels les couplages entre atomes d'hydrogène apparaissent : il s'agit de RMN dite « 2D », présenté en page d'ouverture de thème 2. Ces techniques sont d'une efficacité considérable. Elles permettent de déterminer la formule de molécules pouvant posséder jusqu'à plus de cent atomes de carbone. Notons que les décennies de recherches sur la RMN ont été récompensées par quatre prix Nobel : de physique en 1944 puis en 1952, de chimie en 2002 et de physiologie et de médecine en 2003 (pour le développement de l'IRM).

Découvrir et réfléchir

Activité documentaire 1. Principe physique de la RMN

Commentaires

Cette activité est une première approche, très simplifiée, du principe physique de la RMN. L'analogie avec les aiguilles aimantées permet de se familiariser avec les propriétés magnétiques de certains noyaux. On s'appuie sur les connaissances de 1^{re} S sur la quantification des niveaux d'énergie dans la matière et sur la dualité onde-corpuscule de la lumière.

Réponses

1. Analyser les documents

- La RMN est un phénomène qui met en jeu les propriétés magnétiques de certains noyaux en présence d'un champ magnétique. La RMN implique donc le noyau, et non les électrons de certains atomes.
- Le phénomène de RMN s'observe en présence d'un champ magnétique.
- Le noyau cité dans le texte est le noyau d'hydrogène ^1H . Or, les molécules organiques sont très majoritairement constituées d'atomes de carbone et d'hydrogène. Une spectroscopie s'appuyant sur les propriétés de noyaux d'atomes d'hydrogène (^1H) semble donc particulièrement adaptée aux molécules organiques.

2. Interpréter

- La différence d'énergie entre les deux états possibles du noyau d'hydrogène ^1H est donnée par :

$$\Delta\mathcal{E} = k \times B_{\text{appareil}}$$

Pour passer d'un état d'énergie à l'autre, un noyau d'atome d'hydrogène ^1H doit absorber un photon transportant le quantum d'énergie :

$$\Delta\mathcal{E} = h\nu$$

On en déduit :

$$h\nu = k \times B_{\text{appareil}}$$

soit

$$\nu = \frac{k \times B_{\text{appareil}}}{h}$$

A.N. :

$$\nu = \frac{2,82 \times 10^{-26} \times 4,70}{6,63 \times 10^{-34}} = 2,00 \times 10^8 \text{ Hz} = 200 \text{ MHz}$$

Cette radiation appartient au domaine des ondes électromagnétiques radio.

- D'après le texte, la fréquence de résonance d'un noyau dépend du champ magnétique du spectromètre utilisé, ce qui rend difficile les comparaisons entre les mesures effectuées avec des appareils différents.
- La relation précédente montre que ν est proportionnel au champ magnétique de l'appareil de mesure. On peut donc diviser ν par B_{appareil} pour obtenir une grandeur qui ne dépend pas de l'appareil de mesure.
- Le champ magnétique créé par un spectromètre de RMN va de 2 T à 26 T. Les spectromètres utilisés actuellement dans les laboratoires de recherche en chimie organique créent des champs d'environ 5 T.

Les spectromètres de RMN les plus perfectionnés créent des champs jusqu'à 26 T, mais ces appareils sont très peu nombreux dans le monde.

Les champs magnétiques créés par les spectromètres de RMN sont très intenses, et sont donc susceptibles de perturber fortement le fonctionnement d'un stimulateur cardiaque (contenant entre autres une pile et un module électronique), un grand nombre de composants électroniques étant sensibles à la présence d'un champ magnétique. Les laboratoires de RMN sont donc interdits aux personnes munies de stimulateurs cardiaques.

Il existe cependant désormais des stimulateurs cardiaques dont les composants électroniques ne sont pas sensibles à la présence d'un champ magnétique (matériaux non ferromagnétiques), mais ils sont encore assez rares. Les personnes les portant peuvent fréquenter un laboratoire de RMN, mais surtout subir un examen médical par IRM.

Source : <http://www.larecherche.fr/content/actualite-technologie/article?id=27367>

Activité documentaire 2. Première lecture d'un spectre de RMN

Commentaires

Cette activité propose d'emblée un spectre de RMN du noyau d'atome d'hydrogène (couramment appelé « spectre de RMN du proton ») : l'observation de l'axe des abscisses permet d'introduire une nouvelle grandeur, liée à la fréquence de résonance, mais dont la définition ne sera pas explicitée. Tous les noyaux des atomes d'hydrogène d'une même molécule n'ont pas forcément le même déplacement chimique, ce qui rend intéressante la spectroscopie de RMN pour avoir des informations sur la structure d'une molécule.

Dans un premier temps, une démarche guidée permet d'établir le lien entre la structure d'une molécule et des observations simples faites sur son spectre de RMN du proton (à la fois sur les signaux et sur la courbe d'intégration). Dans un second temps, la même démarche peut être appliquée à d'autres exemples de spectres pour en déduire l'influence de l'électronégativité d'un atome sur les signaux.

Réponses

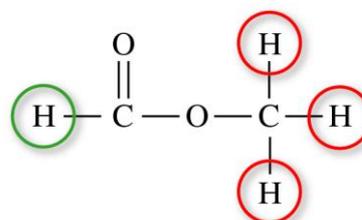
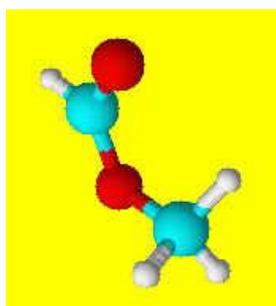
1. Observer les documents

a. L'axe des abscisses est orienté de droite à gauche.

b. $h_a = 1,5 \text{ cm}$ et $h_b = 0,5 \text{ cm}$, donc $\frac{h_a}{h_b} = 3$.

2. Exploiter le spectre

a.



Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 7. Spectres de RMN

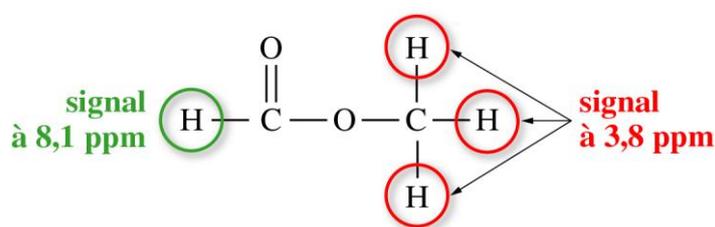
Les trois atomes d'hydrogène entourés en rouge sont équivalents : ils ont le même environnement chimique, puisque l'on peut passer de l'un à l'autre par une simple rotation autour d'une liaison C–O.

L'atome d'hydrogène entouré en vert n'a pas d'équivalent dans la molécule.

Il y a donc deux groupes d'atomes d'hydrogène équivalents : l'atome d'hydrogène (lié à l'atome de carbone du groupe caractéristique) entouré en vert d'une part, et les trois atomes d'hydrogène du groupe méthyle d'autre part.

b. Ce repérage est cohérent avec le nombre de signaux du spectre. Il y a autant de signaux sur le spectre (deux ici) que de groupes d'atomes d'hydrogène équivalents (deux aussi ici).

c. La hauteur du saut de la courbe d'intégration est proportionnelle au nombre de noyaux correspondants. Or, la hauteur du saut le plus grand (à 3,8 ppm) est le triple de celle du saut le plus petit (à 8,1 ppm). Le signal à 3,8 ppm correspond donc à trois noyaux d'atomes d'hydrogène équivalents (ceux du groupe méthyle) et le signal à 8,1 ppm correspond à l'atome d'hydrogène lié à l'atome de carbone du groupe ester.

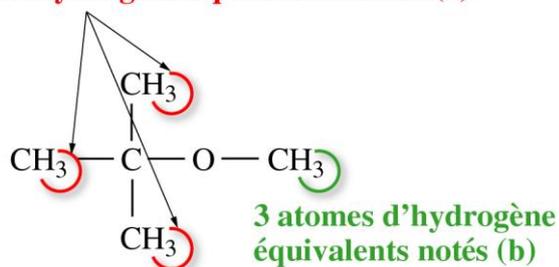


3. Pour aller plus loin

a. Dans le 2,2-diméthylpropane comme dans la N,N-diméthylméthanamine, tous les atomes d'hydrogène sont équivalents.

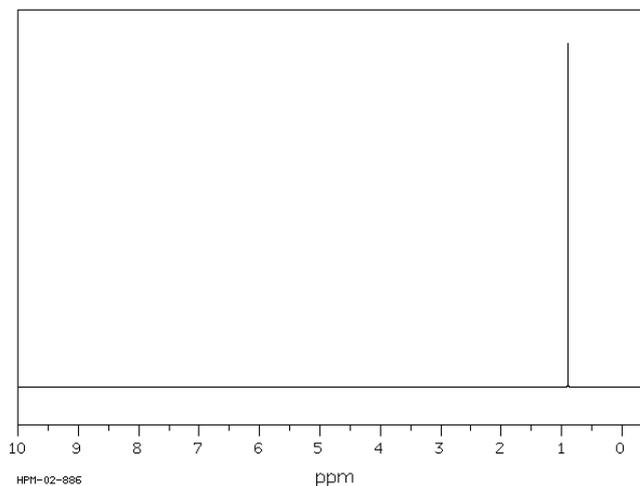
Dans le 2-méthoxy-2-méthylpropane, il y a deux groupes d'atomes d'hydrogène équivalents :

9 atomes d'hydrogène équivalents notés (a)

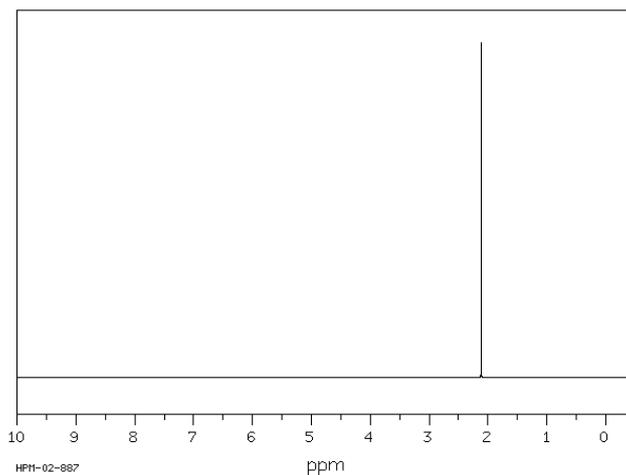


Ce repérage est cohérent avec le nombre de signaux observés sur chaque spectre : un seul signal pour le 2,2-diméthylpropane et la N,N-diméthylméthanamine, et deux signaux pour le 2-méthoxy-2-méthylpropane.

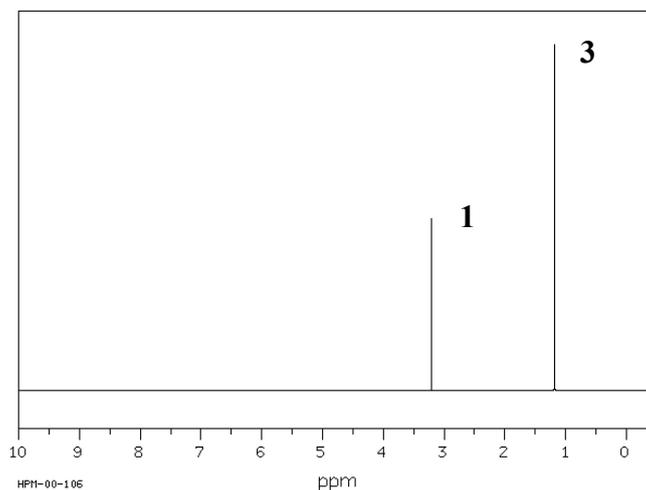
2,2-diméthylpropane :



N,N-diméthylméthanamine :



2-méthoxy-2-méthylpropane :



La mesure de la hauteur des sauts de la courbe d'intégration montre que le signal à 1,2 ppm correspond à trois fois plus de noyaux d'atomes d'hydrogène que le signal à 3,1 ppm. Le signal à 1,2 ppm correspond donc aux noyaux des atomes d'hydrogène notés (a), et celui à 3,1 ppm aux (b).

b. Le spectre du 2,2-diméthylpropane fait apparaître un signal vers 1 ppm, celui de la N,N-diméthylméthanamine un signal vers 2 ppm, et l'un des signaux du 2-méthoxy-2-méthylpropane est au-delà de 3 ppm.

Or, le 2,2-diméthylpropane ne comporte que des atomes de carbone et d'hydrogène, tandis que la N,N-diméthylméthanamine comporte (en plus des atomes de carbone et d'hydrogène) un atome d'azote et le 2-méthoxy-2-méthylpropane un atome d'oxygène.

Conclusion : la présence d'un atome électro-négatif dans la molécule donne sur le spectre un signal à un déplacement chimique d'autant plus grand que cet atome est électro-négatif.

Dans le spectre du 2-méthoxy-2-méthylpropane, on remarque que les noyaux notés (b) ont un déplacement chimique plus grand que ceux notés (a), plus éloignés de l'atome d'oxygène que les (b). La plus ou moins grande proximité d'un atome électro-négatif a donc aussi un rôle sur le déplacement chimique d'un noyau.

Activité documentaire 3. Multiplicité d'un signal sur un spectre

Commentaires

Cette activité présente le spectre de RMN d'une molécule, et fait observer dans un premier temps que les signaux peuvent avoir des structures différentes. On met en évidence par la suite le lien entre la forme du signal et la structure de la molécule.

Réponses

1. Exploiter les documents

a. Les sauts de la courbe d'intégration à 1,3 et à 2,0 ppm ont des hauteurs égales (1,2 cm). La hauteur du saut pour le signal à 4,1 ppm est inférieure (0,8 cm) : le signal à 4,1 ppm correspond donc à un groupe d'atomes d'hydrogène équivalents moins nombreux que ceux des autres signaux. On en déduit que le signal à 4,1 ppm correspond aux deux noyaux d'atomes d'hydrogène notés (b).

b. Le signal à 4,1 ppm comporte quatre pics. On peut donc l'appeler « quadruplet ». Le signal à 1,3 ppm, qui comporte un seul pic, est un singulet.

c. Les groupes d'atomes d'hydrogène (b) et (c) sont considérés comme voisins selon cette définition.

d. Les seuls atomes d'hydrogène qui n'ont pas de voisins sont ceux qui sont notés (a) : ce sont eux qui correspondent au singulet. Le signal à 2,0 ppm correspond donc à la résonance des noyaux d'atomes d'hydrogène notés (a). Le signal à 4,1 ppm ayant déjà été attribué, on en déduit que le signal à 1,3 ppm correspond aux noyaux des atomes d'hydrogène (c).

2. Interpréter la structure fine des signaux

a.

Atomes d'hydrogène	notés (a)	notés (b)	notés (c)
Déplacement chimique de leurs noyaux	2,0 ppm	4,1 ppm	1,3 ppm
Nombre de pics dans le signal	1	4	3
Nombre d'atomes d'hydrogène équivalents voisins	0	3	2

b. Nombre de pics du signal = nombre d'atomes d'hydrogène voisins + 1.

Remarque : chaque noyau joue le rôle d'un petit champ magnétique qui peut s'additionner (↑) ou se retrancher (↓) au champ créé par le spectromètre.

1 ^{er} noyau d'atome d'hydrogène voisin des atomes d'hydrogène (c)	↑	↑	↓	↓
2 ^e noyau d'atome d'hydrogène voisin des atomes d'hydrogène (c)	↓	↑	↑	↓
Bilan	↑↓	↑↑	↓↑	↓↓

On remarque que quatre situations sont possibles, mais deux ont le même bilan : ↑↓ et ↓↑.

Les noyaux des atomes d'hydrogène (c) peuvent donc être situés dans trois champs magnétiques d'intensités différentes : trois fréquences de résonances, et donc trois déplacements chimiques sont donc possibles, ce qui explique la structure du signal sous la forme de trois pics.

De plus, le bilan commun à deux situations différentes ↑↓ et ↓↑ est deux fois plus probable que chacun des deux autres (↑↑ ou ↓↓), ce qui explique que le pic central soit deux fois plus intense que chacun des deux autres pics.

Activité documentaire 4. La spectroscopie de RMN au service de la biologie

Réponses

1. Exploiter le document

- a. C'est la mécanique quantique qui permet de modéliser le phénomène de RMN.
- b. La spectroscopie de RMN « donne accès à la structure atomique des molécules, c'est-à-dire à leur formule développée et à l'agencement de leurs atomes dans l'espace ». Les chimistes organiciens s'en servent quotidiennement pour identifier les produits qu'ils synthétisent.
- c. La spectroscopie de RMN est aujourd'hui couramment utilisée par les biologistes pour obtenir des informations sur la structure tridimensionnelle des protéines, mais aussi sur des réactions chimiques mettant en jeu ces protéines. La RMN permet aussi de déterminer la structure atomique de matériaux comme les verres ou le béton.

2. Rédiger une synthèse

La spectroscopie de RMN permet d'étudier des protéines, des acides nucléiques à des concentrations relativement faibles (de l'ordre de la millimole par litre). La mise au point de techniques de RMN multidimensionnelles a permis de corrélérer les fréquences de résonance de plusieurs noyaux et de résoudre les ambiguïtés liées aux superpositions des signaux sur les spectres.

Les progrès effectués par les physiciens et les chimistes dans le domaine de la RMN ont donc été, entre autres, mis au service de la recherche en biologie : la spectroscopie de RMN a permis d'élucider la structure tridimensionnelle d'un grand nombre de protéines. Désormais, les chercheurs utilisent aussi la RMN pour caractériser la fonction biologique des protéines dans les processus cellulaires mais aussi les interactions chimiques entre plusieurs protéines ou entre une protéine et une autre espèce (comme un ribosome dans le cas de la traduction d'un ARN messager en protéine).

Source : <http://www-dsv.cea.fr/dsv/la-dsv/toute-l-actualite/en-direct-des-labos/role-de-la-flexibilite-dans-les-interactions-proteine-proteine-faibles-l-apport-de-la-rmn>

Exercices d'application

5 minutes chrono !

1. Mots manquants

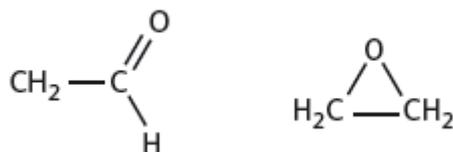
- le déplacement chimique
- équivalents
- proportionnelle
- quatre

2. QCM

- Il y a deux groupes d'atomes d'hydrogène équivalents. On observe deux signaux sur le spectre, et le nombre de signaux est égal au nombre de groupes de protons équivalents dans la molécule étudiée.
 - Sont plus proches des atomes de chlore et d'oxygène que les protons donnant le signal à 1,24 ppm. Plus un noyau d'atome d'hydrogène est proche d'atomes électronégatifs, plus son déplacement chimique est grand.
 - Un quadruplet. Ce signal est formé de quatre pics.
 - Deux protons. Le signal comporte 3 pics. D'après la règle des $(n + 1)$ -uplets, les protons donnant ce triplet ont donc $(3 - 1) = 2$ protons voisins.
 - $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-(C=O)-Cl}$. Dans cette molécule, on a bien trois protons ayant deux protons voisins et donnant un triplet, et on a aussi deux protons ayant trois protons voisins et donnant ainsi un quadruplet. La formule $\text{CH}_3\text{-(C=O)-CH}_2\text{-Cl}$ ne convient pas : aucun proton n'a de protons voisins, son spectre de RMN ne ferait apparaître que des singulets. La formule $\text{CH}_3\text{-CH=CCl-OH}$ ne convient pas non plus, puisque cette molécule comporte trois groupes de protons équivalents (et non deux).
-

Compétences exigibles

3. a. Il y a deux formules semi-développées correspondant à la formule brute $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$:



b. Le signal à 9,79 ppm correspond ici à un proton lié à un groupe carbonyle. La molécule étudiée est donc l'éthanal $\text{CH}_3\text{-CH=O}$. Le déplacement chimique des protons de l'autre molécule serait compris entre 3,1 et 4,0 ppm d'après la table simplifiée de déplacements chimiques.

Remarque : en fait, on pouvait conclure sans la table de déplacements chimiques. Des deux molécules possibles, l'éthanal est la seule qui possède deux types de protons ; dans l'autre molécule, tous les protons sont équivalents et donneraient donc lieu à un seul signal.

4. a. Il y a un seul signal, donc un seul groupe de protons équivalents. Autrement dit, tous les protons de la molécule sont équivalents.

b. Les atomes d'hydrogène liés à un même atome de carbone (engagé uniquement dans des liaisons simples) sont équivalents entre eux : les trois protons de chaque groupe méthyle sont équivalents entre eux.

De plus, les deux groupes méthyle CH_3- sont symétriques l'un de l'autre par rapport à un plan comportant l'atome d'oxygène de la molécule : tous les atomes d'hydrogène de la molécule sont donc équivalents.

5. a. Le spectre comporte trois signaux : il y a donc trois groupes de protons équivalents dans la molécule, ce qui est cohérent avec la formule de la molécule : $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{OH}$.

b. Le saut de la courbe d'intégration pour le signal vers 1 ppm est trois fois plus grand que celui pour le signal vers 5,5 ppm : le signal à 1 ppm correspond donc aux trois protons du groupe méthyle CH_3- et le signal à 5,5 ppm correspond au proton du groupe hydroxyle $-\text{OH}$. On en déduit que le troisième signal (vers 3,5 ppm) correspond aux deux protons de $-\text{CH}_2-$. On vérifie que le saut correspondant au signal à 3,5 ppm est deux fois plus grand que celui à 5,5 ppm : le signal à 3,5 ppm correspond donc aux deux protons de $-\text{CH}_2-$.

6. a. Le signal vers 1 ppm est un triplet, et celui vers 3,5 ppm est un quadruplet.

b. Les protons du triplet ont comme voisins $3 - 1 = 2$ protons équivalents entre eux, et les protons du quadruplet ont comme voisins $4 - 1 = 3$ protons équivalents entre eux.

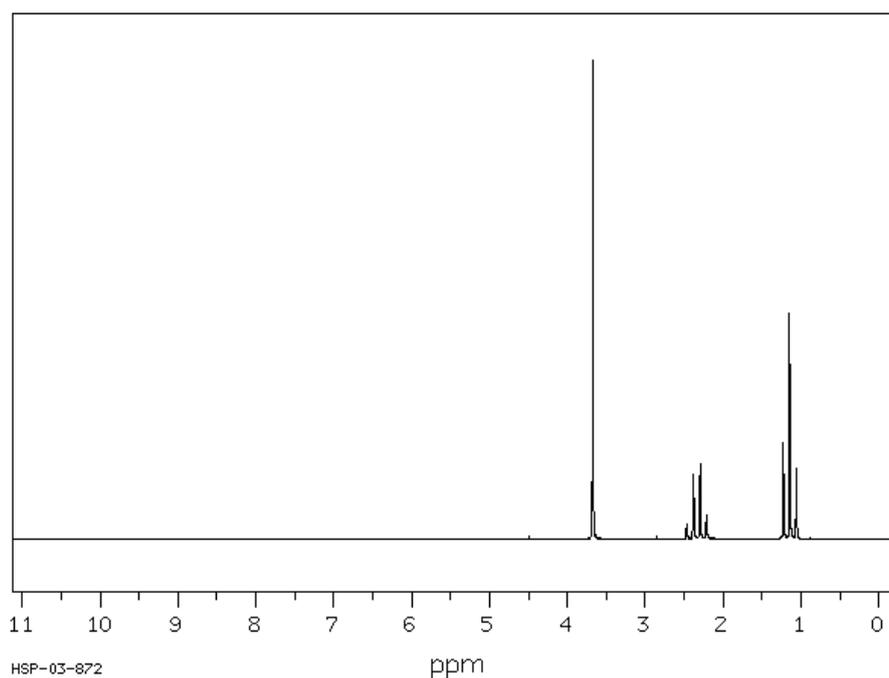
Ceci est cohérent avec la présence d'un groupe éthyle CH_3-CH_2- dans l'éthanol : les protons de CH_3- ont comme voisins les deux protons de $-\text{CH}_2-$, et les protons de $-\text{CH}_2-$ ont comme voisins les trois protons de CH_3- .

7. a. Les trois protons du signal à 1,15 ppm ont deux protons voisins : le signal à 1,15 ppm a donc $2 + 1 = 3$ pics, c'est un triplet.

Les trois protons du signal à 2,32 ppm ont trois protons voisins : le signal à 2,32 ppm a donc $3 + 1 = 4$ pics, c'est un quadruplet.

Le signal à 3,67 ppm correspond à des protons n'ayant pas de protons voisins : le signal à 3,67 ppm est donc un singulet.

b.



Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 7. Spectres de RMN

Pour que le spectre soit complet, il faut aussi tracer la courbe d'intégration.

Les signaux à 1,15 ppm et 3,67 ppm correspondent chacun à trois protons : les sauts correspondant dans la courbe d'intégration ont donc la même hauteur.

Le signal à 2,32 ppm correspond à deux protons : le saut de la courbe d'intégration à 2,32 ppm est donc $(\frac{3}{2}) = 1,5$ fois plus petit que les deux autres sauts.

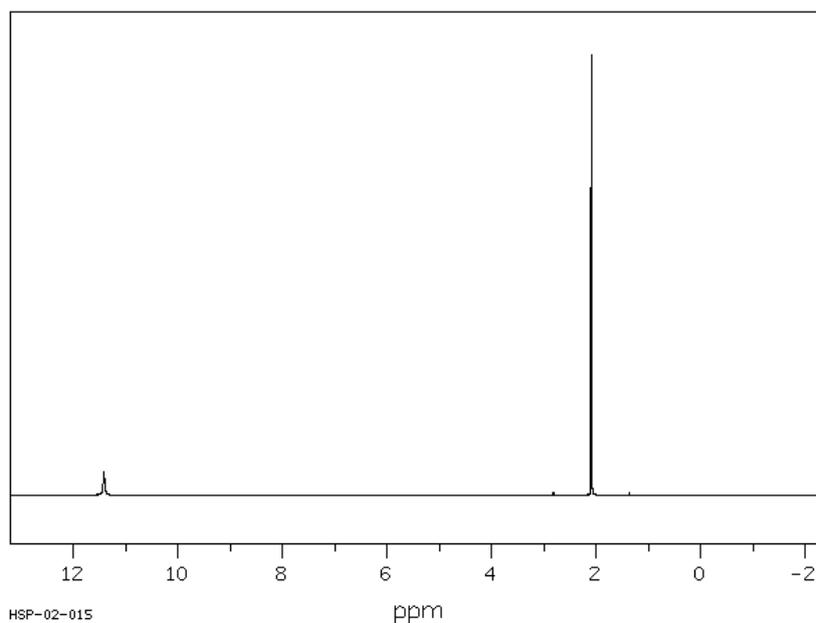
8. a. $\text{CH}_3\text{-(C=O)-OH}$: pas de protons voisins, donc uniquement des singulets.

$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-NH}_2$: les protons de $\text{CH}_3\text{-}$ ont deux voisins : les protons de $\text{-CH}_2\text{-}$, qui ont eux-mêmes 5 protons voisins, les trois protons du groupe méthyle $\text{CH}_3\text{-}$ et les deux protons du groupe amino. Le spectre de RMN du proton présentera donc plusieurs multiplets.

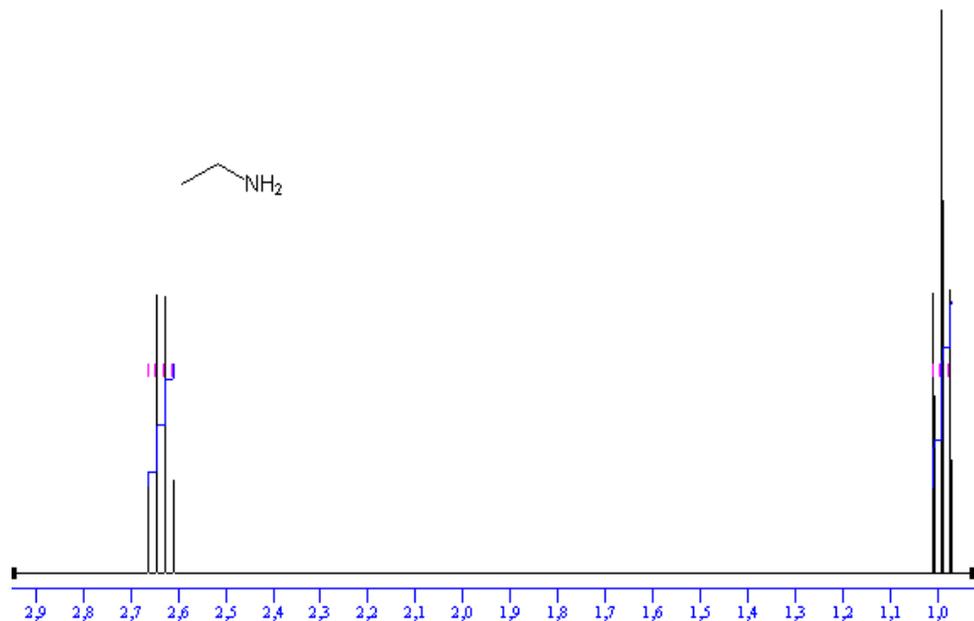
$\text{Br-CH}_2\text{-CH}_2\text{-Br}$: tous les protons sont équivalents, on observera un unique singulet.

$\text{CH}_3\text{-CHCl-CH}_3$: les 6 protons équivalents des deux groupes $\text{CH}_3\text{-}$ ont un proton voisin : celui de -CHCl- . De même, le proton de -CHCl- a 6 protons équivalents entre eux comme voisins. Le spectre présentera donc deux multiplets.

b. Le spectre de RMN de $\text{CH}_3\text{-(C=O)-OH}$ présente bien seulement des singulets (deux) :

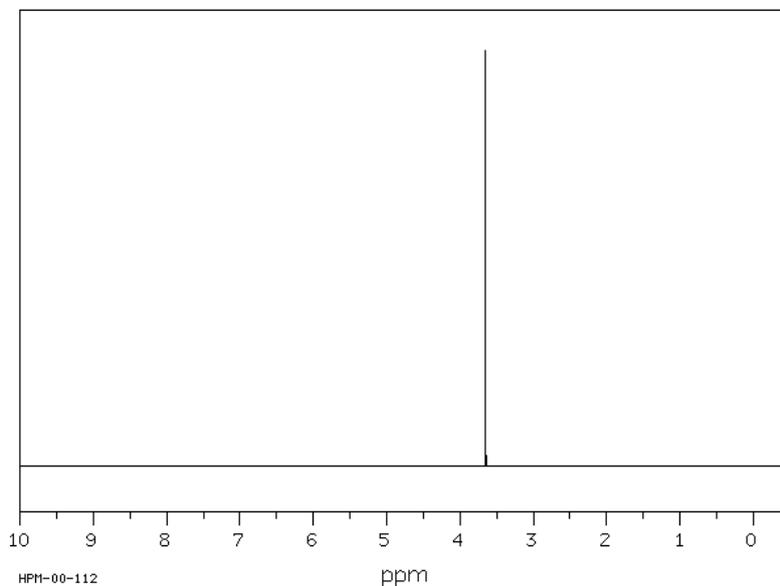


Le spectre de $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-NH}_2$ présente bien des multiplets :

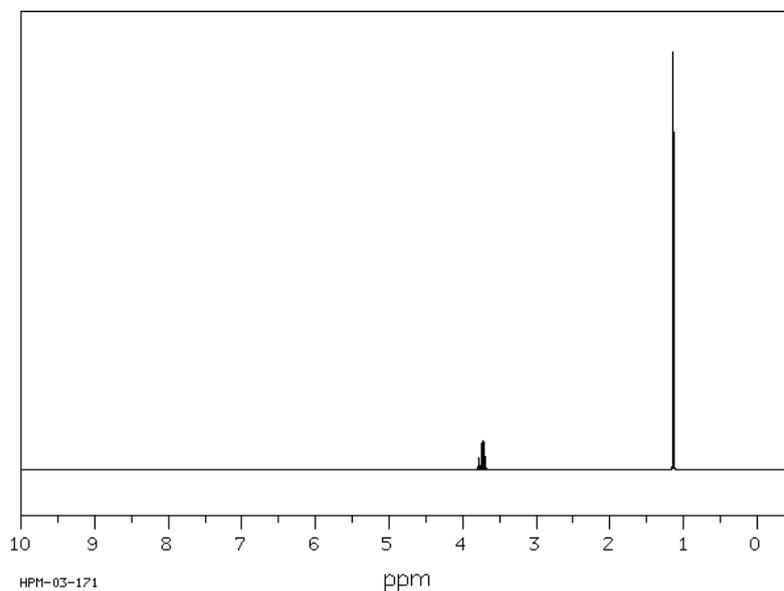


Notons que les atomes d'hydrogène porté par l'atome d'azote n'apparaissent pas sur le spectre : les atomes d'hydrogènes « acides » portés par des atomes électronégatifs tels que N et O, sont en général rapidement échangeables avec le solvant et ne résonnent pas en RMN. Les conditions sur le solvant (pureté) ont en général un effet important sur de telles espèces.

Le spectre de $\text{Br-CH}_2\text{-CH}_2\text{-Br}$ comporte bien un seul singulet :

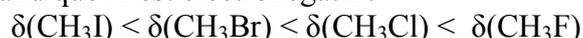


Le spectre de CH₃–CHCl–CH₃ présente bien deux multiplets (un doublet – peu visible sur le spectre ci-dessous – correspondant aux 6 protons équivalents des deux groupes méthyle, ayant pour voisin un seul proton, et un septuplet correspondant au proton sur l'atome de carbone en milieu de chaîne, ce proton ayant six protons voisins) :



Compétences générales

9. Le déplacement chimique des noyaux d'atomes d'hydrogène de CH₃X (X étant F, Cl, Br ou I) est d'autant plus grand que X est électro-négatif :



Cette conclusion est bien cohérente avec ce qui a été vu en cours : « Plus un atome est proche d'atomes électro-négatifs, plus son déplacement chimique est grand. »

10. a. Le champ magnétique créé par un spectromètre de RMN va de 2 T à 26 T. Les spectromètres utilisés actuellement dans les laboratoires de recherche en chimie organique créent des champs d'environ 5 T.

Les spectromètres de RMN les plus perfectionnés créent des champs jusqu'à 26 T, mais ces appareils sont très peu nombreux dans le monde.

Pour comparaison, l'ordre de grandeur du champ créé par un aimant usuel est de 0,1 T.

b. Pour créer de tels champs magnétiques, on utilise des aimants supraconducteurs, à très basse température (inférieure à –270°C, ce qui nécessite l'emploi d'hélium liquide et d'azote liquide).

Voir : <http://culturesciences.chimie.ens.fr/dossiers-structure-outils-article-IntroRMN.html>

11. La spectroscopie de RMN du proton utilise la résonance des noyaux d'atomes d'hydrogène 1 d'une molécule. Or, un noyau d'atome d'hydrogène 1 est uniquement constitué d'un proton. Quand on parle de protons en RMN, on s'intéresse uniquement aux noyaux d'atomes d'hydrogène, et non aux protons des noyaux des autres atomes présent dans la molécule étudiée.

12. a. Deux noyaux isotopes peuvent avoir des propriétés magnétiques différentes : par exemple, un noyau d'atome de carbone 12 est inactif en RMN, tandis qu'un noyau d'atome de carbone 13 est actif.

b. C'est le noyau d'atome d'hydrogène ^1H qui est le plus étudié en RMN par les chimistes organiciens :

- il est sensible à la présence d'un champ magnétique ;
- cet isotope est très majoritairement présent naturellement par rapport aux autres isotopes de l'hydrogène ;
- il est très abondant dans les molécules organiques.

c. Les molécules organiques étant constituées majoritairement d'atomes de carbone et d'hydrogène, l'étude en RMN de noyaux d'atomes de carbone pourrait apporter des informations sur les molécules organiques, à condition que les molécules aient des noyaux d'atomes de carbone magnétiquement actifs. Or, l'élément carbone est constitué de 1,11 % de carbone 13 : les molécules organiques peuvent donc être étudiées en RMN du carbone 13.

Remarque : d'autres noyaux peuvent aussi être étudiés, s'ils sont présents dans les molécules : le noyau de phosphore 31, de l'azote 15, du fluor 19...

13. Si l'on utilisait du chloroforme CHCl_3 en RMN du proton, on observerait un signal (singulet) correspondant au noyau d'atome d'hydrogène du chloroforme dans le spectre. Ce signal risquerait d'interférer avec les signaux correspondant à la molécule étudiée, il pourrait par exemple masquer (car très intense, le solvant étant ultra-majoritaire) les signaux de l'espèce étudiée.

14. Les indices auxquels Jean-Marie Lehn fait allusion sont :

- le nombre de signaux apparaissant sur le spectre ;
 - le déplacement chimique des signaux (autrement dit leur position sur le spectre) ;
 - la forme des signaux ;
 - les hauteurs relatives des sauts de la courbe d'intégration.
-

Exercices de méthode

15. Exercice résolu.

16. a. On compte le nombre de signaux (3, donc 3 groupes de protons équivalents) et on repère le déplacement chimique δ de chacun, puis on complète la première ligne d'un tableau de 5 lignes (voir tableau ci-dessous).

b. Dans la deuxième ligne, on indique le nombre de protons correspondant à chaque signal (d'après la courbe d'intégration).

À 8,0 ppm, on mesure un saut de 5 mm ; à 4,2 ppm, on mesure un saut de 10 mm et à 1,2 ppm, on mesure un saut de 15 mm.

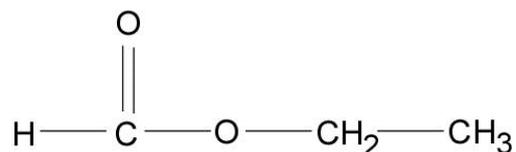
Les signaux à 1,2 et 4,2 ppm correspondent donc respectivement à trois et deux fois plus de protons que le signal à 8,0 ppm. La molécule comportant 6 protons, on en déduit que les signaux à 1,2, à 4,2 et 8,0 ppm correspondent respectivement à 3, 2 et 1 protons.

c. Dans la troisième ligne, on indique la multiplicité du signal, et on en déduit dans la quatrième ligne le nombre de protons voisins des protons responsables du signal étudié, avant d'en déduire une hypothèse sur une partie de la structure de la molécule (5^e ligne).

δ (ppm)	8,0	4,2	1,2
Nombre de protons correspondant (lecture de la courbe d'intégration)	1	2	3
Multiplicité	singulet	quadruplet	triplet
Nombre de protons voisins	0	3	2
Hypothèse	-(C=O)-O-H : à éliminer car d'après la table, le déplacement chimique serait entre 10,5 et 12 ppm ou H-(C=O)-O-	2 protons donc -CH ₂ - ayant 3 protons voisins donc -CH ₂ -CH ₃	3 protons donc CH ₃ - ayant 2 protons voisins donc CH ₃ -CH ₂ -

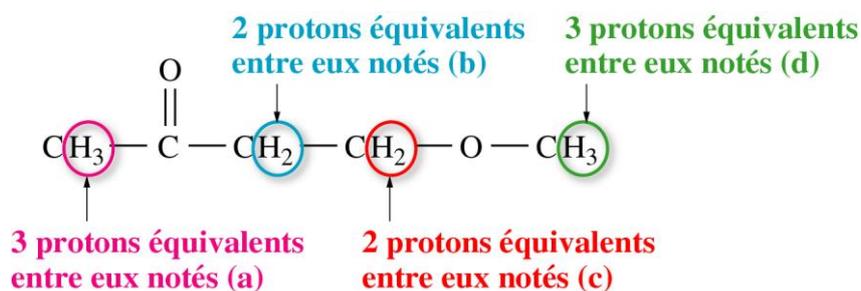
d. D'après la formule brute, il y a, dans la molécule étudiée, en plus du groupe -CH₂-CH₃ (-C₂H₅), un atome d'oxygène, un atome de carbone et un atome d'hydrogène.

La molécule étudiée est donc du méthanoate d'éthyle :



e. Le spectre IR présente une bande intense vers 1 730 cm⁻¹ que l'on peut attribuer à la liaison C=O. On n'observe pas de bande vers 3 500 cm⁻¹, ce qui confirme que la molécule ne comporte pas de liaison O-H et n'est donc pas un acide carboxylique.

17. a. Recopions la molécule étudiée et entourons les groupes de protons équivalents :



La molécule comporte donc quatre groupes de protons équivalents.

b. Les trois protons notés (a) et les trois protons notés (d) n'ont pas d'atomes d'hydrogène dits « voisins » dans la molécule : le signal des protons (a) et celui des protons (d) seront donc des singulets.

Les 2 protons (b) ont deux protons voisins : les deux protons (c). Le signal des protons (b) sera donc un triplet ($2 + 1 = 3$ pics).

De même, les 2 protons (c) ont deux voisins, les deux protons (b). Le signal des protons (c) sera donc aussi un triplet.

c. Le spectre présente deux singulets et deux triplets, ce qui est bien conforme aux prévisions précédentes.

d. Les deux singulets correspondent chacun à des groupes de trois protons : les protons (a) et les protons (d). Les protons (d) sont plus proches d'un atome d'oxygène (électronégatif) que les protons (a). Le déplacement chimique des protons (d) doit donc être supérieur à celui des protons (a).

On en déduit :

	Déplacement chimique (ppm)
Protons (a)	2,3
Protons (d)	3,3

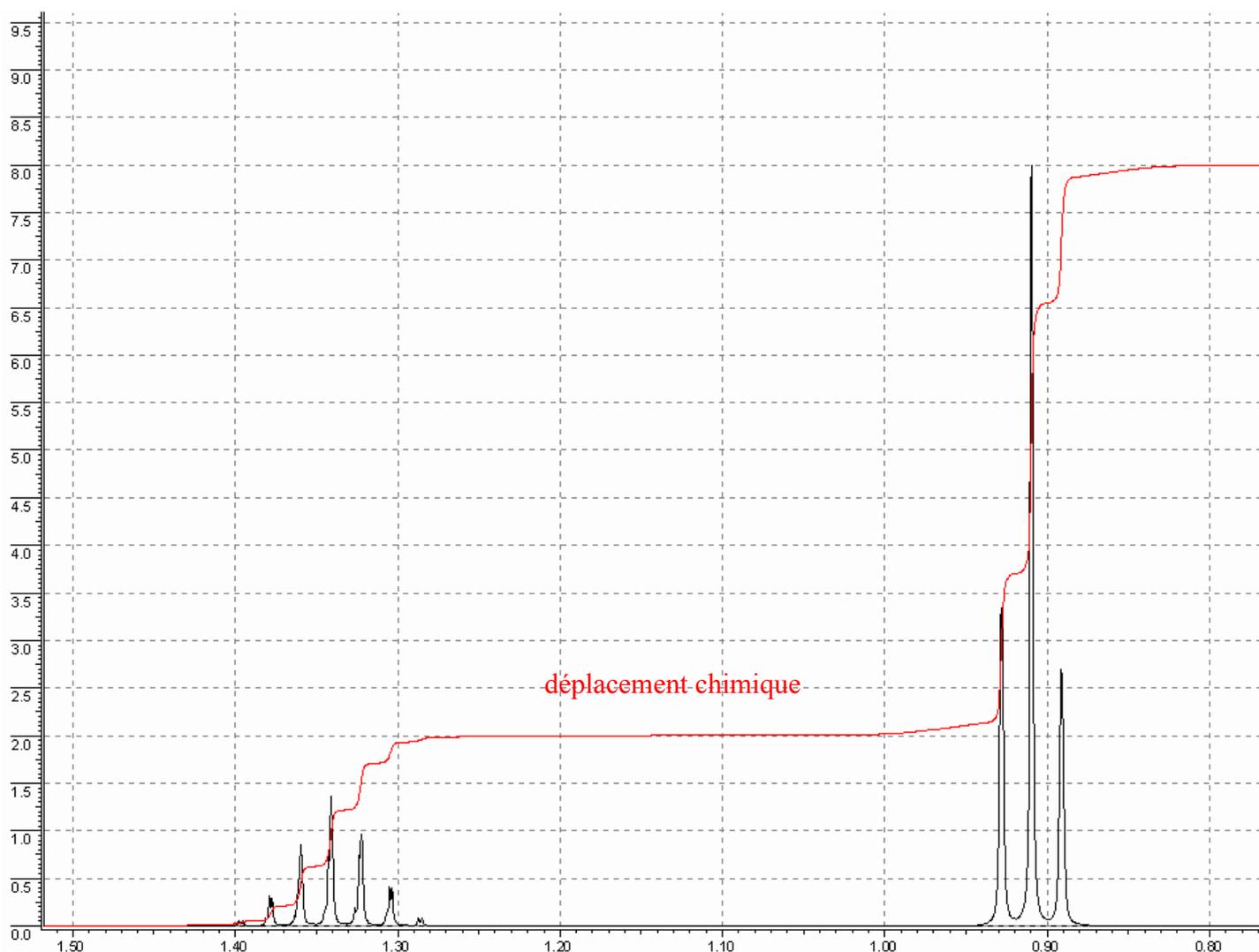
Les deux triplets correspondent chacun à des groupes de deux protons : les protons (b) et les protons (c). Les protons (c) sont plus proches d'un atome d'oxygène (électronégatif) que les protons (b). Le déplacement chimique des protons (c) doit donc être supérieur à celui des protons (b).

On en déduit :

	Déplacement chimique (ppm)
Protons (b)	2,7
Protons (c)	3,6

Exercices d'entraînement

18. a. et b. Spectre du propane $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_3$ (remarque : les graduations sur l'axe des abscisses sont 0,80 ; 0,90 ; 1,00 ; 1,10 ; 1,20 ; 1,30 ; 1,40) :



On observe deux signaux, et il y a effectivement deux groupes de protons équivalents dans la molécule : les 6 protons des deux groupes méthyle $\text{CH}_3\text{-}$ et les deux protons de $\text{-CH}_2\text{-}$.

Le saut du signal à 0,91 ppm est trois fois plus grand que celui du signal à 1,35 ppm. Le signal à 0,91 ppm correspond donc au groupe de 6 protons équivalents, et celui à 1,35 ppm au groupe de 2 protons équivalents.

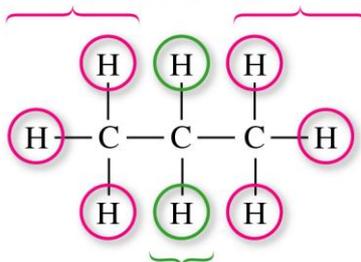
Le signal à 0,91 ppm, correspondant à 6 protons est un triplet : or, chacun de ces 6 protons a deux protons voisins (ceux de -CH-) ; le signal correspondant doit bien présenter :

$$2 + 1 = 3 \text{ pics}$$

Le signal à 1,35 ppm est un septuplet. Il correspond aux deux protons de $\text{-CH}_2\text{-}$, voisins des six protons des deux groupes méthyle, et le signal correspondant doit bien présenter :

$$6 + 1 = 7 \text{ pics}$$

6 protons ayant 2 protons voisins :
triplet à 0,91 ppm



2 protons ayant
6 protons équivalents voisins :
septuplet à 1,35 ppm

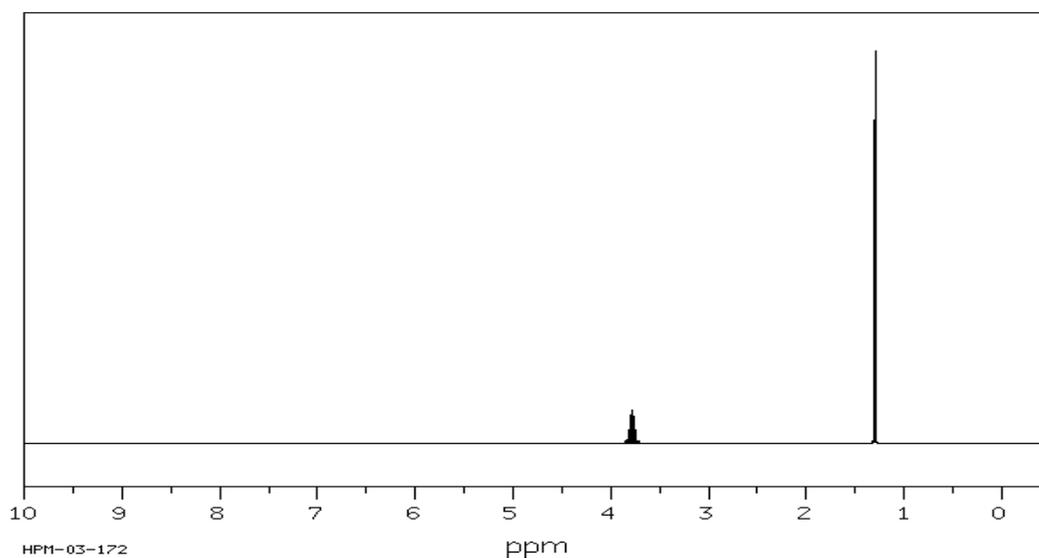
Spectre du 2-bromopropane CH₃-CHBr-CH₃ :

On observe deux signaux, et il y a effectivement deux groupes de protons équivalents dans la molécule : les 6 protons des deux groupes méthyle CH₃- et le proton de -CHBr-.

Le saut du signal à 1,31 ppm est six fois plus grand que celui du signal à 3,78 ppm. Le signal à 1,31 ppm correspond donc au groupe de 6 protons équivalents, et celui à 3,78 ppm au proton de -CHBr-.

Le signal à 1,31 ppm, correspondant à 6 protons est un doublet : or, chacun de ces 6 protons a un seul proton voisin (celui de -CHBr-) ; le signal correspondant doit bien présenter :

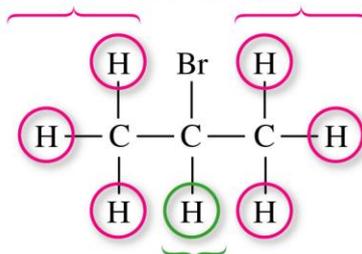
$$1 + 1 = 2 \text{ pics}$$



Le signal à 3,78 ppm est un septuplet. Il correspond au proton de -CHBr-, qui a pour voisins les six protons des deux groupes méthyle, et le signal correspondant doit bien présenter :

$$6 + 1 = 7 \text{ pics}$$

6 protons ayant un seul proton voisin :
doublet à 1,31 ppm

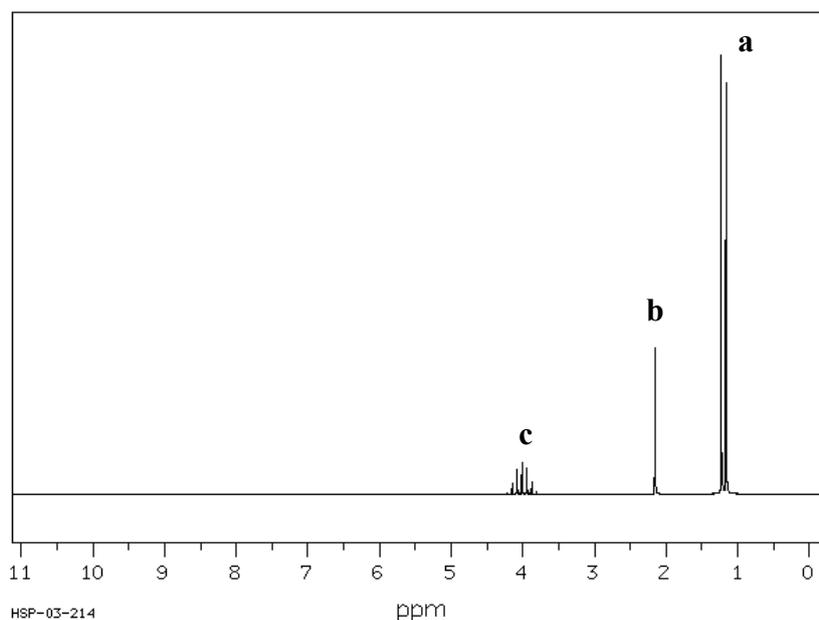


1 proton ayant
6 protons équivalents voisins :
septuplet à 3,78 ppm

On remarque que les déplacements chimiques des protons du 2-bromopropane sont plus élevés que ceux du propane : ceci est dû à la présence d'un atome de brome, plus électronégatif que ceux de carbone et d'hydrogène.

19. a. et b. Les deux molécules étudiées sont le méthanol $\text{CH}_3\text{-OH}$, et le méthanal HC=O . L'un des deux spectres fait apparaître un seul signal : la molécule correspondante contient un seul type de protons, il s'agit donc du méthanal (spectre A). L'autre spectre comporte deux signaux, la molécule correspondante contient donc deux types de protons : c'est le cas du méthanol (spectre B) ; les trois protons, équivalents entre eux, du groupe méthyle $\text{CH}_3\text{-}$, et le proton du groupe hydroxyle. Ces conclusions sont cohérentes avec la table simplifiée de déplacements chimiques : le proton du méthanal a un déplacement chimique de 9,60 ppm (spectre A), compris dans la fourchette [9,5 - 11 ppm] d'un proton lié à l'atome de carbone d'un groupe carbonyle. Dans le spectre B, les deux déplacements chimiques (3,43 et 3,66 ppm) correspondent bien aux types de protons du méthanol : le proton de groupe hydroxyle (dans la fourchette [0,5 - 5,5 ppm]) et les protons du groupe méthyle, donc liés à un atome de carbone lui-même lié à un atome électronégatif (fourchette [3,1 - 4,0 ppm]).

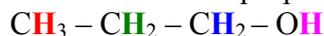
20.



Sirius T^{erm} S - Livre du professeur

Chapitre 7. Spectres de RMN

Le spectre de l'exemple étudié fait apparaître 3 signaux : la molécule contient trois types de protons. Cette information permet ici d'éliminer le propan-1-ol, qui a 4 types de protons :



Analysons à présent la courbe d'intégration.

On choisit le palier le plus petit (ici le **c**) et on calcule le rapport de la hauteur de chaque palier sur celle du plus petit :

$$\frac{h_a}{h_c} = 6 \text{ et } \frac{h_b}{h_c} = 1$$

Il y a donc le même nombre (noté n) de protons du type **b** et du type **c** et 6 fois plus de protons du type **a**.

La molécule comportant 8 protons :

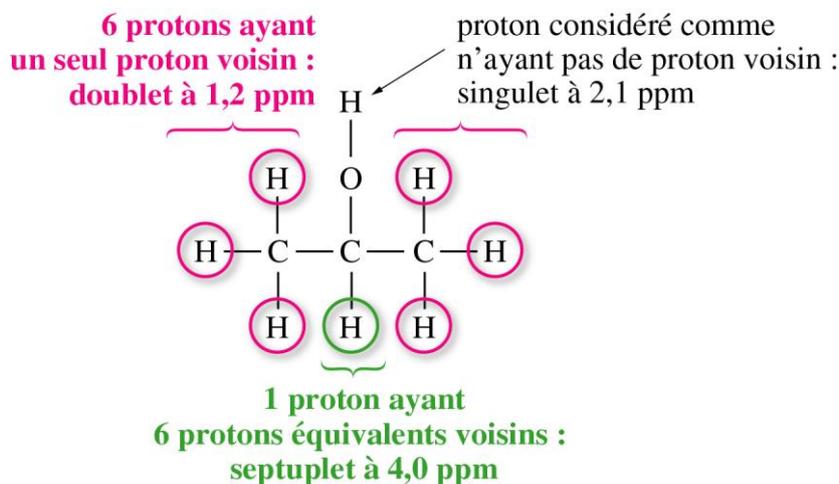
$$n + n + 6n = 8, \text{ d'où } n = 1$$

La molécule a donc trois groupes de protons équivalents de 1, 1 et 6 protons, respectivement à 4,0 ppm, 2,1 ppm et 1,2 ppm : la molécule est du propan-2-ol et non du méthoxyéthane (contenant trois groupes de protons équivalents, de 3, 3 et 2 protons).

Analysons la multiplicité de chaque signal.

Le septuplet à 4,0 ppm correspond à un proton ayant pour voisins 6 protons équivalents, c'est le proton situé sur l'atome de carbone central du propan-2-ol.

Le doublet à 1,2 ppm correspond à 6 protons équivalents ayant à un seul proton voisin : les 6 protons des groupes méthyle couplés au proton lié à l'atome de carbone central. Le singulet à 2,1 ppm correspond au proton du groupe hydroxyle : ce proton n'est pas considéré comme voisin des autres protons de la molécule lorsque le tube de mesure contient des traces d'eau (ce qui presque toujours le cas).



Vérifions la cohérence des conclusions précédentes avec une table de déplacements chimiques : sur le spectre donné, le signal à 4,0 ppm (septuplet) correspond au proton situé sur le même atome de carbone que le groupe hydroxyle : on est bien dans la fourchette [3,1 ppm - 4,0 ppm] des protons sur un atome de carbone lié à un atome électro-négatif.

Le signal à 2,1 ppm peut bien être celui du proton d'un groupe hydroxyle, et celui à 1,2 ppm correspond bien à des protons sur une chaîne carbonée linéaire.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 7. Spectres de RMN

21. a. Tous les protons de la N,N-diméthylméthanamine (triméthylamine) sont équivalents. En effet, les trois protons d'un même groupe méthyle CH₃– sont équivalents entre eux. De plus, un logiciel de modélisation moléculaire permet de voir que deux groupes méthyle sont symétriques l'un de l'autre par rapport à un plan de symétrie de la molécule (contenant le 3^e groupe méthyle).

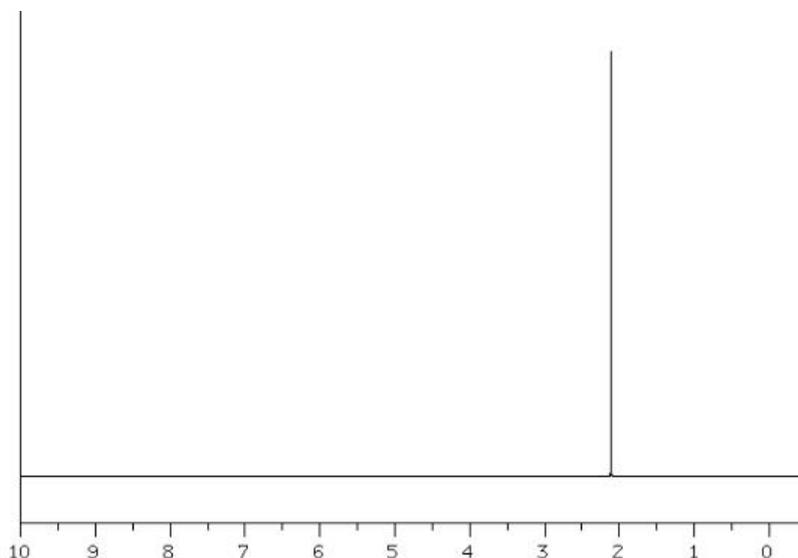
Par analogie, on en déduit que la N,N-diéthyléthanamine (triéthylamine) possède deux groupes de protons équivalents :

- l'un formé des 9 protons (notés **a**) appartenant aux trois groupes méthyle CH₃– ;
- l'autre formé des 6 protons (notés **b**) appartenant aux trois –CH₂–.

b. Dans la triméthylamine, tous les protons sont équivalents entre eux : le spectre fera apparaître un seul signal (singulet).

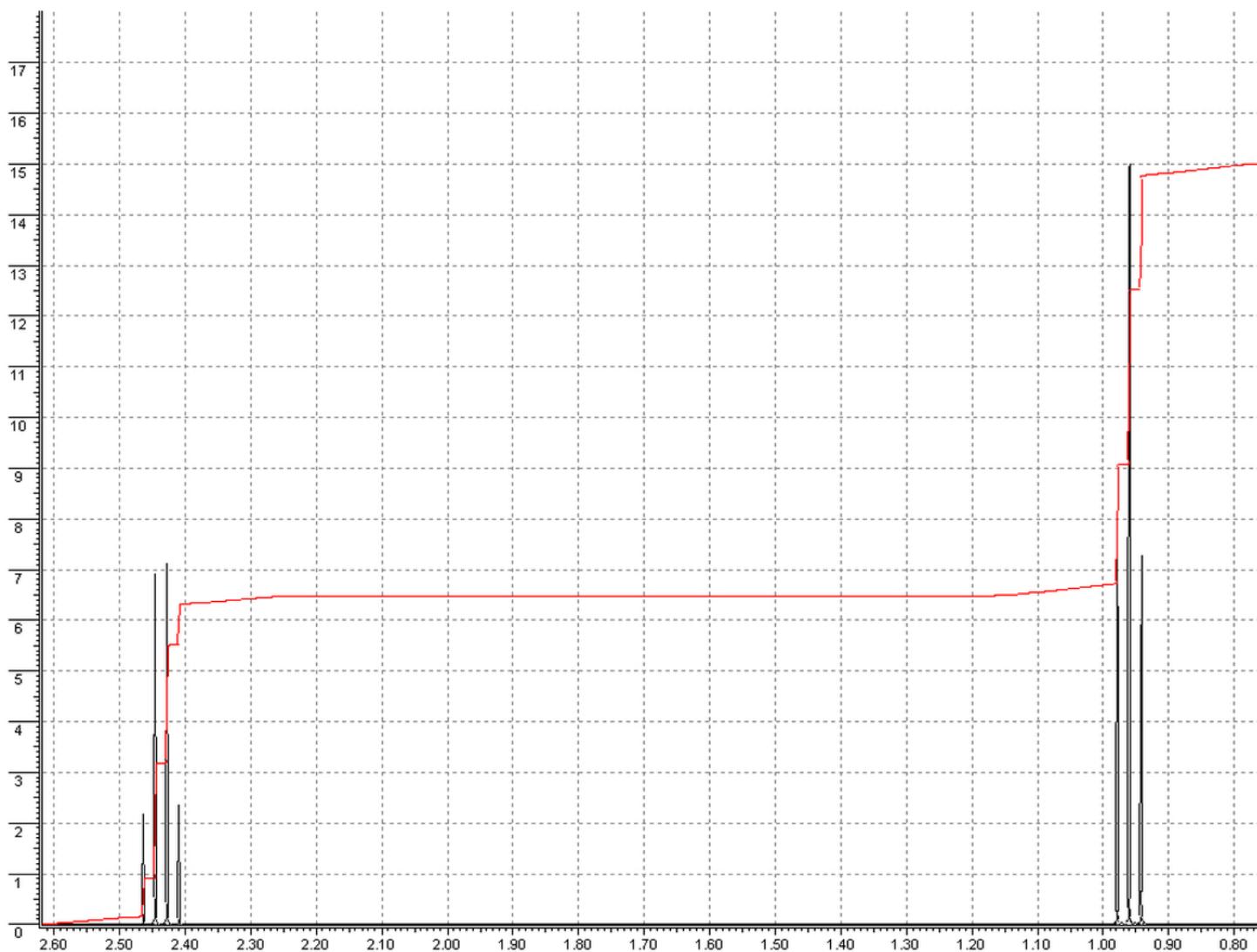
Dans la triéthylamine, chacun des 9 protons **a** a deux protons voisins : le signal attendu est un triplet. Chacun des 6 protons **b** a trois protons voisins : le signal attendu est un quadruplet.

c. Le spectre de la triméthylamine fait bien apparaître un seul singulet.



Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 7. Spectres de RMN

Le spectre de la triéthylamine fait bien apparaître deux signaux, un triplet et un quadruplet. Le triplet correspond à 9 protons et le quadruplet à 6 protons, et le saut de la courbe d'intégration correspondant au triplet est bien $\frac{9}{6} = 1,5$ fois plus grand que le saut correspondant au quadruplet.



d. Les 9 protons **a** (triplet) sont plus loin de l'atome d'azote (électronégatif) que les 6 protons **b** (quadruplet) : on observe bien sur le spectre que le quadruplet à un déplacement chimique plus grand que le triplet.

22. a. La hauteur du saut de la courbe d'intégration est proportionnelle au nombre de protons responsables du signal : le triplet correspond donc à $\frac{3}{2} = 1,5$ fois plus de protons que le quadruplet.

On note n le nombre de protons responsables du triplet et n' le nombre de protons responsables du quadruplet :

$$n = 1,5 n'$$

La formule brute de la molécule étant $C_4H_{10}O$, on a aussi :

$$n + n' = 10$$

On en déduit : $1,5 n' + n' = 10$, soit $2,5 n' = 10$, soit $n' = 4$

Donc : $n = 1,5 ; n' = 6$

Le triplet correspond donc à 6 protons et le quadruplet à 4 protons.

b. Le triplet correspond à des protons ayant deux protons voisins, et le quadruplet correspond à des protons ayant trois protons voisins : on reconnaît l'association des deux signaux caractéristique du groupe éthyle CH_3-CH_2- .

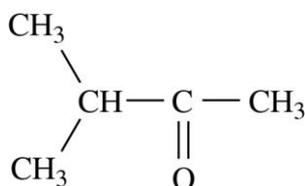
Le triplet correspondant à 6 protons et le quadruplet correspondant à 4 protons, la cétone étudiée a vraisemblablement un plan de symétrie, et est donc l'éthoxyéthane :



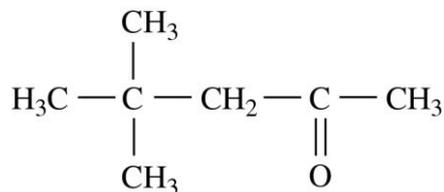
Remarque : le signal correspondant aux protons des $-CH_2-$ (quadruplet à 3,4 ppm) a un déplacement chimique supérieur à celui du signal des protons des $-CH_3$ (triplet à 1,1 ppm), car les $-CH_2-$ sont plus proches de l'atome le plus électro-négatif de la molécule, l'atome d'oxygène.

23.

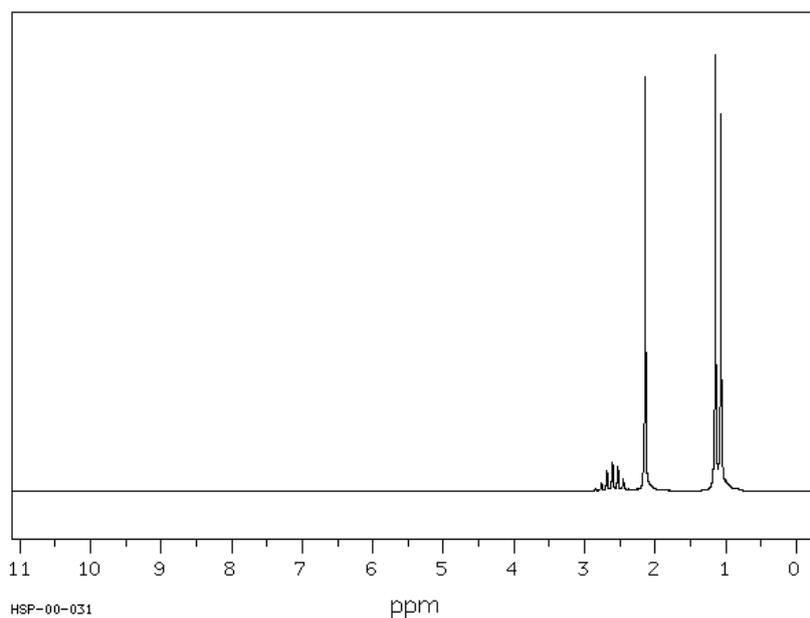
a. 3-méthylbutan-2-one



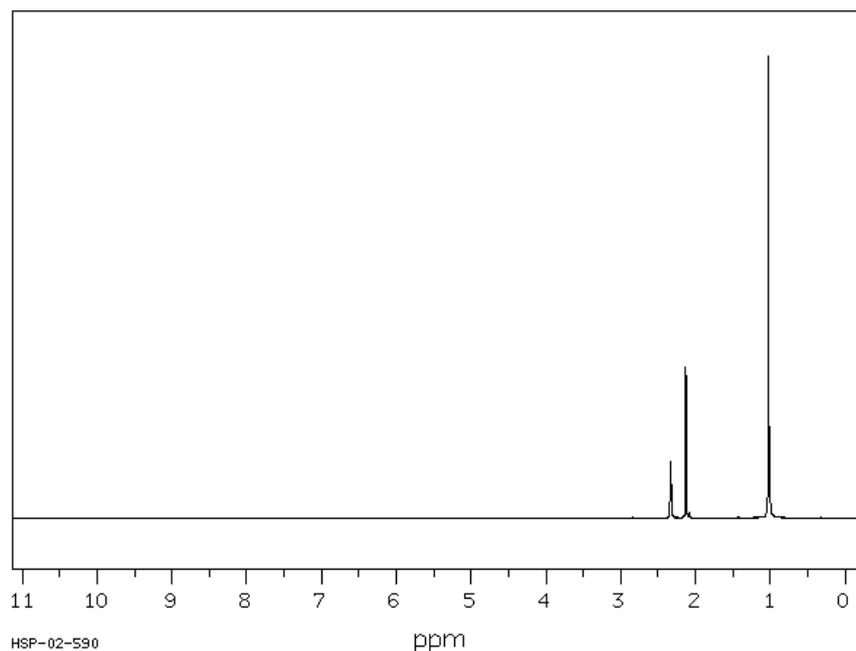
4,4-diméthylpentan-2-one



b. Spectre A :



Spectre B :



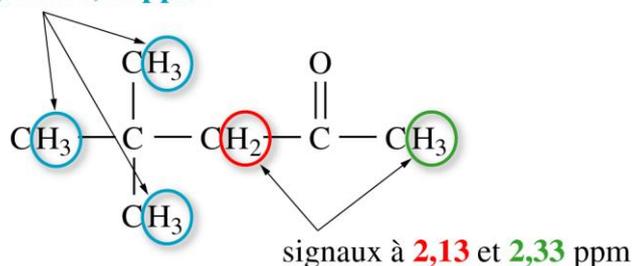
c. Dans la 4,4-diméthylpentan-2-one, aucun des protons n'a de protons voisins : le spectre de RMN de cette molécule ne doit présenter que des singulets, c'est donc le spectre B.

On en déduit que le spectre A est celui de la 3-méthylbutanone.

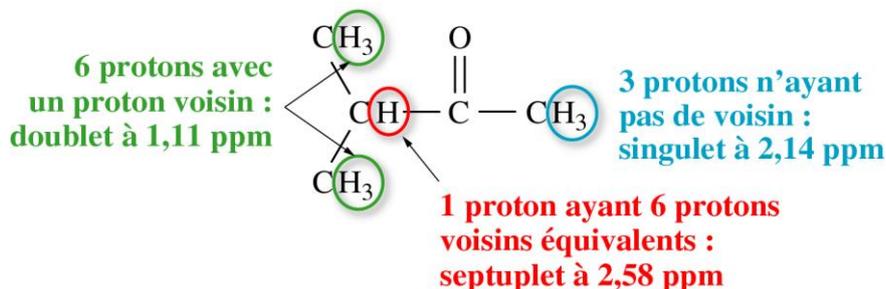
d. Le spectre B ne présente que des singulets, car aucun des protons n'a de proton voisin.

Deux groupes de protons sont à même distance de l'atome d'oxygène (les protons de $-\text{CH}_2-$ et les protons du groupe CH_3- lié au carbonyle : ils ont des déplacements chimiques voisins, de 2,13 ppm et 2,33 ppm, mais on ne peut attribuer sans information complémentaire chacun de ces deux signaux. Il faudrait disposer de la courbe d'intégration pour attribuer ces deux signaux. Les autres protons (9 protons équivalents entre eux) sont plus éloignés de l'atome d'oxygène, leur déplacement chimique est de 1,02 ppm.

protons plus éloignés de l'atome d'oxygène
que les autres protons de la molécule :
signal à 1,02 ppm



Interprétation de la multiplicité des signaux du spectre A : le groupe de 6 protons équivalents est plus éloigné de l'atome d'oxygène que les autres groupes de protons de la molécule : ces 6 protons ont donc un déplacement chimique inférieur à celui des autres protons de la molécule.



24. a. Les trois protons d'un même groupe méthyle CH_3 sont équivalents entre eux. De plus, deux groupes méthyle CH_3 sont symétriques l'un de l'autre par rapport à un plan de symétrie de la molécule contenant les deux autres groupes méthyle CH_3 . Tous les protons du TMS sont donc équivalents entre eux : en spectroscopie de RMN du proton, le TMS donne un seul signal (singulet).

b. L'atome de silicium étant moins électronégatif que les atomes de carbone et d'hydrogène, et donc moins électronégatif que la plupart des atomes présents dans les molécules organiques (N, O, F, Cl, Br, I, P...), les protons du TMS ont un déplacement chimique inférieur à celui de la plupart des noyaux d'atomes d'hydrogène présents dans les molécules organiques.

c. Si le TMS est introduit dans un échantillon, son signal sera aisément repérable sur le spectre, puisqu'il s'agit d'un singulet, à un déplacement chimique inférieur à celui des autres protons de l'espèce étudiée (dans les cas les plus courants).

Si on introduit le TMS dans un échantillon, il faut aussi qu'il soit inerte chimiquement vis-à-vis de l'espèce étudiée (ce qui est généralement le cas).

25. a. Plusieurs raisons et points communs expliquent la confusion fréquente entre la tomodensitométrie et l'IRM (dans l'opinion publique) :

- ce sont deux techniques utilisés en médecine pour obtenir des images (2D ou 3D) de l'intérieur du corps humain ;
- les appareils utilisés pour réaliser des examens médicaux par tomodensitométrie et par IRM se ressemblent extérieurement (*cf.* Photographies dans le manuel) : le patient est installé dans une sorte de tube autour duquel un émetteur et un capteur sont en rotation ;
- la tomodensitométrie est appelée scanographie, mais aussi par abus de langage "scanner". De même, l'appareil IRM est parfois appelé "scanner". Ces abus de langage contribuent à la confusion entre les deux techniques ;
- Dans les deux techniques, on peut utiliser des produits de contraste pour améliorer la qualité et l'exploitation des images.

b. Même si l'IRM utilise la RMN et aurait donc pu s'appeler IRMN (imagerie par résonance magnétique nucléaire), cette appellation a été évitée, en raison de la confusion possible induite par le mot "nucléaire", présent par exemple dans "centrale nucléaire" (et ayant une connotation négative). Les patients auraient pu alors craindre la nocivité de cette technique d'imagerie (amalgame avec la radioactivité et les réactions nucléaires).

c. L'eau est l'espèce majoritaire dans le corps humain, et une molécule d'eau contient deux noyaux d'atomes d'hydrogène. Il est donc judicieux d'utiliser la RMN du proton.

d. Les deux techniques, moyennant l'utilisation de produits de contraste, peuvent être utilisées pour visualiser les mêmes organes et les mêmes tissus. Cependant, la tomodensitométrie est particulièrement adaptée à l'imagerie des os, et l'IRM à la visualisation d'organes comme le cerveau, le cœur...

C'est la tomodensitométrie qui a le plus d'effets secondaires, à cause de l'utilisation de rayons X, très énergétiques. Le personnel médical doit se protéger.

e. Une contre-indication à un examen par IRM est le port d'un stimulateur cardiaque ou de prothèses métalliques, sensibles à la présence d'un champ magnétique intense.

f. Échographie : ultrasons (20 000 à 70 000 Hz).

Radiologie classique : rayons X (3×10^{16} à 3×10^{19} Hz).

IRM : ondes radio ($1,5 \times 10^5$ à 3×10^9 Hz).

Les rayonnements les plus nocifs sont les plus énergétiques : ce sont les rayons X.

Les radiations ionisantes correspondent à des rayonnements électromagnétiques très énergétiques, elles ont pour effet de ioniser (transformer en ions) des atomes constituant la matière.

Si les rayons X sont ionisants, ils ne sont cependant pas issus de la radioactivité (contrairement aux rayonnements alpha, beta, et gamma), contrairement à ce qu'affirme la deuxième phrase.

26. a. Hexan-2-one : $\text{CH}_3\text{-(C=O)-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_3$.

Hexan-3-one : $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-(C=O)-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_3$.

b. Les deux spectres IR montrent une bande vers $3\,000\text{ cm}^{-1}$, caractéristique des liaisons C-H impliquant des atomes de carbone tétraédriques, et une bande à $1\,750\text{ cm}^{-1}$, caractéristique de la liaison C=O.

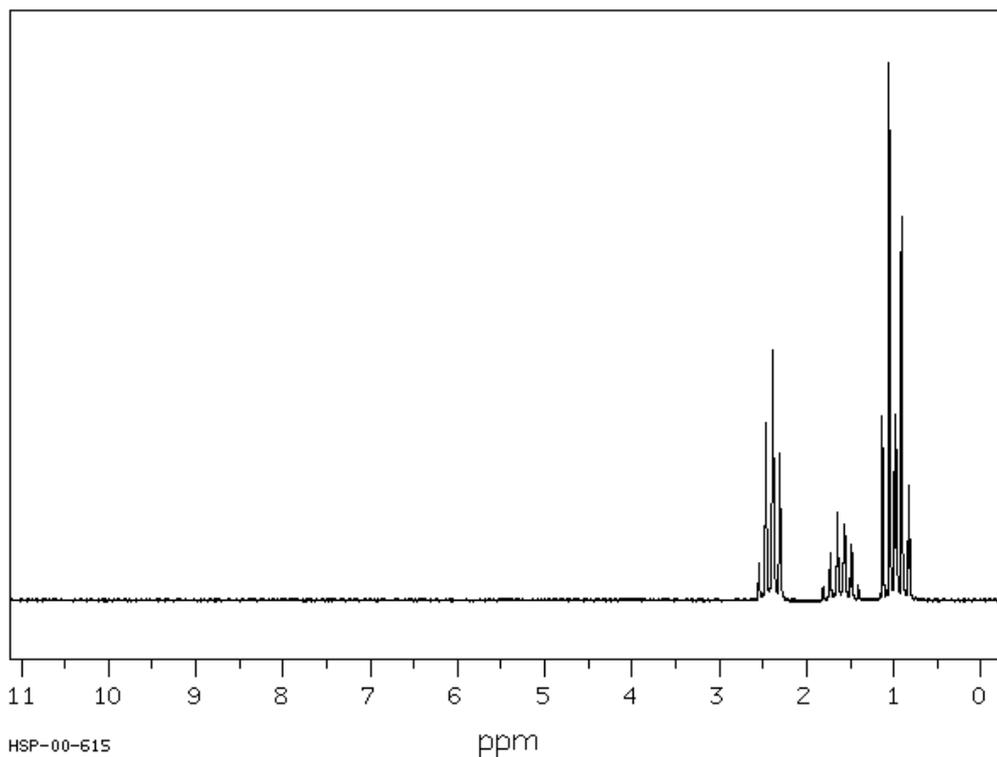
Seule la zone du spectre correspondant à un nombre d'onde inférieur à $1\,500\text{ cm}^{-1}$ (c'est-à-dire l'empreinte digitale de la molécule) diffère légèrement, mais sans indication complémentaire (tables de spectres), on ne peut attribuer l'un ou l'autre des deux spectres IR à l'hexan-2-one ou à l'hexan-3-one.

c. Les groupes de protons équivalents n'ont pas le même nombre de protons voisins dans l'hexan-2-one et dans l'hexan-3-one, à cause de la position différente du groupe carbonyle dans les deux molécules.

Dans l'hexan-3-one, on observe 5 groupes de protons équivalents, et chacun des protons a plusieurs protons voisins : tous les signaux seront donc des multiplets.

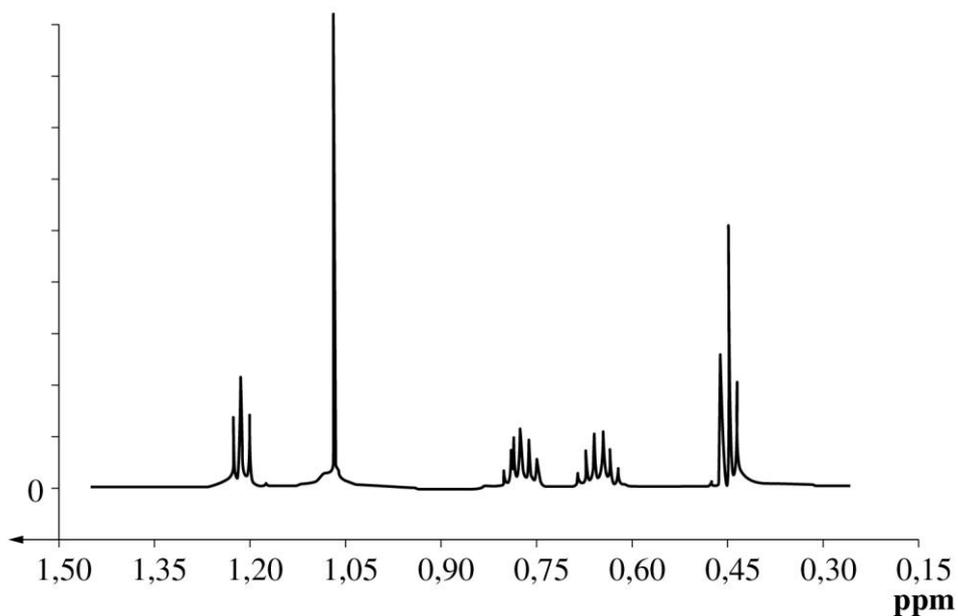
Dans l'hexan-2-one, il y a aussi 5 groupes de protons équivalents, mais l'un des groupes de protons (sur l'atome de carbone n°1 de la chaîne) n'a pas de protons voisins : son signal sera donc un singulet. Les autres signaux seront des multiplets.

d. Spectre de RMN du proton de l'hexan-3-one :



Spectre de RMN du proton de l'hexan-2-one :

unité arbitraire



e. On observe bien un singulet dans le spectre de l'hexan-2-one alors que le spectre de l'hexan-3-one ne comporte que des multiplets. On peut donc aisément attribuer l'un des deux spectres de RMN à l'hexan-2-one, et l'autre à l'hexan-3-one.

On remarque que le spectre de RMN de l'hexan-3-one ne fait pas apparaître distinctement 5 signaux : en effet, même si l'on compte 5 groupes de protons équivalents, des protons non équivalents ont des environnements chimiques très similaires, et donc des déplacements chimiques très voisins.

27. 1. La fréquence de résonance d'un proton dans un champ $B = 4,70$ T est :

$$\nu = 200 \text{ MHz}$$

La fréquence de résonance d'un proton dans un champ $B = 2,12$ T est :

$$\nu = \frac{200 \times 2,12}{4,70} = 90,2 \text{ MHz}$$

Sur le spectromètre figurera vraisemblablement l'indication « 90 MHz ».

2. a. La fréquence de résonance d'un noyau est aussi proportionnelle au rapport gyromagnétique de ce noyau. Le rapport gyromagnétique d'un noyau de carbone 13 étant différent de celui d'un noyau d'hydrogène, la fréquence de résonance d'un noyau de carbone 13 est différente de celle d'un proton (dans un même champ magnétique).

b. L'indication « à 300 MHz » signifie que dans ce spectromètre, la fréquence de résonance d'un proton est de 300 MHz. On cherche la fréquence de résonance d'un noyau de carbone 13 dans le même appareil, c'est-à-dire dans un champ magnétique de même valeur.

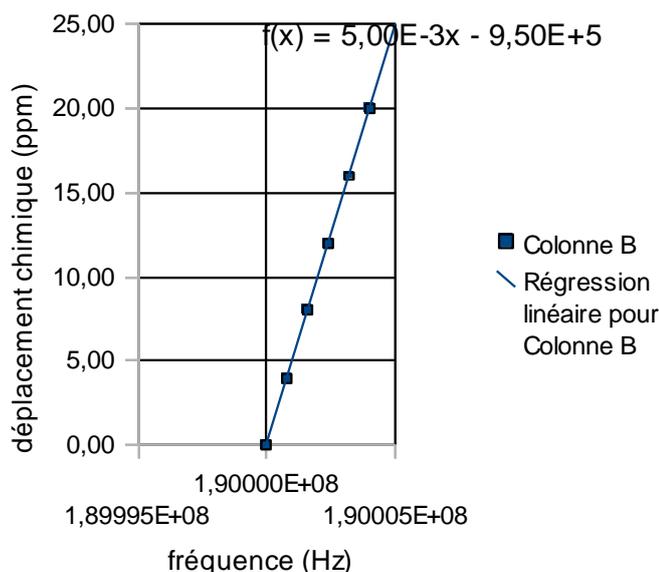
On utilise encore une relation de proportionnalité.

Pour $\gamma_{\text{proton}} = 2,675 \times 10^8 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{T}^{-1}$, la fréquence de résonance est de 300 MHz.

Donc pour $\gamma_{\text{carbone 13}} = 6,725 \times 10^7 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{T}^{-1}$, la fréquence de résonance est de :

$$\frac{300 \times 6,725 \times 10^7}{2,675 \times 10^8} = 75,4 \text{ MHz}$$

28. 1. a. En utilisant un tableur et sa fonction « courbe de tendance », on trace la fonction $\delta = f(\nu)$.



b. L'unité du coefficient directeur est celle d'un déplacement chimique divisé par une fréquence, soit $\text{ppm}\cdot\text{Hz}^{-1}$. On en déduit la relation :

$$\delta = a \times \nu + b, \text{ avec } a = 5,00 \times 10^{-3} \text{ ppm}\cdot\text{Hz}^{-1} \text{ et } b = -9,5 \times 10^5 \text{ ppm}$$

Calculons :

$$\frac{1}{\nu} = \frac{1}{200 \times 10^6} = 5,00 \times 10^{-9} \text{ Hz}^{-1}$$

soit :

$$\begin{aligned} \frac{1}{\nu} &= 5,00 \times 10^{-9} \times 10^6 \text{ ppm}\cdot\text{Hz}^{-1} \\ &= 5,00 \times 10^{-3} \text{ ppm}\cdot\text{Hz}^{-1} \\ &= a \end{aligned}$$

On remarque que la valeur du coefficient directeur de la droite est donc l'inverse de la valeur de la fréquence indiquée sur le spectromètre, multipliée par 10^6 (autrement dit, c'est l'inverse de la fréquence du spectromètre, en ppm·Hz⁻¹)

2. a. Les deux signaux apparaissent aux mêmes déplacements chimiques, indiqués sur l'axe des abscisses. L'écart entre les signaux est repéré par une double flèche en Hz, et non en ppm, alors qu'en toute rigueur, vu que l'axe est en ppm, cet écart devrait aussi être indiqué en ppm. Mais la fréquence de résonance et le déplacement chimique sont liés par une relation simple (cf. question précédente) : c'est donc l'écart entre les fréquences de résonance des deux signaux qui est donné.

b. Le déplacement chimique ne dépend pas du spectromètre utilisé, contrairement à la fréquence de résonance. Mettre le déplacement chimique en abscisses des spectres permet de comparer aisément des spectres effectués sur des appareils différents.

29. Le spectre présente trois singulets : l'un vers 2,2 ppm, un autre vers 3,3 ppm et le dernier vers 4,4 ppm.

Les protons du groupe méthyle n'ayant pas de protons voisins, on s'attendait à ce que ces trois protons équivalents donnent un singulet sur le spectre.

Les protons du groupe $-CH_2-$ et celui du groupe hydroxyle $-OH$ sont, d'après la définition donnée dans le cours voisins (ils sont séparés par trois liaisons), mais d'après l'aide donnée dans l'énoncé, on sait qu'ils ne sont en fait pas considérés comme voisins.

L'attribution des signaux n'est pas facile.

Celui de plus faible déplacement chimique (vers 2,2 ppm) est vraisemblablement celui des protons du groupe méthyle CH_3- , les plus éloignés d'un atome d'oxygène dans cette molécule. Pour les deux autres types de protons, il est impossible de trancher : celui du groupe hydroxyle est directement lié à un atome d'oxygène (électronégatif), mais ceux de $-CH_2-$ sont à proximité de deux atomes d'oxygène. La table de déplacements chimiques simplifiée ne permet pas non plus de conclure.

Pour trancher, il faudrait disposer de la courbe d'intégration et/ou d'une table de déplacements chimiques beaucoup plus complète.

30. a. Le deutérium est un isotope de l'hydrogène : un noyau de deutérium comporte 1 proton et un neutron ($A = 2$; $Z = 1$). Son symbole usuel est D.

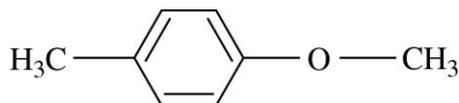
b. Si les molécules étudiées en RMN étaient dissoutes dans un solvant comportant des noyaux d'atomes d'hydrogène, le signal dû à ces protons sur le spectre serait beaucoup plus intense que les signaux dus aux protons de la molécule (les protons du solvant sont en effet beaucoup plus nombreux que ceux de l'espèce dissoute dans le solvant). Le signal des protons du solvant risquerait donc de masquer ceux des protons de la molécule étudiée.

c. La valeur du déplacement chimique du noyau de deutérium est très différente de celle des protons : le signal à 7,24 ppm n'est donc pas dû au noyau de deutérium du chloroforme deutéré, mais aux protons résiduels du solvant (parmi un grand nombre de molécules de $CDCl_3$, il peut subsister quelques molécules de $CHCl_3$).

d. Les solvants deutérés sont difficiles à fabriquer et très chers, on en introduit donc le moins possible dans les tubes de RMN.

31. a. Dans les deux spectres la courbe d'intégration fait apparaître des sauts qui n'ont pas les mêmes hauteurs relatives : dans le spectre du sésamol, tous les sauts ont des hauteurs différentes, alors que dans celui de la méthylanisole, deux sauts ont même hauteur ; les déplacements chimiques des singulets ont des déplacements chimiques différents dans les deux spectres.

La formule ci-contre comporte deux groupes méthyle CH₃-, comportant chacun trois protons équivalents entre eux. La courbe d'intégration du spectre de RMN de cette molécule présentera donc deux sauts de même hauteur : il s'agit donc de la méthylanisole, et l'autre molécule est donc le sésamol.



L'analyse plus complète des deux spectres confirme cette attribution :

Spectre de la méthylanisole : les protons du groupe méthyle lié à l'atome d'oxygène ont un déplacement chimique plus grand (3,8 ppm) que les protons de l'autre groupe méthyle (2,2 ppm).

Les quatre protons liés au cycle benzénique donnent un multiplet vers 7 ppm.

Spectre du sésamol : les trois protons liés au cycle benzénique donnent un multiplet vers 6,5 ppm. Le singulet vers 5,9 ppm correspond à un saut deux fois plus grand que celui du singulet à 5,1 ppm. Donc 5,9 ppm correspond aux deux protons de -CH₂- et 5,1 ppm au proton du groupe hydroxyle.

b. La spectroscopie IR aurait permis de différencier les deux molécules : on aurait vu dans le spectre IR du sésamol la bande caractéristique de la liaison O-H.

Exercices de synthèse

32. Les spectres de A et de B sont différents : les produits de réaction A et B sont donc différents. Ce sont deux isomères de même formule brute C₃H₇Br : le 1-bromopropane et le 2-bromopropane, de formules semi-développées respectives :



Le spectre de la molécule A fait apparaître deux signaux : un septuplet et un doublet.

C'est le 2-bromopropane qui comporte deux groupes de protons équivalents :

- les 6 protons des deux groupes méthyle CH-, ayant un unique proton voisin (du groupe -CHB-) ; le signal correspondant est donc un doublet ;
- le proton du groupe -CHBr- a 6 protons voisins équivalents entre eux, son signal est donc un septuplet. Ce signal est à un déplacement chimique plus élevé (vers 4 ppm) que le doublet, car le proton de -CHBr- est plus proche de l'atome de brome (électronégatif) que les 6 autres protons.

Le spectre de la molécule B est celui du 1-bromopropane CH₂Br-CH₂-CH₃ (3 groupes de protons équivalents).

On observe deux triplets (les protons de CH₂Br- et ceux de CH₃- ont comme voisins les deux protons du -CH₂-). Le triplet à 3,6 ppm correspond aux protons de CH₂Br, plus proches de l'atome de brome que ceux de CH₃- (triplet vers 1 ppm).

Les protons de -CH₂- donnent lieu à un multiplet plus complexe (vers 1,7 ppm), car ils ont comme voisins deux types de protons différents.

33. a. Les propriétés magnétiques des noyaux sont appelées "spins".

b. Ces propriétés sont symbolisées par de petites flèches, chaque petite flèche correspondant à un noyau.

c. "Dans un champ magnétique, le spin se comporte comme une aiguille aimantée qui s'oriente dans la direction du champ." → "Dans un champ magnétique, le spin se comporte comme une aiguille aimantée qui s'oriente majoritairement dans la direction et le sens du champ." Il manque sur l'image la représentation du vecteur champ magnétique.

d. C'est une analogie avec une onde mécanique (vagues à la surface de l'eau) qui est utilisée.
e. Pour répondre à cette question, il est préférable de s'aider de l'image précédente. L'onde schématisée autour de la tête du patient correspond à l'impulsion envoyée par l'appareil pour modifier l'orientation des spins.

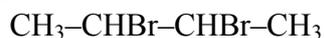
L'onde schématisée en haut et à droite de la page correspond à l'onde émise par les spins lorsqu'ils retournent à leur état initial en se désexcitant, et ce signal qui est analysé par l'appareil IRM.

f. L'écran de gauche résulte d'une IRM anatomique, tandis que celui de droite montre une IRM fonctionnelle : dans le 2ème cas, l'acquisition est tellement brève que le fonctionnement d'un organe est suivi en temps quasi-réel.

34. a. Le spectre RMN du proton d'un halogénoalcane A de formule brute $C_4H_8Br_2$ présente deux signaux, à 1,8 et 3,8 ppm. La courbe d'intégration présente un palier de 3 cm pour le signal à 1,8 ppm, et un palier de 1 cm pour l'autre signal.

Il y a deux types de protons, et trois fois plus de l'un des types de protons que de l'autre. Sur 8 protons, 6 correspondent donc au saut de 3 cm (à 1,8 ppm), et 2 correspondent au saut de 1 cm (à 3,8 ppm).

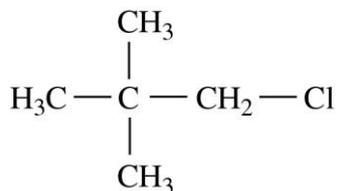
La formule de la molécule est donc :



Le spectre RMN du proton d'un halogénoalcane B de formule brute $C_5H_{11}Cl$ présente deux signaux, à 1,1 et 3,3 ppm. La courbe d'intégration présente un palier de 1 cm pour le signal à 3,3 ppm, et un palier de 4,5 cm pour l'autre signal.

D'après la courbe d'intégration, il y a 4,5 fois plus de protons à 1,1 ppm que de protons à 3,3 ppm. Le signal à 1,1 ppm correspond à 9 protons, et celui à 3,3 ppm à 2 protons.

La formule de B est :



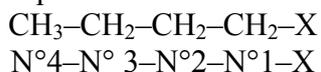
b. Spectre A : les deux protons des $-CHBr-$ sont bien plus proches de l'atome le plus électronégatif de la molécule (brome) que les 6 autres : ils sont donc à 3,8 ppm, tandis que les 6 protons des deux groupes CH_3- sont à 1,8 ppm.

Spectre B : les deux protons de $-CH_2-$ (3,3 ppm) sont plus proches de l'atome de chlore (électronégatif) que les autres protons (1,1 ppm).

c. Spectre A : les deux protons $-CHBr-CHBr-$ sont voisins mais non couplés (car équivalents) ; à 3,8 ppm, on attend un quadruplet (chacun des deux protons a trois protons voisins, ceux d'un CH_3-), et à 1,8 ppm, on attend un doublet (protons ayant un seul proton voisin, celui de $-CHBr-$)

Spectre B : aucun proton n'a de proton voisin, donc les deux signaux sont des singulets.

35. a. Il manque l'abscisse, qui correspond au numéro du carbone dans la chaîne carbonée :



La chaîne carbonée est numérotée à partir de l'atome de carbone lié à l'atome d'halogène.

b. Ce graphique permet d'étudier l'influence sur le déplacement chimique de protons :

- de l'électronégativité d'un atome voisin ;
- de la plus ou moins grande proximité d'un même atome électro-négatif voisin.

c. Dans cette question, on fixe la nature de l'atome électronégatif et on étudie l'influence de sa position sur le déplacement chimique de protons voisins.

Dans chacune des quatre molécules, le déplacement chimique diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'atome d'halogène : les protons liés à l'atome de carbone N°1 ont un déplacement chimique plus grand que ceux liés à l'atome de carbone N°2, eux-mêmes ayant un déplacement chimique plus grand que les protons liés à l'atome de carbone N°3 ...

Cependant, cette diminution de déplacement chimique est beaucoup moins marquée quand on s'éloigne de l'atome d'halogène.

d. On fixe la position des protons étudiés.

Pour les protons situés sur l'atome de carbone N°1, plus l'atome d'halogène est électronégatif, plus le déplacement chimique est grand.

Pour les protons situés sur l'atome de carbone N°2, ce n'est plus vrai. On peut juste observer que le déplacement chimique varie peu selon l'électronégativité de l'atome d'halogène.

Même chose pour les protons situés sur les atomes de carbone N°3 et N°4.

36. a. Caractère portable et peu onéreux des instruments utilisant la RMN en champ terrestre, pratiques pour être utilisés sur le terrain. Mais les signaux détectés sont faibles, donc nécessité d'un capteur adapté.

b. Acronyme anglais EFNMR : Earth Field Nuclear Magnetic Resonance.

c. Exemples d'applications : travaux à des fins archéologiques (fouilles sous-marines par exemple) ou à des fins scientifiques (étude de la glace en Antarctique).

d. Le champ magnétique.

37. a. Travailler à haut champ pour l'étude des protéines améliore la résolution des spectres : « on augmente la largeur de raie » (*cf.* rapport du Sénat du document 2).

b. La phrase soulignée est fausse : on voit que les spectres A et B font apparaître des signaux ayant les mêmes valeurs de déplacements chimiques. On peut aussi se reporter à l'exercice 29 : c'est tout l'intérêt de la définition du déplacement chimique, grandeur indépendante du type de spectromètre de RMN utilisé (et de la valeur du champ magnétique qu'il crée).

c. Travailler à haut champ pour l'étude des protéines améliore la résolution des spectres et permet donc de mieux voir la structure fine des signaux (*cf.* rapport du Sénat du document 2). Cette amélioration de la qualité des spectres avec un champ magnétique plus intense est illustrée par le document 1. Le spectre B a été obtenu avec un spectromètre créant un champ magnétique plus grand que le spectre A : sa résolution est meilleure, le triplet et le quadruplet sont bien identifiables, ce qui n'est pas le cas sur le spectre A.

Le document 3 apporte une information complémentaire sur l'intérêt d'utiliser un champ magnétique le plus intense possible : on peut ainsi diminuer, voire éviter des superpositions entre les signaux de différents protons (dans une « grosse » molécule comme une protéine) qui auraient des déplacements chimiques voisins. C'est ce qui apparaît sur le spectre d'une protéine : l'ensemble des nombreux signaux forme une continuité.

« Le " prix à payer " dans cette évolution vers des champs d'intensité plus élevée, c'est la qualité de ceux-ci. Il ne sert en effet à rien d'augmenter le champ magnétique si l'on perd de son homogénéité. » (Rapport du Sénat.)

Il existe des spectroscopies de RMN dites à 2 dimensions, et même à 3 dimensions, plus adaptées à l'étude des protéines, et qui permettent de mettre en évidence des interactions entre des noyaux différents (et des espèces différentes) (*cf.* document 2 et l'exemple de spectre de RMN 2D).

Thème 1 – Exercices de fin de thème

Manuel pages 152 à 155

Ces exercices concernent les chapitres 1 à 7 du manuel.

1. 1. a. Les ultrasons sont des vibrations de même type que les vibrations sonores mais de fréquences supérieures aux fréquences audibles par l'homme.

b. Son pur : vibration sinusoïdale.

Fréquence fondamentale : fréquence la plus petite dans la décomposition harmonique.

Harmoniques : vibration sinusoïdale obtenue par décomposition d'une vibration périodique.

c. La fréquence fondamentale est associée à la hauteur d'un son.

d. La composition en harmoniques est associée au timbre d'un son.

e. Les fréquences des harmoniques sont multiples de la fréquence du fondamental.

Harmonique de rang 2 : 60 Hz ; harmonique de rang 3 : 90 Hz.

f. Signal **(a)** : cri FM ; signal **(b)** : cri FC ; signal **(c)** : cri FC-FM.

g. *Une erreur a été corrigée dans le manuel élève : il est demandé de calculer la dimension minimale d'un insecte et non sa dimension maximale.*

Pour les petits obstacles, la diffraction devient importante (il y a alors un étalement du faisceau réémis). En admettant que la dimension minimale de l'insecte est la longueur d'onde du signal émis :

$$\lambda = \frac{v_{\text{son}}}{f} = 1,1 \times 10^{-2} \text{ m}$$

2. a. $d = v \times \Delta t$.

b. Distance de propagation du signal :

$$L = 2D - d = 2D - v\Delta t$$

c. La distance de propagation du signal s'écrit aussi :

$$L = v_{\text{son}}\Delta t$$

d'où :

$$v_{\text{son}}\Delta t = 2D - v\Delta t$$

d'où :

$$\Delta t = \frac{2D}{v + v_{\text{son}}} = 1,7 \times 10^{-2} \text{ s}$$

d. En négligeant le déplacement de la chauve-souris :

$$v_{\text{son}}\Delta t^2 = 2D$$

Erreur relative :

$$\frac{\Delta t' - \Delta t}{\Delta t} = \frac{\Delta t'}{\Delta t} - 1 = \frac{v + v_{\text{son}}}{v_{\text{son}}} - 1 = \frac{v}{v_{\text{son}}} = 2 \%$$

On peut effectivement négliger le déplacement de la chauve-souris pour effectuer ce calcul avec une bonne précision.

3. a. L'effet Doppler est le changement de la fréquence du signal reçu par rapport à celle du signal émis lorsque le récepteur est en mouvement relatif par rapport à la source.

Exemple : changement de hauteur d'un klaxon perçu au passage d'un véhicule.

Applications : mesure de la vitesse des étoiles, radar routier de contrôle de vitesse.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Thème 1. Exercices de fin de thème

b. Les maxima de compression sont émis avec une période T . Entre deux maxima, l'émetteur et le récepteur se sont déplacés ; ainsi, la durée séparant la réception de deux maxima successifs est différente de T .

c. Considérons deux maxima de compression successifs. Le deuxième maximum met moins de temps pour parvenir à la chauve-souris : la période est donc raccourcie, la fréquence est plus grande.

d. Ici, la fréquence apparente est plus grande que la fréquence d'émission, ce qui n'est vérifié que par la deuxième expression

$$f_a = 62 \text{ kHz}$$

e. Les ailes du papillon constituent un émetteur ayant, par rapport à la chauve-souris, une vitesse qui varie périodiquement. Le décalage Doppler dû à ces variations est donc lui aussi périodique.

f. La fréquence du fondamental est la moitié de la fréquence du premier harmonique. Cette fréquence doit donc varier de 1,5 Hz. Ici, l'effet Doppler provoque une augmentation de la fréquence perçue donc, pour compenser, les fréquences émises doivent diminuer.

2. 1. a. Le son est une onde progressive, car c'est le phénomène de propagation d'une perturbation sans transport de matière, mais avec transport d'énergie.

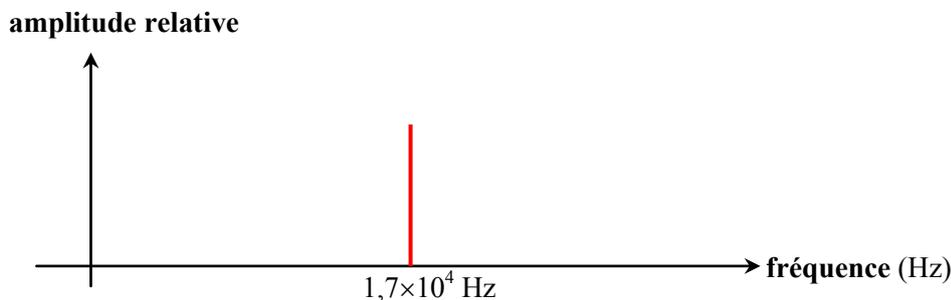
b. Valeur de la vitesse du son v_{son} dans l'air : $v_{\text{son}} = 340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

c. Période T : $T = 60 \text{ }\mu\text{s}$.

d. Fréquence f : $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{60 \times 10^{-6}} = 1,7 \times 10^4 \text{ Hz}$.

e. Ce son est audible, car la fréquence est comprise entre 20 et 20 000 Hz. C'est un son aigu, car la fréquence est élevée.

f. Le son est une onde progressive sinusoïdale, donc l'allure du spectre est la suivante :



2. a. Distance entre les récepteurs R_1 et R_2 : lorsque les deux signaux sont en coïncidence pour la première fois, alors la distance parcourue est égale à la longueur d'onde soit

$$v_{\text{son}} = \lambda \times f \text{ donc } \lambda = \frac{v_{\text{son}}}{f} = \frac{340}{1,7 \times 10^4} = 2,0 \times 10^{-2} \text{ m} = 2,0 \text{ cm}$$

b. La valeur 95 dB correspond au niveau d'intensité sonore.

c. Les adultes ne sont pas gênés par le Mosquito, car leur domaine de fréquences audibles est plus restreint.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Thème 1. Exercices de fin de thème

3. a. Les ondes ultrasonores et lumineuses (ondes électromagnétiques) sont utilisées dans le télémètre à pointeur laser.

b. Les ondes ultrasonores sont utilisées par le télémètre pour faire une mesure de distance.

Les ondes lumineuses du pointeur laser sont utilisées pour pointer la cible.

c. Principe de fonctionnement d'un télémètre : le télémètre envoie une onde ultrasonore vers l'objet pour déterminer la distance d qui nous sépare de celui-ci.

L'onde émise se réfléchit puis revient après une certaine durée Δt mesurée par l'appareil. L'affichage d du télémètre est obtenu en utilisant la valeur de la vitesse v des ondes ultrasonores et la relation $2d = v\Delta t$.

d. Une mesure réalisée sur une surface plane et dure possède une grande précision car l'onde sonore revient directement vers le télémètre.

e. L'appareil ne mesure pas à travers une vitre car l'onde ultrasonore est fortement absorbée par le verre.

f. Pour réaliser des mesures de distances de 13,5 m jusqu'à 18 m, le taux d'humidité ne doit pas être trop élevé pour limiter l'absorption des ondes ultrasonores et l'objet pointé doit être grand pour pallier au problème de directivité du faisceau d'ultrasons.

g. Calcul de l'incertitude sur une distance $d = 9,0$ m :

$$\text{la précision est } \frac{\Delta d}{d} = 0,5 \% \text{ soit } \Delta d = \frac{0,5}{100} \times 9,0 = 4,5 \times 10^{-2} \text{ m} = 4,5 \text{ cm}$$

Cap vers LE SUPÉRIEUR

Les exercices « Cap vers le supérieur » font appel à des compétences non exigibles en T^{erm} S : ils ont pour objectif de préparer aux études supérieures.

4. a. La distance d_E parcourue par la source pendant une période T_E de la vibration sonore émise est :

$$d_E = v_E T_E$$

b. La date t_1 à laquelle ce maximum atteint R est :

$$t_1 = \frac{D}{v_{son}}$$

c. À l'instant de date $t_0' = T_E$, la distance entre E et R est : $D - d_E$.

La durée mise par le son pour parcourir cette distance est :

$$t' = \frac{D - d_E}{v_{son}}$$

La date à laquelle R reçoit ce maximum de vibration est :

$$t_2 = T_E + \frac{v_{son} t_1 - v_E T_E}{v_{son}} = t_1 + T_E \left(1 - \frac{v_E}{v_{son}}\right)$$

d. Une erreur a été corrigée dans le manuel élève : v_E remplace v au dénominateur de l'expression à retrouver.

$$T_R = t_2 - t_1 = T_E \left(1 - \frac{v_E}{v_{son}}\right)$$

Cette relation implique :

$$\frac{1}{f_R} = \frac{1}{f_E} \left(1 - \frac{v_E}{v_{son}}\right)$$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Thème 1. Exercices de fin de thème

$$f_R = f_E \left(\frac{v_{son}}{v_{son} - v_E} \right)$$

e. Si E s'éloigne du récepteur, à l'instant de date $t_0' = T_E$, la distance entre E et R est $D + d_E$, ce qui entraîne en fin de raisonnement :

$$f_R = f_E \left(\frac{v_{son}}{v_{son} + v_E} \right)$$

f. Si E se rapproche de R à $v_E = 120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ soit $\frac{120 \times 10^3}{3600} = 33,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, alors :

$$f_R = \frac{340}{340 - 33,3} \times 400 = 443 \text{ Hz}$$

Si E s'éloigne de R à $v_E = 120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1} = 33,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ alors :

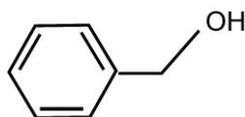
$$f_R = \frac{340}{340 + 33,3} \times 400 = 364 \text{ Hz}$$

g. La variation relative de la fréquence est au minimum de 17,8 %, ce qui est supérieur à l'écart de 6 % correspondant à un demi-ton entre deux notes. La différence est perceptible.

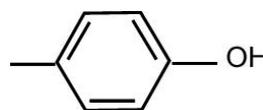
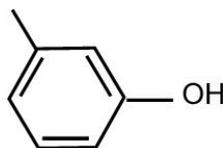
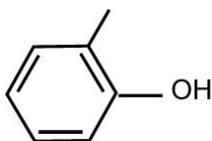
5. 1. a. Ce sont les spectres IR qu'il est judicieux d'analyser pour identifier d'éventuels groupes caractéristiques présents dans les produits obtenus (par l'identification des différents types de liaisons qu'ils contiennent).

b. Le spectre IR du produit A_1 en phase condensée présente une bande large autour de $3\,300 \text{ cm}^{-1}$, qui correspond vraisemblablement à la liaison O–H d'un groupe hydroxyle, et non d'un groupe carboxyle puisque le produit A_1 ne contient qu'un seul atome d'oxygène (et qu'on ne repère pas de bande vers $1\,700 \text{ cm}^{-1}$).

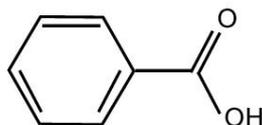
c. La molécule A_1 ($\text{C}_7\text{H}_8\text{O}$) comporte un groupe hydroxyle et le même cycle à 6 atomes de carbone que le benzaldéhyde, elle peut avoir comme formule topologique :



On peut aussi proposer les trois isomères suivants :



d. Le spectre IR de A_2 présente une bande large entre $2\,500 \text{ cm}^{-1}$ et $3\,200 \text{ cm}^{-1}$ ainsi qu'une bande fine et intense aux environs de $1\,700 \text{ cm}^{-1}$. On en déduit, grâce à une table IR, que cette molécule comporte un groupe carboxyle. La formule topologique de A_2 ($\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_2$) est donc vraisemblablement :



e. Spectre de RMN de A_1

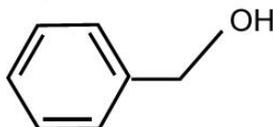
Le spectre de RMN de A_1 présente trois signaux.

À 7,2 ppm, le signal correspond aux protons (notés **(a)**) liés au cycle benzénique à 6 atomes de carbone. Le saut correspondant sur la courbe d'intégration mesure 1 cm.

Le saut de la courbe d'intégration correspondant au signal à 2,4 ppm (protons notés **(b)**) mesure 2 mm, et celui correspondant au signal à 4,6 ppm (protons notés **(c)**) mesure 4 mm.

Il y a donc 5 fois plus de protons **(a)** que de protons **(b)**, et 2 fois plus de protons **(c)** que de protons **(b)**.

Parmi les formules proposées, la seule qui est en accord avec ces observations est :



Il y a 5 protons liés aux atomes de carbone du cycle (protons **(a)** à 7,2 ppm), un proton lié à l'atome d'oxygène (proton **(b)** à 2,4 ppm) et 2 protons liés à l'atome de carbone lié au cycle (protons **(c)** à 4,6 ppm).

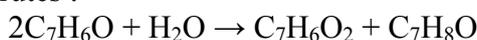
Les signaux à 2,4 et 4,6 ppm sont des singulets, les protons correspondant n'ayant pas de protons voisins.

Les trois autres formules ne conviennent pas, les proportions des différents types de protons ne correspondant pas à l'exploitation de la courbe d'intégration (seulement 4 protons liés au cycle, 3 protons équivalents – groupe méthyle – et le proton du groupe hydroxyle).

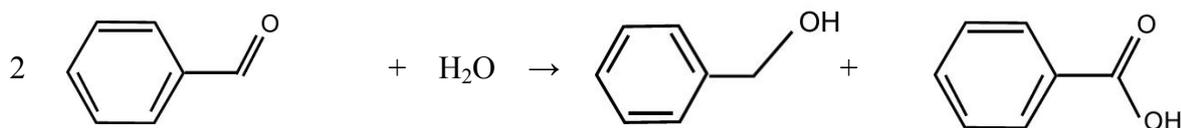
Spectre de RMN de A_2

Le signal à 12 ppm correspond au proton du groupe carboxyle. Les deux autres signaux (l'un correspondant à 2 protons et l'autre à 3 protons d'après la courbe d'intégration) correspondent aux 5 protons liés au cycle benzénique.

f. En utilisant les formules brutes :

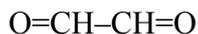


soit, avec les formules topologiques :

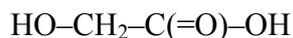


2. Dans le manuel élève, le chiffre 2. remplace la lettre g. car cette dernière question est bien la 2^e partie de l'exercice.

Le glyoxal contient deux atomes de carbone et deux groupes carbonyle : sa formule semi-développée est donc :



Lors de la réaction de Cannizzaro, l'un des deux groupes carbonyle va se transformer en groupe hydroxyle, tandis que l'autre va se transformer en groupe carboxyle. La formule semi-développée de l'espèce obtenue est donc :



ce qui correspond bien à la formule brute $C_2H_4O_3$.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Thème 1. Exercices de fin de thème

6. a. Calcul de la célérité v de l'onde périodique pour chaque enregistrement :

$$v = \lambda \times f$$

f (Hz)	12	24	48	96
λ (m)	0,018	0,0097	0,0059	0,0036
v (m·s ⁻¹)	0,22	0,23	0,28	0,35

b. La célérité augmente en fonction de la fréquence de l'onde. Ce phénomène est appelé dispersion.

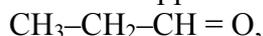
Le phénomène de dispersion s'observe en optique dans le cas de la dispersion de la lumière blanche dans un milieu transparent : d'après la loi de Snell-Descartes, $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$ pour le même angle d'incidence i_1 , les valeurs de i_2 sont différentes. Ceci implique que l'indice de réfraction du milieu transparent dépend de la fréquence (donc de la longueur d'onde et donc de la couleur) des radiations.

Comme $n = \frac{c}{v}$, la vitesse de propagation de la lumière dans un milieu transparent dépend aussi de la vitesse. Le prisme utilise cette propriété pour décomposer une lumière polychromatique.

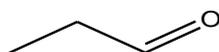
7. Dans le livre élève a été supprimée la photographie avec les fraises ainsi que sa légende, ce document n'ayant pas de rapport avec cet exercice.

a. Les deux formules topologiques données correspondent à la même formule brute : C₃H₆O. Les deux molécules A et B sont donc bien isomères.

b. Le propanal est un aldéhyde dont la chaîne carbonée est constituée d'un enchaînement de trois atomes de carbone. La formule semi-développée du propanal est donc :

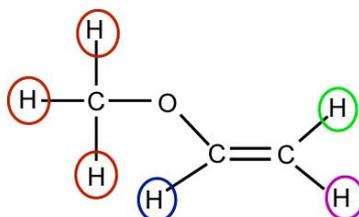


soit, en formule topologique :



c. Le propanal contient trois groupes de protons équivalents : l'un formé par les trois protons du groupe méthyle CH₃-, un autre formé par les deux protons de -CH₂-, et un autre formé par le proton lié à l'atome de carbone du groupe carbonyle.

d. Les protons équivalents entre eux sont entourés d'une même couleur sur la formule développée ci-dessous :



Les trois protons entourés en rouge sont équivalents du fait de la libre rotation autour de la liaison simple C-O. Le proton entouré en vert et celui entouré en violet ne sont pas équivalents du fait de l'impossibilité de la rotation autour de la double liaison C=C : le proton entouré en vert est donc spatialement plus proche de l'atome d'oxygène de la molécule que le proton entouré en violet.

e. Le spectre de RMN de la molécule A fait apparaître trois signaux : la molécule A comporte donc trois groupes de protons équivalents.

Le spectre de RMN de la molécule B fait apparaître quatre signaux : la molécule B comporte donc quatre groupes de protons équivalents.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Thème 1. Exercices de fin de thème

L'isomère *A* est donc le propanal :



tandis que la formule semi-développée de l'isomère *B* est :



f. Dans le propanal (isomère *A*), tous les protons ont des protons voisins : les 3 protons du méthyle -CH_3 ont 2 protons voisins (ceux de $\text{-CH}_2\text{-}$) et donnent donc un triplet ; le proton lié à l'atome de carbone du groupe carbonyle a aussi 2 protons voisins (ceux de -CH-) et donne donc un triplet. Enfin, les protons de $\text{-CH}_2\text{-}$ ont deux types de voisins : les 3 protons du groupe méthyle et le proton lié à l'atome de carbone du carbonyle ; on observe un massif.

Tous les signaux du spectre de RMN de *A* sont donc bien des multiplets.

Dans la molécule *B*, les trois protons du groupe méthyle n'ont pas de protons voisins et donnent donc un singulet, bien visible sur le spectre (vers 3,2 ppm).

g. Le signal à 9,8 ppm dans le spectre de RMN de *A* correspond à un atome d'hydrogène lié à l'atome de carbone d'un groupe carbonyle. Ce signal permet immédiatement de conclure que *A* est le propanal.

h. Dans le spectre IR, on observe une bande fine et intense vers $1\,750\text{ cm}^{-1}$, caractéristique d'une double liaison C=O . Ce spectre IR correspond donc au propanal : *A*. La spectroscopie IR est donc tout aussi efficace que la spectroscopie de RMN du proton pour distinguer les deux isomères étudiés ici.

Chapitre 8 – Principe d'inertie et quantité de mouvement

Manuel pages 163 à 180

Choix pédagogiques

La loi de conservation de la quantité de mouvement contenant le principe d'inertie dans le cas d'un système isolé de masse constante, le choix a été fait de regrouper leur étude dans un même chapitre.

Une première partie traite uniquement de cinématique ; la mesure du temps est abordée sans développement et le vecteur vitesse est introduit. Le vecteur accélération sera défini dans le chapitre 9.

La deuxième partie introduit le système matériel et les actions mécaniques. Le principe d'inertie est tout d'abord donné tel qu'il est énoncé en classe de seconde avant d'être complété par les notions de référentiel galiléen et de centre d'inertie. L'énoncé qui est alors donné introduit les termes de « système isolé » qui seront repris dans la troisième partie.

Le vecteur quantité de mouvement et la loi de conservation constituent cette troisième partie.

Des animations, des simulations, des vidéos documentaires et d'expériences illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et, certaines d'entre elles, sur les sites Internet compagnon Sirius.

Page d'ouverture

Le choix s'est portée sur une illustration de la propulsion par réaction avec la juxtaposition, apparemment surprenante, de deux documents, l'un montrant le décollage d'une navette spatiale alors que l'autre montre une pieuvre en déplacement.

Le principe d'inertie, connu des élèves ne permettant pas d'expliquer la propulsion, l'objectif est d'éveiller leur curiosité et d'attirer leur attention sur la nouvelle grandeur introduite dans ce chapitre et indiquée en titre, la quantité de mouvement.

Activités

Activité documentaire 1. Mesurer le temps

Commentaires

Cette première activité est une introduction à la mesure du temps ; l'évolution de la définition de la seconde est étudiée en s'appuyant sur l'évolution des horloges de l'antiquité à nos jours. Les différents phénomènes périodiques utilisés sont abordés ainsi que la recherche de la stabilité et de l'universalité d'un étalon de temps.

La précision des différentes horloges, le fonctionnement et les avantages de l'horloge atomique sur les autres dispositifs de mesure du temps seront développées dans le chapitre 11 (les oscillateurs et la mesure du temps).

Réponses

1. Analyser les documents

a. La définition actuelle utilise une référence atomique basée sur une transition entre deux niveaux d'énergie de l'atome de césium 133.

Les définitions précédentes utilisaient une référence astronomique, la durée de rotation de la Terre autour de son axe puis la durée de révolution de la Terre autour du Soleil.

b. La première définition a été mise en défaut avec l'apparition de l'horloge à quartz qui a montré que la durée de rotation de la Terre varie de quelques millièmes de secondes par jour.

La deuxième définition a été mise en défaut avec la réalisation des horloges atomiques dont la précision a permis de montrer que la durée de révolution de la Terre autour du Soleil varie également.

La recherche d'une meilleure stabilité a conduit à la définition actuelle basée sur une transition atomique.

2. Exploiter

a. Les horloges citées sont : le gnomon, le cadran solaire, la clepsydre, le sablier, l'horloge mécanique, l'horloge à quartz, l'horloge atomique.

Le gnomon comme le cadran solaire, utilisent l'ombre portée d'un objet sur un cadran. Le phénomène périodique est le mouvement apparent de rotation du Soleil dans le ciel dont la période est de 24 h.

L'oscillateur d'une horloge mécanique a une période de l'ordre de la seconde

La fréquence de l'oscillateur d'une horloge à quartz est de 32 768 Hz soit une période de l'ordre de 10^{-5} s.

La fréquence de l'oscillateur d'une horloge atomique est de 9 192 631 770 Hz soit une période de l'ordre de 10^{-10} s.

b. À son époque, Galilée ne disposait pas d'horloges mécaniques.

Ne disposant pas de chronomètre, l'étalon de temps que constitue la durée d'un battement du cœur pouvait lui permettre d'évaluer puis de comparer des durées (durées des oscillations d'un pendule par exemple)

Pour étudier la chute des corps, il utilisa des clepsydres (pesée de l'eau écoulée pendant la durée de chute).

Activité expérimentale 2. Référentiels et principe d'inertie

Commentaires

L'activité s'appuie sur une expérience simple de déplacement d'un mobile autoporté sur une table horizontale ; son exploitation va permettre de préciser l'énoncé du principe d'inertie et notamment la notion de référentiel galiléen.

L'activité peut être complétée par une détermination de vecteurs vitesse.

Réponses

1. Observer

a. Les points A_0, A_1, \dots, A_n sont alignés. Les distances entre deux points consécutifs sont égales : la vitesse du traceur central est constante.

b. Les points B_0, B_1, \dots, B_n ne sont pas alignés. Les distances entre deux points consécutifs ne sont pas égales.

2. Interpréter

a. Le mobile est soumis à l'action de la Terre et à l'action du coussin d'air formé entre le mobile et la table.

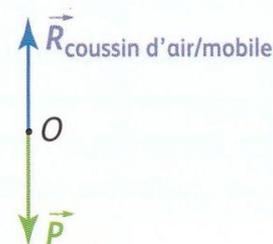
On peut négliger l'action de l'air ambiant devant les autres actions.

b. L'action de la Terre est modélisée par le poids \vec{P} , vertical et dirigé vers le bas.

L'action du coussin d'air est modélisée par une force \vec{R} telle que $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$.

Puisque les forces se compensent, \vec{R} est donc verticale, dirigée vers le haut et de même valeur que \vec{P} .

c. Le mouvement du traceur central repéré par les points A_i est rectiligne et s'effectue à vitesse constante alors que le mouvement du traceur périphérique repéré par les points B_i est quelconque. Le traceur central donne le mouvement du centre d'inertie qui se situe sur l'axe de symétrie du mobile ; le mouvement du centre d'inertie est rectiligne et uniforme.



3. Observer

L'enregistrement effectué sur la feuille fixe F_1 montre des points alignés et la distance entre deux points consécutifs est constante.

On retrouve un enregistrement identique sur la feuille F_2 lorsqu'on lui communique un mouvement de translation à vitesse constante. Ce n'est plus le cas lorsqu'on lui communique un mouvement quelconque : dans ce cas les points ne sont plus alignés et la distance entre deux points consécutifs n'est plus constante.

4. Interpréter et conclure

a. Le mouvement du traceur central (qui montre le mouvement du centre d'inertie du mobile) est rectiligne uniforme sur la feuille F_1 . Il peut être quelconque sur la feuille F_2 .

b. L'expérience 1 montre que tous les points d'un système isolé (le mobile autoporté) n'ont pas le même mouvement : son centre d'inertie est en mouvement rectiligne uniforme.

L'expérience 2 montre que le centre d'inertie d'un système isolé n'est en mouvement uniforme que dans certains référentiels : celui qui est associé à la feuille fixe F_1 ou à la feuille F_2 lorsqu'elle est en mouvement de translation à vitesse constante par rapport à F_1 . Ces référentiels sont qualifiés de galiléens. Le référentiel associé à la feuille F_2 en déplacement quelconque ne constitue pas un référentiel galiléen.

Les résultats expérimentaux sont bien en cohérence avec l'énoncé du principe d'inertie.

Simulation 3. La quantité de mouvement et sa conservation

Commentaires

Pour introduire la quantité de mouvement et sa conservation, le choix s'est porté sur une simulation offrant la possibilité de « manipuler » des systèmes isolés.

L'activité ne portant pas sur le principe d'inertie, il n'y a pas de questions relatives à la nature du mouvement des deux objets constituant le système. Il est cependant nécessaire de faire remarquer aux élèves que le système étudié est isolé.

La première partie est limitée à l'étude d'un choc avec accrochage permettant à l'élève de se familiariser avec la notion de système constitué par deux objets.

La deuxième partie offre plus de libertés à l'élève avec la possibilité de réaliser des chocs élastiques.

Dans les fichiers IP disponibles pour l'activité, la valeur de l'élasticité des objets est nulle pour l'étude des chocs avec accrochage, elle est de un pour l'étude des chocs avec rebonds.

Réponses

1. Observer et analyser

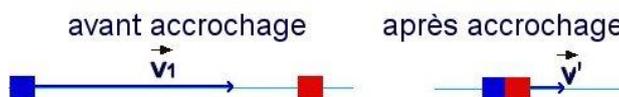
a. Les masses étant constantes, la valeur v' de la vitesse de l'ensemble des deux cubes augmente lorsque la valeur v_1 de la vitesse du cube 1 augmente.

	v_1 (m·s ⁻¹)	v' (m·s ⁻¹)
$m_1 = 50$ g ; $m_2 = 80$ g	4,50	1,73
$m_1 = 50$ g ; $m_2 = 80$ g	9,00	3,46

Lorsque la masse m_2 du cube 2 augmente, les autres paramètres étant constants, la valeur v' diminue :

	m_2 (g)	v' (m·s ⁻¹)
$m_1 = 50$ g ; $v_1 = 9,00$ m·s ⁻¹	50	4,50
$m_1 = 50$ g ; $v_1 = 9,00$ m·s ⁻¹	100	3,00

b.



c. et d. Le premier tableau suggère une relation de proportionnalité entre les valeurs de v_1 et de v' : $v' = kv_1$, k étant une constante de proportionnalité.

Le deuxième tableau suggère que la masse m_2 intervient au dénominateur de la constante de k ; l'expression proposée et validée par plusieurs essais est alors : $v' = \frac{m_1}{m_1 + m_2} v_1$.

Les vecteurs vitesse étant colinéaires, la relation vectorielle retenue est : $\vec{v}' = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \vec{v}_1$.

2. Interpréter

a. Avant l'accrochage : $\vec{p} = m_1 \vec{v}_1 + \vec{0}$.

Après le choc avec accrochage : $\vec{p}' = (m_1 + m_2) \vec{v}'$.

b. La relation retenue à la question 1. d. peut s'écrire : $m_1 \vec{v}_1 = (m_1 + m_2) \vec{v}'$ soit $\vec{p} = \vec{p}'$.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 8. Principe d'inertie et quantité de mouvement

On vérifie que le vecteur quantité de mouvement du système $\{A_1, A_2\}$ constitué par les deux cubes est un vecteur constant.

3. Interpréter et conclure

Exemple de choc avec rebond (l'affichage des vecteurs dans le logiciel *Interactive Physics* est la flèche habituelle, mais la notation des vecteurs vitesse comme \vec{V}_1, \vec{V}_2 est identique pour tous, c'est V) :

Avant le choc

$$p = m_1 v_{1x} + m_2 v_{2x} = 50,0 \times 10^{-3} \times 9,00 - 50,0 \times 10^{-3} \times 4,50 = 0,225 \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Après le choc

$$p' = m_1 v_{1x}' + m_2 v_{2x}' = -50,0 \times 10^{-3} \times 4,50 + 50,0 \times 10^{-3} \times 9,00 = 0,225 \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Les vecteurs \vec{p} et \vec{p}' ayant même direction, même sens et même valeur sont égaux : $\vec{p} = \vec{p}'$.

Le résultat précédent se généralise à toutes les situations : $\vec{p} = \vec{p}'$.

- **avec accrochage** : $m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = (m_1 + m_2) \vec{v}'$, \vec{v}_2 étant le vecteur vitesse du cube 2 ;
- **avec rebond** : $m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}_1' + m_2 \vec{v}_2'$, \vec{v}_1' étant le vecteur vitesse du cube 1 après le choc, \vec{v}_2' étant le vecteur vitesse du cube 2 après le choc.

Le vecteur quantité de mouvement du système $\{A_1, A_2\}$ constitué par les deux cubes est un vecteur constant.

Conclusion

Chaque cube est en mouvement rectiligne uniforme avant et après le choc. D'après le principe d'inertie, la somme des forces qu'ils subissent est nulle. Ils sont dits isolés et le système qu'ils constituent est isolé.

Le vecteur quantité de mouvement d'un système isolé est un vecteur constant.

Activité expérimentale 4. La propulsion par réaction

Commentaires

L'activité regroupe deux expériences :

- la première expérience réalisée avec une voiture jouet introduit la notion de propulsion par réaction ; la vidéo est disponible sur le site compagnon. Elle ne nécessite pas de prérequis ;
- la deuxième expérience utilise le matériel classique de mobiles autoportés constituant un système isolé. L'exploitation proposée nécessite d'avoir déjà introduit le vecteur quantité de mouvement en cours.

Réponses

1. Observer et interpréter

a. On constate que la direction de déplacement de la voiture et la direction de l'éjection de l'air s'effectuent en sens opposé.

Il y a mise en mouvement, c'est-à-dire « propulsion » ; le sens du déplacement justifiant le terme de « réaction ».

b. Dans la vie courante, la propulsion à réaction est observée lorsqu'un ballon de baudruche gonflée est lâché et se dégonfle, ou lorsqu'un tireur perçoit le recul de son arme au moment du tir, etc.

La propulsion à réaction est le mode de propulsion des avions, des fusées, des navettes spatiales qui sont équipés de moteurs à réaction ou de moteurs-fusée.

Le monde animal utilise également ce mode de propulsion : refoulant l'eau de mer par une fente de son corps, la pieuvre peut se propulser pour échapper à ses poursuivants comme un avion à réaction. Les coquilles Saint-Jacques utilisent le même principe en fermant brutalement leurs valves, ce qui chasse l'eau dans un sens et fait faire un petit bond au coquillage dans l'autre sens.

2. Observer et exploiter

Les points repérant la position des centres d'inertie des deux mobiles sont portés par une même droite. Ils sont régulièrement espacés.

- Lorsque les deux mobiles ont la même masse, la distance entre deux points consécutifs relatifs au mobile A, notée d_A , est égale à la distance entre deux points consécutifs relatifs au mobile B, notée d_B :

$$d_A = d_B \text{ avec } d_A = A_0A_1 = A_1A_2 = A_2A_3 = \dots \text{ et } d_B = B_0B_1 = B_1B_2 = B_2B_3 = \dots$$

- Lorsque la masse de A est supérieure à la masse de B, on constate que $d_A > d_B$.

Dans les deux cas, les centres d'inertie sont en mouvement rectiligne et uniforme.

3. Interpréter

a. Le centre d'inertie des mobiles est en mouvement rectiligne et uniforme. Selon le principe d'inertie, les forces qu'ils subissent (poids et force exercée par le coussin d'air) se compensent. Les mobiles sont dits isolés (ou pseudo-isolés). L'ensemble qu'ils constituent est un système isolé.

b. Avant l'éclatement du système, les mobiles sont immobiles : $\vec{p} = \vec{0}$.

c. Après l'éclatement du système :

- Lorsque les masses de A et de B sont égales, les vitesses de A et de B sont égales : $d_A = d_B$, ce qui entraîne $v_A = v_B$ et $m_A v_A = m_B v_B$ donc $p_A = p_B$.

Les vecteurs quantités de mouvement qui ont même direction et même sens que les vecteurs vitesses sont opposés : $\vec{p}_A = -\vec{p}_B$.

On retrouve pour le système étudié : $\vec{p}_A + \vec{p}_B = \vec{0}$.

- Lorsque les masses de A et de B ne sont pas égales, on a de même $m_A v_A = m_B v_B$ donc $p_A = p_B$ et $\vec{p}_A = -\vec{p}_B$ soit $\vec{p}_A + \vec{p}_B = \vec{0}$.

4. Conclure

Avant l'éclatement : $\vec{p} = \vec{0}$.

Après l'éclatement : $\vec{p}' = \vec{p}_A + \vec{p}_B = \vec{0}$.

Au cours de cette deuxième expérience, on constate qu'il y a conservation de la quantité de mouvement du système.

Le système étudié dans l'expérience 1 ne constitue pas un système isolé (existence de frottements). La conclusion ne s'applique pas.

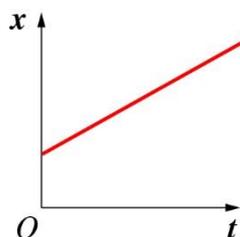
Exercices d'application

5 minutes chrono !

1. Mots manquants

- a. le solide de référence
- b. repère de temps
- c. horloge
- d. la dérivée ; position
- e. le vecteur vitesse
- f. immobile ; uniforme
- g. son vecteur vitesse
- h. système isolé
- i. référentiel galiléen

2. QCM



a. La première représentation (ci-contre) est la représentation de $x(t)$ pour un point en mouvement rectiligne uniforme est une droite :

$$x(t) = v_x t + x_0$$

La deuxième représentation ($x(t) = \text{constante}$) correspond à un point immobile.

La troisième représentation correspond à un point dont la vitesse n'est pas constante.

b. Le passager est en mouvement rectiligne uniforme dans le référentiel terrestre alors qu'il est immobile dans le référentiel du train.

c. $p = mv$, la masse étant en kg et la vitesse en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. $p = 0,100 \times \frac{36}{3,6} = 1,0 \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Compétences exigibles

3. Un objet tombe dans un train en mouvement.

Dans le référentiel du train, la trajectoire de son centre d'inertie est une droite verticale.

Dans le référentiel terrestre, la trajectoire est une courbe, combinaison du mouvement de chute et du mouvement du train.

4. a. À $t_0 = 0 \text{ s}$, $x(t_0) = 1$ et $y(t_0) = 3$.

Le vecteur position est par définition : $\overrightarrow{OA}(t_0) = x(t_0)\vec{i} + y(t_0)\vec{j} = \vec{i} + 3\vec{j}$.

b. Le vecteur vitesse est la dérivée du vecteur position par rapport au temps :

$$\vec{v}(t) = \frac{d\overrightarrow{OA}}{dt} = v_x \vec{i} + v_y \vec{j}$$

et $v_x = \frac{dx}{dt} = 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $v_y = \frac{dy}{dt} = 0$

c. Le vecteur vitesse est un vecteur constant, la trajectoire est une droite et le mouvement est rectiligne uniforme.

5. a. Le vecteur vitesse est la dérivée du vecteur position par rapport au temps.

b. L'expression approchée du vecteur vitesse étant :

$$\vec{v}(t_3) = \frac{A_2 A_4}{2\tau}$$

Le vecteur vitesse à la date t_3 a même direction et même sens que le vecteur $\overrightarrow{A_2 A_4}$.

Sa valeur est donnée par : $v_3 = \frac{A_2 A_4}{2\tau}$.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 8. Principe d'inertie et quantité de mouvement

Pour tout le quadrillage : 13 carreaux représentent 13 cm dans la réalité et mesurent 7,0 cm sur le papier, A_2A_4 représentent x cm dans la réalité et mesure 2,4 cm sur le papier ; la règle de proportionnalité permet écrire :

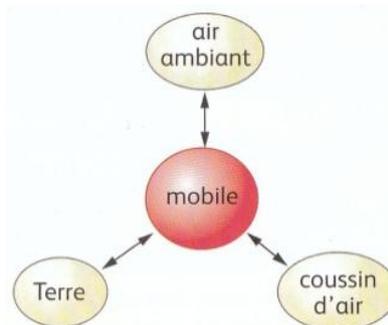
$$\frac{x}{13} = \frac{2,4}{7,0} \rightarrow x = \frac{13 \times 2,4}{7,0} = 4,5 \text{ cm}$$

$$v_3 = \frac{4,5 \times 10^{-2}}{2 \times 40 \times 10^{-3}} = 0,56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- 6. a.** Le tracé correspondant au centre d'inertie du mobile est celui du traceur « B ».
b. Le tracé correspondant au centre d'inertie est formé de points alignés et régulièrement répartis : le mouvement du centre d'inertie est rectiligne uniforme. D'après le principe d'inertie, le système étudié dans un référentiel considéré comme galiléen est alors un système isolé si :

$$\vec{v}_G = \vec{ct} \text{ alors } \sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{0}.$$

- c.** Le mobile autoporteur est en interaction avec la Terre, le coussin d'air et l'air ambiant d'où le diagramme suivant :
 L'action due à la Terre est modélisée par le poids \vec{P} , l'action du coussin d'air par une force \vec{R} . En négligeant l'action de l'air ambiant : $\vec{R} + \vec{P} = \vec{0}$ soit $\vec{R} = -\vec{P}$.



- 7. a.** Le vecteur quantité de mouvement d'un point matériel de masse m et animé d'une vitesse \vec{v} est : $\vec{p} = m\vec{v}$.

Le vecteur quantité de mouvement d'un système matériel est égale à la somme des vecteurs quantités de mouvement des n points matériels qui le constituent : $\vec{p} = \sum_{i=1}^n \vec{p}_i$.

b. $p = mv = 1,0 \times 10^3 \times \frac{120}{3,6} = 3,3 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

c. On note M , la masse du camion et V , sa vitesse.

$$p = mv = MV ; \text{ d'où } V = \frac{m}{M} v. \text{ A.N. : } V = \frac{1}{30} \times 120 = 4,0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}.$$

- 8. a.** Dans le référentiel terrestre considéré comme galiléen, on étudie le système constitué par les deux patineurs.

b. Avant qu'ils ne se repoussent, les patineurs sont immobiles, leur quantité de mouvement est nulle. La quantité de mouvement du système est alors nulle : $\vec{p} = \vec{0}$.

Lorsque A et B se sont repoussés, la quantité de mouvement du système est : $\vec{p} = \vec{p}_A + \vec{p}_B$.

Les frottements étant négligeables, chaque patineur est soumis à deux forces qui se compensent, son poids et la réaction du sol : le système étudié est isolé.

Dans ce cas, il y a conservation de la quantité de mouvement : $\vec{p} = \vec{p}$ soit $\vec{0} = \vec{p}_A + \vec{p}_B$.

Les vecteurs quantité de mouvement de A et de B sont opposés : $\vec{p}_A = -\vec{p}_B$.

c. L'égalité précédente se traduit par :

$$m_A \vec{v}_A(t) = -m_B \vec{v}_B(t) \text{ soit } \vec{v}_B(t) = -\frac{m_A}{m_B} \vec{v}_A(t)$$

Les vecteurs vitesse ont même direction mais des sens opposés.

$$\text{Si } v_A = 4,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, v_B = \frac{m_A}{m_B} v_A = \frac{50}{80} \times 4,0 = 2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Compétences générales

9. On exprime la durée 32 millions d'années en seconde :

$\Delta t = 32 \text{ millions d'années} = 32 \times 10^6 \times 365 \text{ jours} = 32 \times 10^6 \times 365 \times 24 \times 3600 = 1,0 \times 10^{15} \text{ s}$.
Il y a le même rapport (10^{15}) entre une femtoseconde et une seconde, et entre une seconde et 32 millions d'années.

10. a. R. Feynman décrit ses observations dans un référentiel lié au chariot.

b. Son père se place dans le référentiel terrestre.

c. Le système étudié est le ballon. Il est soumis à son poids et à la réaction du support, les deux forces se compensent, il est donc isolé.

D'après le principe d'inertie, le centre d'inertie du ballon est soit immobile, soit en mouvement rectiligne uniforme dans un référentiel galiléen :

- si le chariot et le ballon sont initialement immobiles, lorsque l'on tire le chariot, le ballon garde sa position dans le référentiel terrestre, il « recule » dans le référentiel du chariot qui n'est pas galiléen ;

- si le chariot est en mouvement rectiligne uniforme, et qu'on l'arrête brusquement, le ballon persévère dans son mouvement rectiligne uniforme dans le référentiel terrestre galiléen. Il se précipite vers l'avant dans le référentiel du chariot qui n'est pas galiléen.

11. La masse du gros poisson est notée M , celle du petit poisson m .

On étudie la quantité de mouvement du système constitué par les deux poissons « avant » puis « après » que le gros poisson est avalé le petit.

Le système étant supposé isolé, la conservation de la quantité de mouvement donne :

$$\begin{aligned} \vec{p}_{\text{avant}} &= \vec{p}_{\text{après}} \\ M\vec{V} &= (M + m)\vec{V}' \\ V' &= \frac{M}{M+m} V = \frac{\frac{M}{m}}{\frac{M}{m}+1} V = \frac{4}{4+1} \times 5 = 4 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1} \end{aligned}$$

12. a. Les trajectoires sont des droites. Les points sont régulièrement répartis : les vitesses sont constantes. A et B sont donc en mouvement rectiligne uniforme.

b. La vitesse est $v = \frac{d}{\Delta t}$, d étant la distance parcourue pendant un intervalle de temps Δt .

La distance parcourue par B est plus grande que la distance parcourue par A pendant le même intervalle de temps Δt donc : $v_B > v_A$.

B est le mobile qui a acquis la plus grande vitesse.

c. Les quantités de mouvement étant égales, $p_A = p_B$ soit $m_A v_A = m_B v_B$.

Si $v_B > v_A$, $m_B < m_A$.

A est le mobile le plus lourd.

Exercices de méthode

13. Exercice résolu.

14. a. Le mouvement est rectiligne uniforme : $\vec{v}_G = \vec{c}te$.

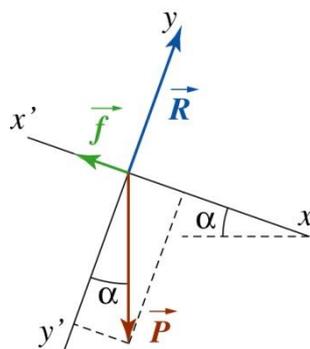
b. D'après le principe d'inertie, le référentiel terrestre étant considéré galiléen, si $\vec{v}_G = \vec{c}te$ alors $\Sigma \vec{F}_{ext} = \vec{0}$.

Le système étudié est alors isolé.

c. Le skieur est en interaction avec la Terre, le sol et l'air.

Il subit trois actions modélisées respectivement par le poids \vec{P} , la réaction \vec{R} et la force de frottement \vec{f} .

d.



e. D'après le principe d'inertie : $\vec{P} + \vec{R} + \vec{f} = \vec{0}$.

Suivant l'axe $x'x$ parallèle à la pente et l'axe $y'y$ normal à la pente :

$$P_x + R_x + f_x = 0 \quad P \sin \alpha + 0 - f = 0$$

$$P_y + R_y + f_y = 0 \quad -P \cos \alpha + R + 0 = 0$$

La force \vec{f} est telle que $\vec{f} = -f \vec{i}$ de valeur $f = P \sin \alpha$.

A.N. : $f = 70 \times 9,8 \times \sin 20^\circ = 2,3 \times 10^2 \text{ N}$.

15. a. Par rapport au référentiel terrestre, l'échelle est en mouvement rectiligne uniforme.

Par rapport au référentiel du camion, l'échelle est immobile.

b. L'échelle est le système étudiée : elle est soumise à son poids et à la réaction du support.

Dans le référentiel terrestre considéré galiléen, elle est en mouvement rectiligne uniforme.

D'après le principe d'inertie, elle constitue un système isolé : les deux forces se compensent.

Le raisonnement peut être effectué dans le référentiel du camion qui est aussi galiléen quand le camion est en mouvement rectiligne uniforme.

c. Lorsque le camion freine, l'étude du système est identique à celle réalisée dans la question b. dans le référentiel terrestre : l'échelle persévère dans son mouvement et se déplace donc vers l'avant du camion qui ralentit. Par contre, le référentiel du camion n'est plus galiléen et le principe d'inertie ne s'applique plus

d. Dans le référentiel terrestre, l'échelle est toujours le système étudié. Elle n'est soumise qu'à son poids. Le principe d'inertie ne s'applique pas car elle ne constitue pas un système isolé. Son centre d'inertie ne peut pas être en mouvement rectiligne uniforme.

Exercices d'entraînement

16. a. L'enregistrement du mouvement de A donne des points alignés et équidistants : le mouvement est rectiligne et uniforme. La vitesse de A est calculée non pas sur un mais sur quatre intervalles de temps pour une plus grande précision :

$$v_A = \frac{2,2 \times 10^{-2} \times 3}{4 \times 2,0 \times 10^{-2}} = 0,83 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

On détermine de même la vitesse de B :

$$v_B = \frac{1,6 \times 10^{-2} \times 3}{4 \times 2,0 \times 10^{-2}} = 0,60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Les trajectoires de A et de B sont colinéaires, les vecteurs vitesse de A et de B ont donc même direction mais des sens opposés.

b. Le vecteur quantité de mouvement de A est par définition $\vec{p}_A = m_A \vec{v}_A$.

Il a même direction et même sens que le vecteur vitesse de A ; sa valeur est :

$$p_A = m_A v_A = 0,720 \times 0,83 = 0,60 \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}.$$

De même le vecteur quantité de mouvement de B est par définition : $\vec{p}_B = m_B \vec{v}_B$.

Il a même direction et même sens que le vecteur vitesse de B ; sa valeur est :

$$p_B = m_B v_B = 0,980 \times 0,60 = 0,59 \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}.$$

c. Les vecteurs quantité de mouvement ont même direction et des sens opposés comme les vecteurs vitesse, leurs valeurs sont quasi égales : $\vec{p}_A = -\vec{p}_B$.

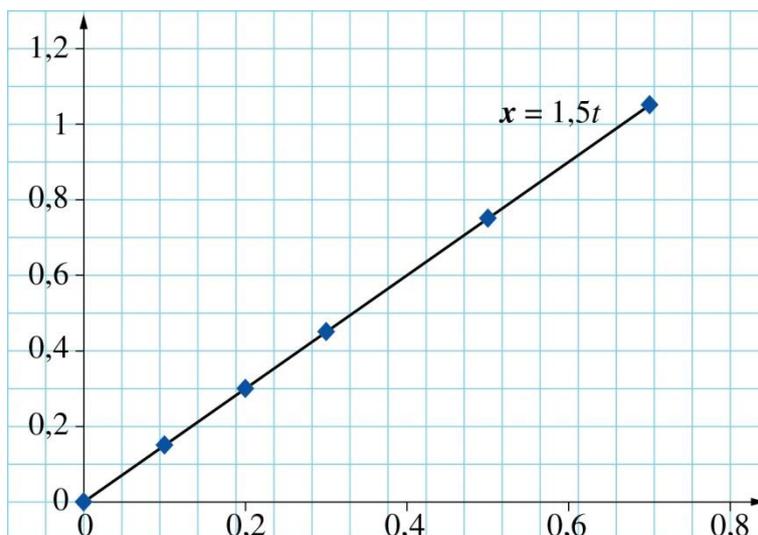
La conservation de la quantité de mouvement avant et après l'explosion du système constitué par les deux mobiles impose que $\vec{p}_{\text{avant}} = \vec{p}_{\text{après}}$.

Les mobiles avant l'explosion étant immobiles : $\vec{p} = \vec{0}$.

Après l'explosion, l'étude de l'enregistrement montre que : $\vec{p}_A + \vec{p}_B = \vec{0}$.

On a bien $\vec{p}_{\text{avant}} = \vec{p}_{\text{après}}$.

17. a. $x(t) = 1,5t$.



b. $v_x = \frac{dx}{dt} = 1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $v_y = \frac{dy}{dt} = 0$.

c. Le vecteur vitesse est un vecteur constant, la trajectoire est une droite et le mouvement est rectiligne uniforme.

18. a. Le livre est en interaction avec la table et avec la Terre. On néglige l'action de l'air ambiant.

Les actions mécaniques qu'il subit sont : le poids \vec{P} et la réaction du support \vec{R} .

Étant immobile dans le référentiel terrestre supposé galiléen, $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$; les deux forces sont opposées.



b. La table étant inclinée, la force \vec{R} n'est plus normale à la table, il y a nécessairement des frottements. La représentation des forces n'est pas modifiée.

19. a. Le mouvement est rectiligne uniforme si le vecteur vitesse est un vecteur constant :

$$\vec{v} = \vec{c}te$$

Le mouvement est étudié dans le référentiel terrestre considéré galiléen.

b. Les actions mécaniques qui s'exercent sur le système constitué par le parachutiste et son parachute sont : l'action exercée par l'air et l'action exercée par la Terre.

c. D'après le principe d'inertie, le mouvement étant rectiligne uniforme, le système est isolé :

$$\vec{F} + \vec{P} = \vec{0} \text{ soit } \vec{F} = -\vec{P}$$

Le poids \vec{P} est une force verticale dirigée vers le bas, de valeur $P = mg$;

$$P = 90 \times 9,8 = 8,8 \times 10^2 \text{ N}$$

La force \vec{F} est une force verticale dirigée vers le haut, de valeur $F = P$; $F = 8,8 \times 10^2 \text{ N}$.

d. La distance parcourue est $d = 400 \text{ m}$ et la durée est $\Delta t = 1 \text{ min } 30 \text{ s} = 90 \text{ s}$.

La vitesse du parachutiste est $v = \frac{d}{\Delta t}$.

$$v = \frac{400}{90} = 4,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

20. a. Vrai ; la quantité de mouvement est une grandeur vectorielle.

b. Faux ; l'unité de la valeur de la quantité de mouvement est $\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

c. Vrai ; mais un objet a une quantité de mouvement lorsqu'il se déplace même si sa vitesse n'est pas constante.

d. Faux ; le vecteur quantité de mouvement a même direction et même sens que le vecteur vitesse.

e. Faux ; le vecteur quantité de mouvement d'un système ne se conserve que si le système est isolé.

f. Vrai ; le vecteur quantité de mouvement varie comme le vecteur vitesse.

g. Vrai ; si $v_1 = v_2$ mais $m_1 > m_2$ alors $p_1 > p_2$.

h. Faux ; si $m_1 < m_2$ mais $v_1 \gg v_2$, alors p_1 peut être plus grand que p_2 .

21. a. On note \vec{p}_{avant} la quantité de mouvement du système avant l'accrochage et $\vec{p}_{\text{après}}$ la quantité de mouvement du système après l'accrochage. Le système constitué par le wagon et la motrice est supposé isolé :

$$\vec{p}_{\text{avant}} = \vec{p}_{\text{après}}$$

$$p_{\text{avant}} = p_{\text{après}} = m_1 v_1 + m_2 v_2$$

$$p_{\text{avant}} = 100 \times 10^3 \times \frac{4,0}{3,6} = 1,1 \times 10^5 \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 8. Principe d'inertie et quantité de mouvement

b. Après l'accrochage, la vitesse du convoi étant noté v' : $m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v'$

d'où $v' = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} = \frac{m_1 v_1}{m_1 + m_2}$ avec $v_2 = 0$.

A.N. : $v' = \frac{100 \times 10^3 \times 4,0}{(100 \times 10^3 + 20 \times 10^3)} = 3,3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

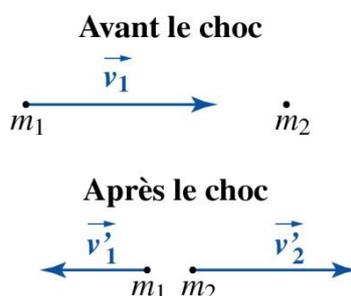
c. Cas 2 : $v' = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$ avec $v_2 = 2,0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. A.N. : $v' = 3,7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Cas 3 : le wagon se déplace en sens inverse de la motrice, la coordonnée de sa quantité de mouvement sur un axe orienté dans le sens du mouvement de la motrice sera $-m_2 v_2$. Ainsi :

$$v' = \frac{m_1 v_1 - m_2 v_2}{m_1 + m_2} \text{ avec } v_2 = 2,0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}. \text{ A.N. : } v' = 3,0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

22. L'exploitation consiste à schématiser la situation avant le choc puis après le choc (le choc s'effectuant sur un banc, les vecteurs vitesses sont colinéaires), puis à exprimer le vecteur quantité de mouvement du système avant et après le choc.

La quantité de mouvement est calculée avant puis après le choc. Si les deux valeurs sont égales, on pourra conclure qu'il y a conservation de la quantité de mouvement pour le système.



Le vecteur quantité de mouvement avant le choc est :

$$\vec{p}_{\text{avant}} = m_1 \vec{v}_1$$

Le vecteur quantité de mouvement après le choc est :

$$\vec{p}_{\text{après}} = m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2$$

En tenant compte du sens des vecteurs vitesses, on a :

$$p_{\text{avant}} = m_1 v_1$$

$$p_{\text{après}} = -m_1 v'_1 + m_2 v'_2$$

A.N. : $p_{\text{avant}} = 0,100 \times 5,0 = 5,0 \times 10^{-1} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

$p_{\text{après}} = -0,100 \times 1,0 + 0,150 \times 4,0 = 5,0 \times 10^{-1} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

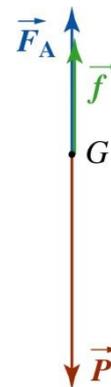
Il y a conservation de la quantité de mouvement pour le système.

23. 1. a. $\vec{P} = m\vec{g} = \rho_S V g \vec{j}$.

$\vec{F}_A = -\rho_{gly} V g \vec{j}$.

$\vec{f} = -k\eta R v \vec{j}$.

b. Représentation vectorielle ci-contre.



2.a. La bille est en mouvement rectiligne uniforme.

$$v_{lim} = \frac{L}{\Delta t}$$

b. D'après le principe d'inertie, la bille étant en mouvement rectiligne uniforme, la bille constitue un système isolé :

$$\vec{P} + \vec{F}_A + \vec{f} = \vec{0}$$

c. En projection sur l'axe vertical, la relation vectorielle donne :

$$\rho_S V g - \rho_{gly} V g - k\eta R v_{lim} = 0$$

$$k\eta R v_{lim} = \rho_S V g - \rho_{gly} V g = V g (\rho_S - \rho_{gly})$$

$$\eta = \frac{V g (\rho_S - \rho_{gly})}{k R v_{lim}}$$

$$\eta = \frac{V g (\rho_S - \rho_{gly})}{k R L} \Delta t \text{ et en posant } C = \frac{V g}{k R L}, \text{ on a } \eta = C (\rho_S - \rho_{gly}).$$

A.N. : $\eta = 7,84 \times 10^{-4} \times (7850 - 1260) \times 0,29 = 1,5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

Exercices de synthèse

24. Dans un référentiel galiléen, le vecteur quantité de mouvement d'un système isolé est un vecteur constant.

Étudions le système constitué par le neutron et le noyau d'hélium.

Avant le choc, la quantité de mouvement est celle du neutron de masse m_n animé de la vitesse \vec{v} :

$$\vec{p}_{avant} = m_n \vec{v}$$

Après le choc, la quantité de mouvement est celle du noyau d'hélium de masse m_{He} animé de la vitesse \vec{v}_1 et celle du neutron de masse m_n animé de la vitesse \vec{v}_2 .

$$\vec{p}_{après} = m_{He} \vec{v}_1 + m_n \vec{v}_2$$

Le système constitué par le neutron et le noyau d'hélium étant supposé isolé et le référentiel d'étude étant supposé galiléen, la quantité de mouvement de ce système se conserve :

$$\vec{p}_{avant} = \vec{p}_{après} ; \text{ ce qui donne : } m_n \vec{v} = m_{He} \vec{v}_1 + m_n \vec{v}_2$$

Les vitesses étant colinéaires, la relation vectorielle projetée selon la direction de la trajectoire des particules est :

$$m_n v = m_{He} v_1 - m_n v_2$$

On en déduit le rapport des masses :

$$\frac{m_{He}}{m_n} = \frac{v + v_2}{v_1}$$

L'application numérique donne :

$$\frac{m_{\text{He}}}{m_n} = \frac{1,0 \times 10^6 + 6,0 \times 10^5}{4,0 \times 10^5} = 4$$

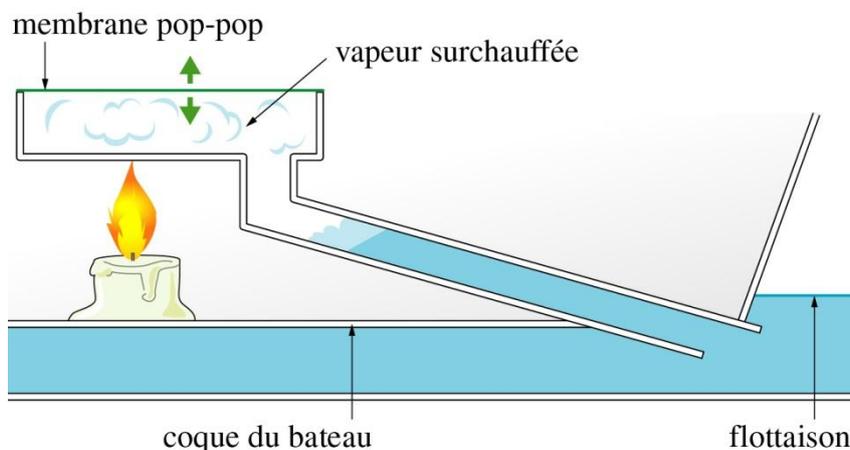
Soit $m_{\text{He}} = 4m_n$.

25. a. Le moteur pop-pop est formé d'un petit réservoir situé dans le bateau et relié à deux fines tubulaires qui aboutissent sous le niveau de l'eau, à l'arrière du bateau.

Le réservoir et les tubulures sont remplis d'eau avant le démarrage.

Une bougie allumée est placée sous le réservoir. L'eau qu'il contient chauffe, se vaporise provoquant une déformation de la membrane souple qui ferme le réservoir à sa partie supérieure. On entend alors un bruit : « pop ». Simultanément, de l'eau est éjectée par les tubulures et le bateau avance. La pression ayant diminué dans le réservoir, la membrane se déforme dans l'autre sens, de l'eau rentre dans le réservoir et le cycle recommence.

Le bateau avance en faisant « pop-pop » tant que la bougie brûle.



b. Au démarrage du bateau, la conservation de la quantité de mouvement s'écrit :

$$\vec{p}_{\text{eau éjectée}} + \vec{p}_{\text{bateau}} = \vec{0} \text{ soit } \vec{p}_{\text{bateau}} = -\vec{p}_{\text{eau éjectée}}$$

Les vecteurs quantités de mouvement sont opposés, il y a propulsion par réaction.

26. a. La quantité de mouvement du système constitué par les deux protons s'écrit :

$$\vec{p}_{\text{avant}} = m \vec{v}_1, \text{ avant la collision}$$

$$\vec{p}_{\text{après}} = m \vec{v}_1' + m \vec{v}_2', \text{ après la collision}$$

Le système étant supposé isolé et le référentiel d'étude étant galiléen, la quantité de mouvement de ce système se conserve :

$$\vec{p}_{\text{avant}} = \vec{p}_{\text{après}} \text{ soit } m \vec{v}_1 = m \vec{v}_1' + m \vec{v}_2' \text{ et en simplifiant par } m :$$

$$\vec{v}_1 = \vec{v}_1' + \vec{v}_2' \text{ (relation 1)}$$

b. La conservation de l'énergie cinétique donne :

$$\frac{1}{2} m v_1^2 = \frac{1}{2} m v_1'^2 + \frac{1}{2} m v_2'^2$$

soit après simplification :

$$v_1^2 = v_1'^2 + v_2'^2 \text{ (relation 2)}$$

c. La relation 1 élevée au carré devient :

$$(\vec{v}_1)^2 = (\vec{v}_1' + \vec{v}_2')^2$$
$$v_1^2 = v_1'^2 + v_2'^2 + 2 \vec{v}_1' \cdot \vec{v}_2' \quad (\text{relation 3})$$

En utilisant la relation 2, on obtient :

$$0 = \vec{v}_1' \cdot \vec{v}_2'$$

Le produit scalaire des deux vecteurs étant nul, l'angle entre les deux vecteurs est un angle droit :

$$\theta + \psi = 90^\circ ; \text{ avec } \theta = 30^\circ, \psi = 60^\circ$$

d. En présence d'une impureté, la collision ne se produit pas avec un angle de 90° entre les deux directions. Dans ce cas, les détecteurs placés à 90° l'un de l'autre ne détectent pas simultanément un signal.

27. Exemple de rédaction d'une synthèse de documents

La propulsion par réaction est fondée sur la loi de conservation de la quantité de mouvement d'un système, système constitué par un véhicule et le fluide qu'il va éjecter. À l'éjection du fluide correspond une quantité de mouvement \vec{p} qui communique au véhicule une quantité de mouvement opposée $-\vec{p}$.

Les moteurs à réaction sont des dispositifs utilisés en aéronautique et mis au point dans les années 1930. La combustion d'un carburant produit des gaz qui sont éjectés vers l'arrière et à grande vitesse par les tuyères provoquant la propulsion vers l'avant.

Pour la combustion, le comburant peut être l'oxygène de l'air, injecté dans le moteur puis comprimé ; le véhicule peut aussi avoir des réserves de comburant et de carburant, de sorte que le moteur est autonome. C'est le cas des moteurs-fusée utilisés pour la propulsion spatiale.

On note que bien avant les premiers vols dans l'espace, le physicien russe Konstantin Tsiolkovski a expliqué comment la propulsion par réaction pouvait fonctionner dans le vide.

La propulsion par réaction est également utilisée pour permettre des déplacements d'un astronaute dans l'espace, hors de son vaisseau. Le dispositif appelé SAFER éjecte du diazote à grande vitesse et propulse l'astronaute dans le sens contraire du jet.

Le jet ski est une autre illustration de la propulsion par réaction, l'eau étant dans ce cas le fluide éjecté.

Pour permettre à l'homme de voler, les inventeurs ont mis au point différents dispositifs, les jetpack ou réacteurs dorsaux toujours fondés sur le même principe de la propulsion par réaction. Du Bell Rocketbelt au Martin Jetpack, les possibilités offertes par ces appareils demeurent à ce jour limitées. Cependant leur autonomie s'améliore (2h pour le Martin Jetpack), l'altitude atteinte augmente (1500 m lors d'essais en 2011 pour le Martin Jetpack) permettant d'envisager des applications pratiques de ces engins.

Envisagé pour une utilisation sportive et/ou ludique, le Jetlev-Flyer a la particularité d'utiliser de l'eau pour se propulser.

Chapitre 9 – Lois de Newton

Manuel pages 181 à 202

Choix pédagogiques

Ce chapitre fait partie de l'ensemble des trois chapitres consacrés aux lois de Newton et à leur mise en œuvre dans l'étude de mouvements. Nous avons choisi :

- d'introduire ici le concept d'accélération ainsi que les deuxième et troisième lois de Newton ;
- de ne traiter que les cas de mouvements d'objets se déplaçant dans des champs uniformes (de pesanteur et électrique).

Dans ce deuxième chapitre traitant de la mécanique, conformément au programme, nous avons privilégié l'étude de mouvements de points matériels, mais lorsque le système étudié ne pouvait être modélisé par un point matériel, nous avons été amenés à analyser le mouvement du centre d'inertie du système.

La première activité documentaire proposée introduit le concept d'accélération. Puis, à l'aide des activités expérimentales et de simulation, les élèves mettent en œuvre les lois de Newton, étudient des mouvements rectilignes et paraboliques et apprennent à reconnaître leurs caractéristiques.

Dans ce chapitre, afin d'aider les élèves dans leur apprentissage, nous avons tout particulièrement développé l'articulation entre les différentes représentations (dessins, schéma, représentations vectorielles, représentations graphiques en fonction du temps, de la position).

Des animations, des simulations, des vidéos documentaires et d'expériences illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et, certaines d'entre elles, sur les sites Internet compagnon Sirius.

Page d'ouverture

Les trajectoires complexes des points lumineux que l'on observe sur la photographie sont une introduction à ce qui est essentiel dans ce chapitre : la mise en œuvre des lois de Newton pour étudier des mouvements.

Activités

Activité documentaire 1. Vitesse et accélération

Commentaires

L'objectif de cette activité documentaire est de donner du sens au concept d'accélération en s'appuyant sur des situations connues des élèves. Seules les notions de valeur de l'accélération et d'accélération moyenne sont abordées dans cette première approche.

Réponses

1. Analyser et exploiter les documents

a. L'accélération moyenne du train est de $a = \frac{53}{3.8}$ soit $a = 14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

L'accélération est donc plus de 10 fois plus importante que l'accélération de confort d'un ascenseur. On a bien des émotions très fortes !

b. Pour atteindre la vitesse maximale de $18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, il faudra une durée de $\Delta t = \frac{|\Delta v|}{a} = \frac{18}{1,2}$ soit :

$$\Delta t = 15 \text{ s}$$

L'article publié sur le site Internet suivant met en évidence les difficultés techniques à surmonter dans la conception d'ascenseurs de très grande hauteur :

<http://www.usinenouvelle.com/article/les-ascenseurs-a-l-assaut-de-la-tres-grande-hauteur.N49326>

2. Faire une recherche

La difficulté de la recherche réside essentiellement sur le vocabulaire employé dans les articles (« accélération de 9G », « force de 7G », « le sang devient aussi lourd que du fer »...), vocabulaire qui mixe mais ne différencie pas différents concepts de physique (notamment l'accélération, la force/le poids). C'est pourquoi nous avons précisé ce que représente l'unité d'accélération G employée (1G = accélération d'un objet tombant en chute libre soit $1\text{G} \approx 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$).

a. Une recherche sur Internet fournit de nombreux sites sur les accélérations atteintes lors de vols par les pilotes de chasse (9G) et les traumatismes que ces derniers peuvent endurer (troubles de la vision, pertes de connaissance, problème de circulation sanguine, etc). Des vidéos tournées dans des simulateurs de vol montrent ces limites physiologiques (voir par exemple la vidéo sur You Tube « centrifugeuse 9G Blackout GLOC »).

Les astronautes subissent également des accélérations très importantes (du même ordre de grandeur que les pilotes de chasse) et suivent un entraînement pour s'y habituer.

Plusieurs moyens sont utilisés pour prévenir les troubles (graves) dus aux fortes accélérations :

- entraînement sur des simulateurs (centrifugeuses humaines) ;
- port d'une combinaison anti-G qui permet de limiter les troubles durant les vols.

Des sites fournissent des données sur l'entraînement et les centrifugeuses comme par exemple :

<http://www.cnes.fr/web/CNES-fr/7278-l-homme-dans-l-espace.php#question2>

<http://www.atlasaerospace.net/eng/centr-tech.htm>.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 9. Lois de Newton

Remarque : dans le chapitre 10, une activité porte sur les caractéristiques de l'accélération dans une centrifugeuse. On y retrouve explicitement le lien entre l'accélération exprimée en $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ et l'accélération exprimée en G.

b. Si l'on choisit comme référence pour les pilotes et astronautes une accélération de 9G, soit environ $90 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, on obtient pour le *Top thrill dragster* :

$$\frac{a_{\text{dragster}}}{a_{\text{pilote}}} = 16 \%$$

L'accélération calculée pour la cabine du *Top thrill dragster* représente environ 15 % de l'accélération que peuvent subir les pilotes de chasse ou de navettes spatiales.

Pour les ascenseurs du *Burj Kalifa* :

$$\frac{a_{\text{asc}}}{a_{\text{pilote}}} = 1,3 \%$$

L'accélération de l'ascenseur ne représente que 1 % de l'accélération que peuvent subir les pilotes de chasse ou de navettes spatiales.

Activité expérimentale 2. Mouvements rectilignes uniformément variés

Commentaires

Les objectifs de la première partie de l'activité, qui reposent sur des simulations, sont :

- d'une part d'introduire les conditions que doivent réaliser les vecteurs vitesse et accélération pour que le mouvement d'un point soit rectiligne uniformément varié ;
- d'autre part de faire le lien entre les propriétés de ces vecteurs et les représentations graphiques de $a_x(t)$ et $v_x(t)$.

Après cette première partie d'appropriation de nouvelles connaissances qui peut être réalisée rapidement par les élèves, dans la seconde partie, les élèves doivent réinvestir ces connaissances pour analyser un enregistrement vidéo de la chute verticale d'une bille lancée vers le haut. L'objectif n'est pas de réaliser le film mais de l'exploiter en lien avec le travail fait dans la première partie.

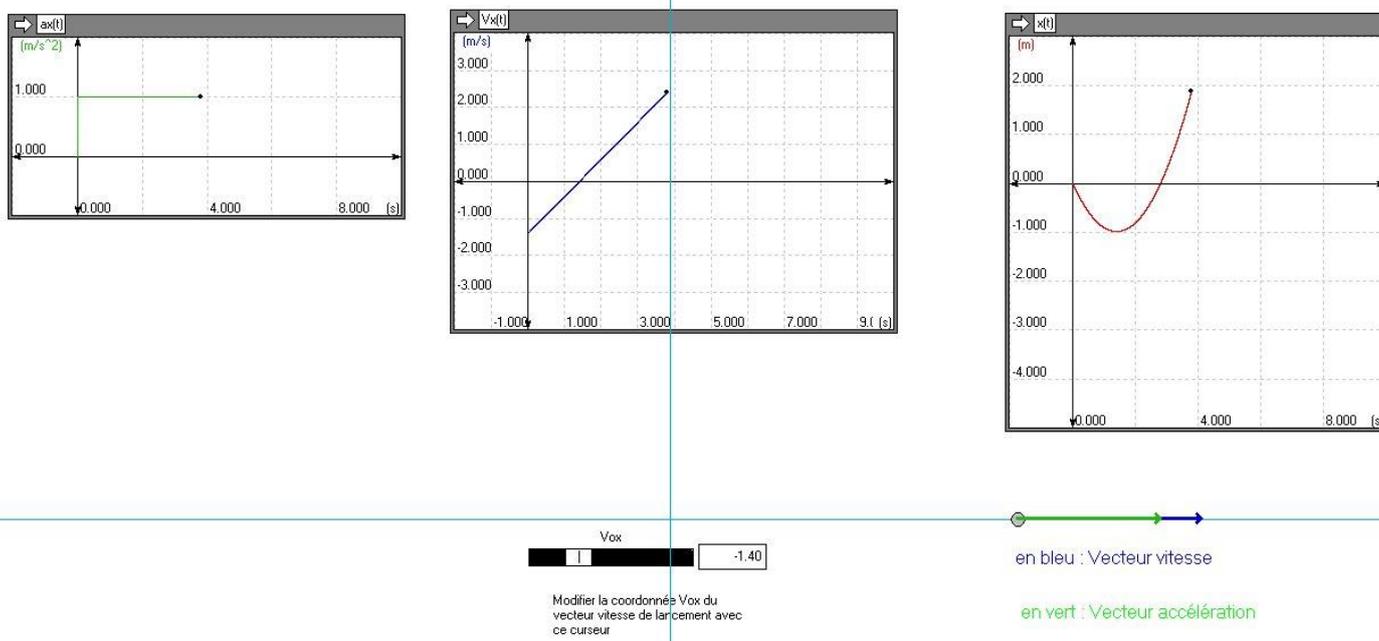
Pour pouvoir réaliser cette activité en autonomie, le concept d'accélération et son lien avec la vitesse doivent être acquis par les élèves.

Réponses

1. Interpréter

Dans la première simulation, les élèves peuvent modifier la direction et la valeur du vecteur vitesse mais n'ont pas directement accès à l'accélération qui reste constante. Par essais successifs, ils arrivent à la conclusion que lorsque le mouvement est rectiligne, \vec{a} et \vec{v} sont colinéaires.

Avec la deuxième simulation, à travers l'analyse et l'interprétation des courbes $a_x(t)$, $v_x(t)$ et $x(t)$, les élèves étudient la nature des mouvements uniformément variés.



Cette analyse permet de différencier la courbe $x(t)$ (position du point mobile en fonction du temps) de la courbe représentant la trajectoire du point (ici rectiligne).

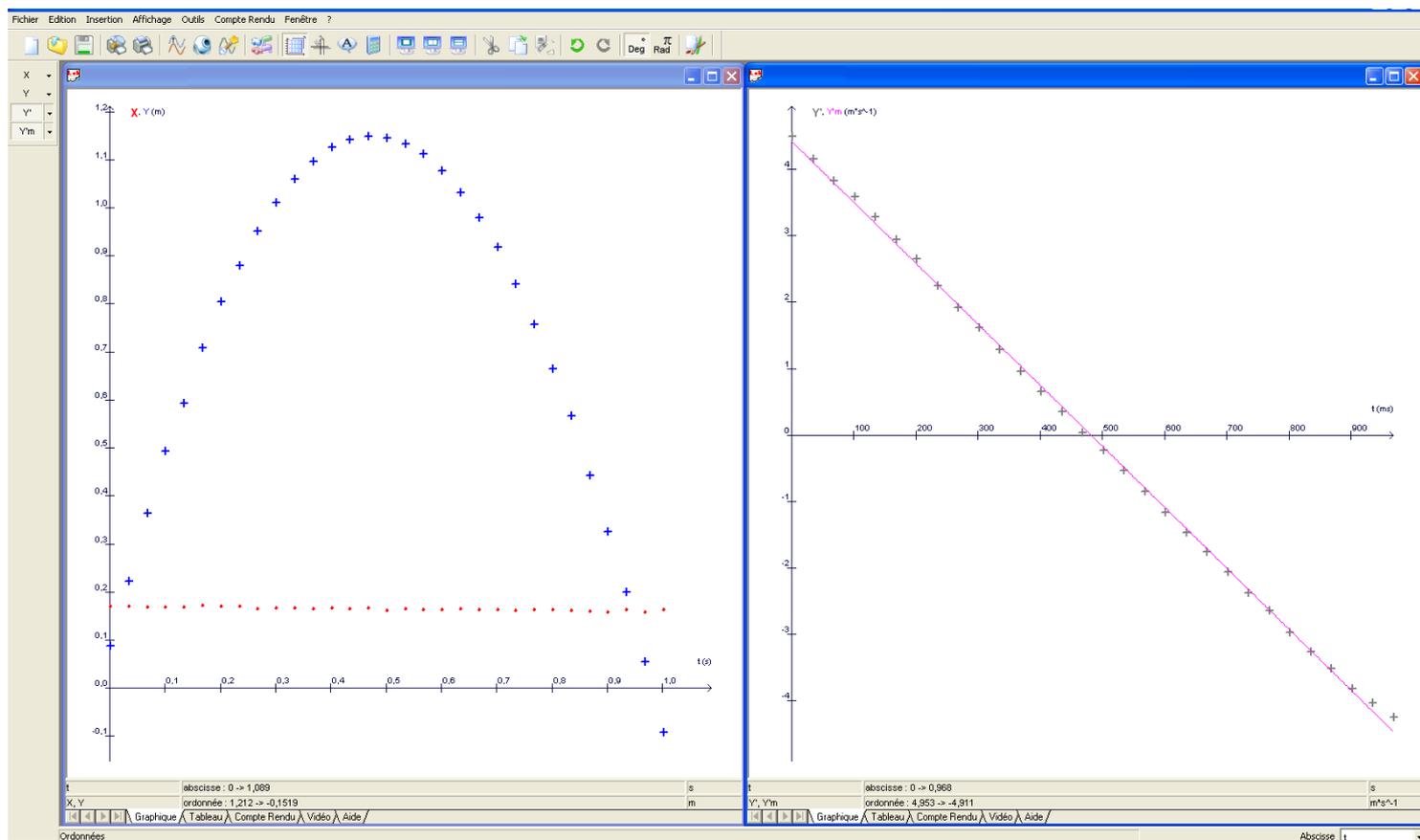
2. Exploiter et conclure

Dans cette activité expérimentale, les élèves réinvestissent les connaissances liées à la vitesse et à l'accélération, mais le travail demandé à ce stade ne fait pas encore intervenir les lois de Newton pour comparer explicitement l'accélération du centre de la balle et l'accélération de la pesanteur.

Remarque : les questions portent sur l'évolution de $v_y(t)$ qui est plus facilement exploitable que $a_y(t)$ car cette dernière est généralement bruitée et plus difficile à interpréter.

Les élèves pointent les positions successives de la balle et obtiennent un tableau de mesures avec les valeurs de t , x et y . Selon le pointage, les valeurs de l'abscisse x peuvent légèrement varier (notamment selon la qualité du pointage) autour d'une valeur dépendant du choix de l'origine. On vérifie ainsi que le mouvement du centre de la balle est rectiligne de direction verticale, ce qui explique le choix de l'étude selon l'axe vertical ($O ; \vec{j}$) orienté vers le haut.

Avec le logiciel de traitement des données, les élèves créent la nouvelle grandeur v_y et affichent ensuite $v_y(t)$.



- L'interprétation de cette courbe permet de faire le lien entre le signe de v_y et le sens du déplacement de la balle et donc de repérer l'instant où la balle atteint le sommet de la trajectoire ;

- La courbe qui passe au mieux entre les points expérimentaux étant une droite, $v_y(t)$ est une fonction affine du temps. Cette propriété permet de déduire que :

- $a_y = \frac{dv_y}{dt}$ étant une constante, le mouvement de la balle est rectiligne uniformément varié ;

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 9. Lois de Newton

- les caractéristiques (direction, sens, valeur) du vecteur accélération. On peut alors faire le rapprochement avec le vecteur \vec{g} , intensité de la pesanteur, connu des élèves.

On déduit que le mouvement du centre de la balle est rectiligne, suivant la verticale du point de lancer, uniformément varié. Le vecteur accélération constant a une direction verticale, son sens est vers la Terre et sa valeur est voisine de $9,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Remarque : la valeur obtenue pour l'accélération est inférieure à celle de g dans un rapport de 6 %. L'objet étudié étant une balle de tennis, le modèle du point matériel peut être discuté car les forces telles que la force de frottement et la poussée d'Archimède ne sont sans doute pas négligeables devant le poids de la balle.

Entre les dates $t = 0 \text{ s}$ et $t = 0,48 \text{ s}$, le sens du vecteur vitesse est vers le haut, il est de sens opposé au vecteur accélération : le mouvement du centre de la balle est décéléré.

Pour $t > 0,48 \text{ s}$, les deux vecteurs vitesse et accélération ont même sens : le mouvement du centre de la balle est accéléré.

Une représentation de la trajectoire, des vecteurs vitesse et des vecteurs accélération en un point de la phase de mouvement décéléré et en un point de la phase de mouvement accéléré permet de compléter la synthèse des résultats.

Activité expérimentale 3. Chute dans un champ de pesanteur uniforme

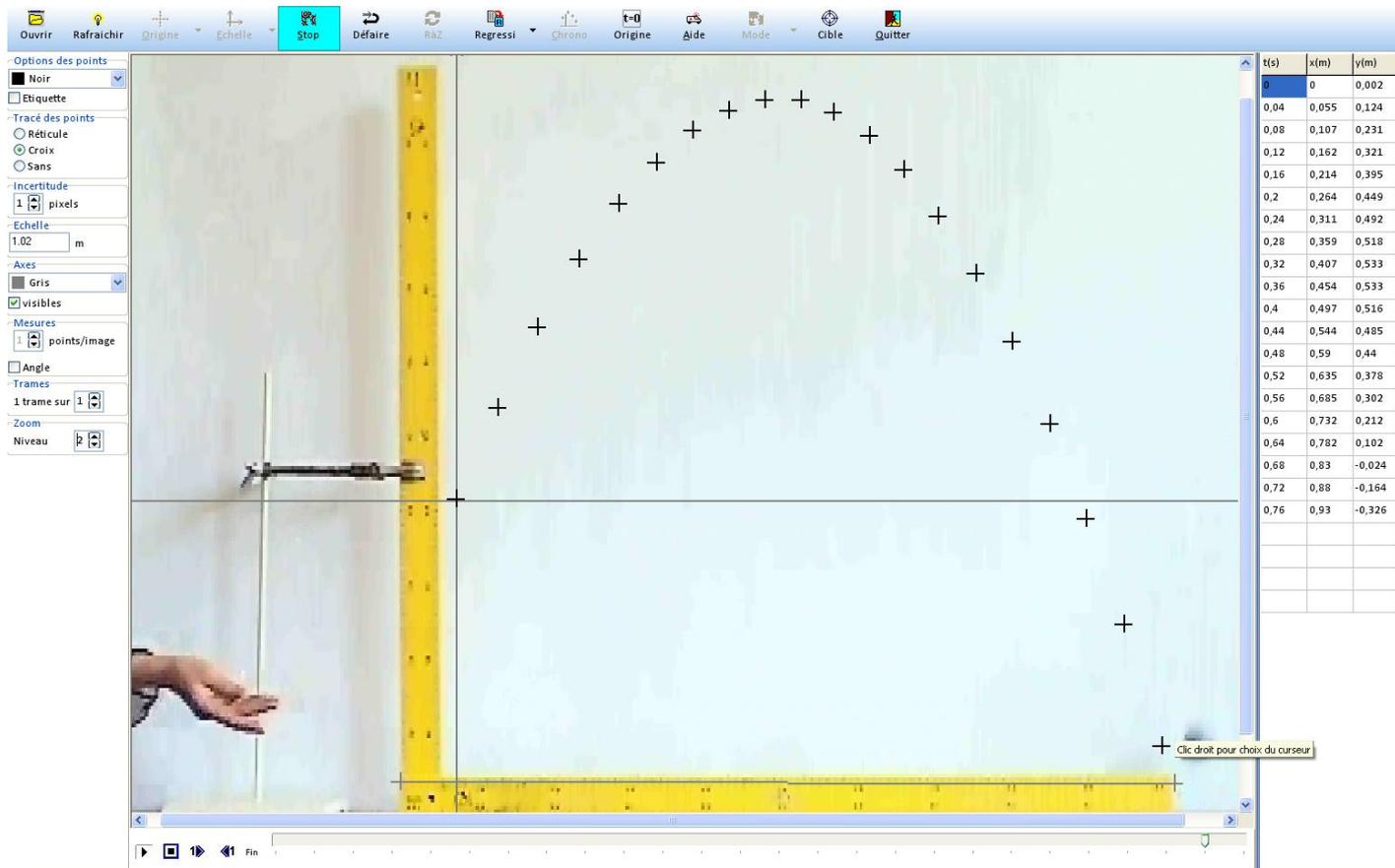
Commentaires

Comme l'indique l'introduction de cette activité, les élèves doivent ici organiser (*analyser*) et réaliser l'enregistrement d'un lancer de balle, le relevé des points, puis *analyser* les résultats, d'abord qualitativement, puis quantitativement à partir des graphes obtenus. Ils sont ainsi amenés à faire le lien avec leurs connaissances sur les mouvements rectilignes uniformes et uniformément variés et sur la loi de Newton. La *validation* est faite lors de la confrontation entre le résultat expérimental et la valeur théorique de l'accélération (3. c.) : cette validation amène à discuter des valeurs des coordonnées de l'accélération \vec{a} obtenues expérimentalement et à s'interroger sur l'expérience réalisée pour expliquer des écarts éventuels. Enfin les élèves *communiquent* leurs résultats dans la dernière question.

L'exploitation qui suit est réalisée à partir d'une vidéo (172376_C09_act3_lancer_balle.zip) disponible sur le site compagnon du manuel : www.nathan.fr/siriuslycee

Données

- Masse de la balle $m = 45,28$ g ; diamètre de la balle $d = 4,26$ cm ; durée entre deux images : $\Delta t = 1/25$ s ; échelles : 1,02 m pour la longueur totale d'une règle.
- Le pointage est effectué à partir de la première image qui montre la balle libérée de l'action de la main du lanceur. L'axe x ' x est horizontal et orienté vers la droite et l'axe y ' y est vertical et orienté vers le haut.
- On obtient le relevé ci-dessous (utilisation du logiciel *Regavi*) :



Remarque : sur la vidéo, la dernière position visible de la balle n'est pas prise en compte pour le pointage car elle est enregistrée après le rebond.

Réponses

1. Observer

L'observation se fait sur les courbes $x(t)$ projeté du point B sur l'horizontale et $y(t)$ projeté de B sur la verticale. Les élèves doivent interpréter les variations de x et y pendant des durées successives égales.

Situation	Projeté de B sur l'horizontale		Projeté de B sur la verticale	
	vitesse	nature du mouvement	vitesse	nature du mouvement
La balle s'élève en altitude	constante	uniforme	diminue	augmente
La balle redescend	constante	uniforme	décéléré	accéléré

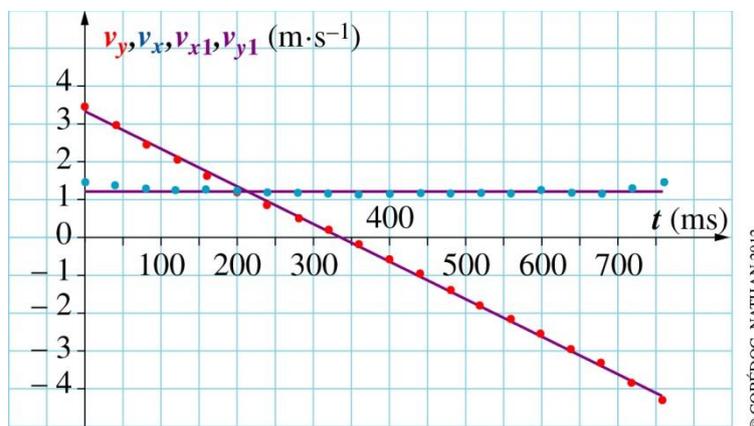
2. Analyser

a. Le référentiel d'étude est le référentiel terrestre.

b. et c. On obtient $v_x(t)$ et $v_y(t)$ par dérivation numérique par rapport à t de $x(t)$ et $y(t)$ (points rouges et bleus sur le graphique suivant).

Les valeurs $v_x(t)$ sont pratiquement égales ; le mouvement est uniforme selon l'axe horizontal. Les points représentatifs de $v_y(t)$ sont alignés : $v_y(t)$ est une fonction affine du temps.

L'accélération $a_y(t) = \frac{dv_y}{dt}$ est une constante. L'accélération $a_y(t)$ du mouvement du projeté de B sur l'axe (O, \vec{j}) est donc constante et le mouvement est uniformément varié selon cet axe.



d. - Mouvement du projeté de B sur l'horizontale : on retrouve que $v_x(t)$ est constant.

- Mouvement du projeté de B sur la verticale : de $t = 0$ à $t = 330$ ms, on a $v_y(t) > 0$; le mouvement se fait dans le sens positif de l'axe (vers le haut), mais $v_y(t)$ diminue, le mouvement est donc décéléré dans cette phase.

Pour $t \geq 330$ ms, on a $v_y(t) \leq 0$, le mouvement du projeté de B sur l'axe (O, \vec{j}) se fait dans le sens négatif de l'axe et la valeur de la vitesse $|v_y(t)|$ augmente. Dans cette phase le mouvement est donc accéléré.

3. Interpréter

a. $v_x(t)$ peut être modélisée par une droite d'équation : $v_{x1} = v_{ox} = 1,23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (droite notée v_{x1} sur le graphique ci-dessus).

$v_y(t)$ peut être modélisée par une droite : $v_{y1} = a_y t + v_{oy} = -9,63t + 3,23$ donc $v_{oy} = 3,23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (droite notée v_{y1} dans le graphique ci-dessus).

v_{ox} et v_{oy} représentent les coordonnées du vecteur vitesse à la date du lancement.

b. On obtient les coordonnées du vecteur accélération en dérivant par rapport au temps les expressions de v_{x1} et de v_{y1} :

$$a_x(t) = 0 \quad \text{et} \quad a_y(t) = -9,63$$

Le vecteur accélération est donc vertical, de sens vers le bas et de valeur constante :

$$a = 9,63 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

c. La deuxième loi de Newton appliquée à la balle dans le champ de pesanteur terrestre uniforme entraîne : $\vec{a} = \vec{g}$. On retrouve bien les caractéristiques du vecteur accélération avec un écart relatif sur la valeur de l'accélération de 2 %.

4. Conclure

Dans le champ de pesanteur uniforme, le mouvement du projeté d'un point matériel sur la direction horizontale est uniforme de vitesse $v_x = v_{ox}$; alors que le mouvement du projeté de ce point dans la direction verticale est uniformément varié, d'accélération $\vec{a} = \vec{g}$.

Activité expérimentale 4. Électrons dans un champ électrique

Commentaires

L'objectif principal de cette activité est l'appropriation par les élèves des liens entre champ électrique et mouvement d'une particule chargée (accélération et déviation). Cette activité, se réalise à partir d'une photographie qui peut être réalisée en classe ; elle permet d'étudier plus directement et complètement un dispositif et une expérience qui sont traditionnellement présentés au bureau.

Dans cette activité, les élèves analysent dans un premier temps le dispositif expérimental et, dans un deuxième temps, l'image de la trajectoire du faisceau d'électrons, après avoir réalisé l'acquisition d'un ensemble de points avec un logiciel de pointage sur image.

Le traitement des données est ensuite réalisé avec un logiciel connu des élèves.

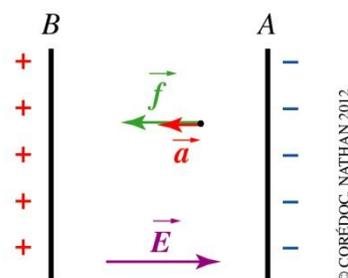
L'écart entre le modèle théorique et le modèle expérimental amène à discuter des hypothèses qui ont été choisies pour élaborer le modèle théorique : la compétence valider est donc ici tout particulièrement travaillée.

Réponses

1. Analyser le dispositif

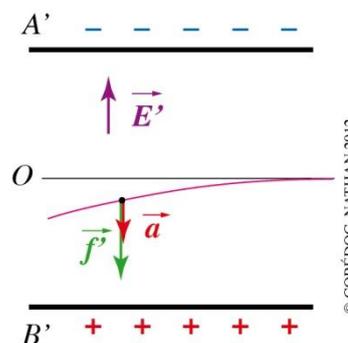
Le canon à électrons

a et b. Les caractéristiques de la force électrique \vec{f} qui s'exerce sur un électron, de son accélération \vec{a} et du champ \vec{E} sont représentées sur le schéma ci-contre.



Le dispositif de déviation du faisceau d'électrons

a et b. En tenant compte du sens de la déviation du faisceau d'électrons, on établit les caractéristiques de la force électrique \vec{f}' qui s'exerce sur un électron, de son accélération \vec{a} et du champ \vec{E}' . Les caractéristiques de la force électrique, du champ et de l'accélération de l'électron sont représentées sur le schéma ci-contre.

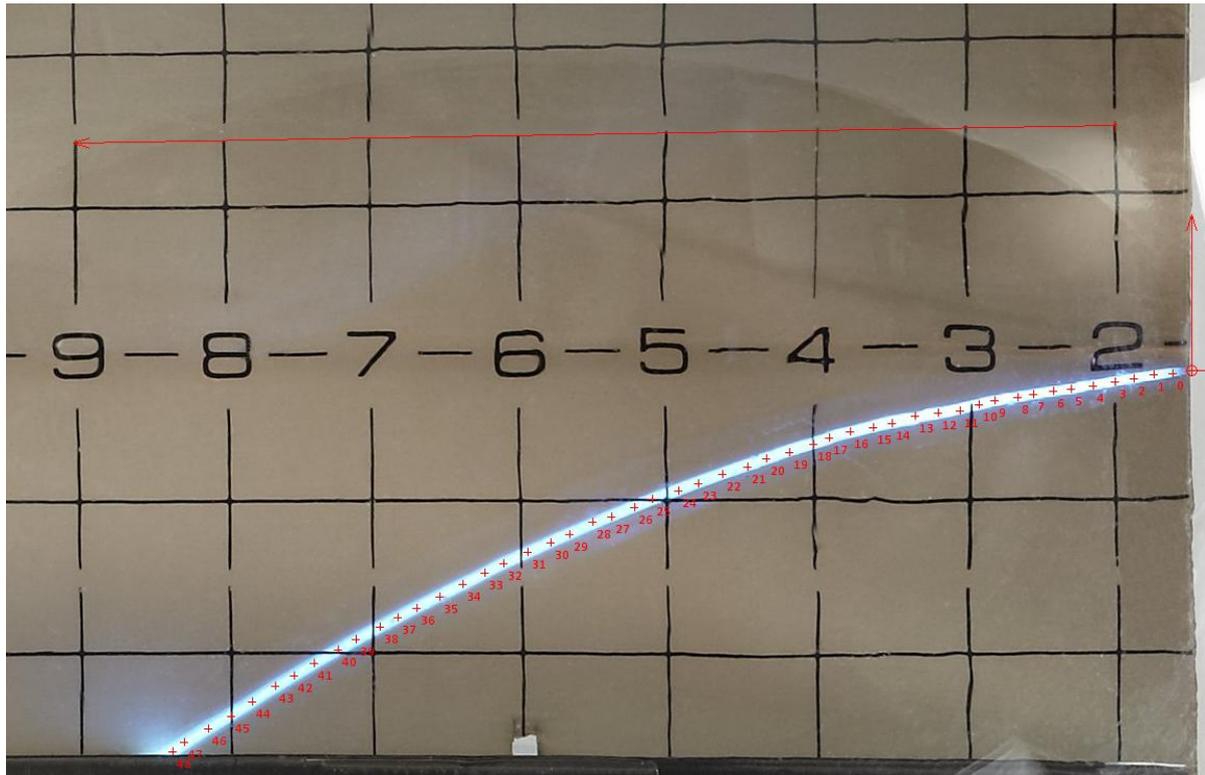


2. Exploiter puis conclure

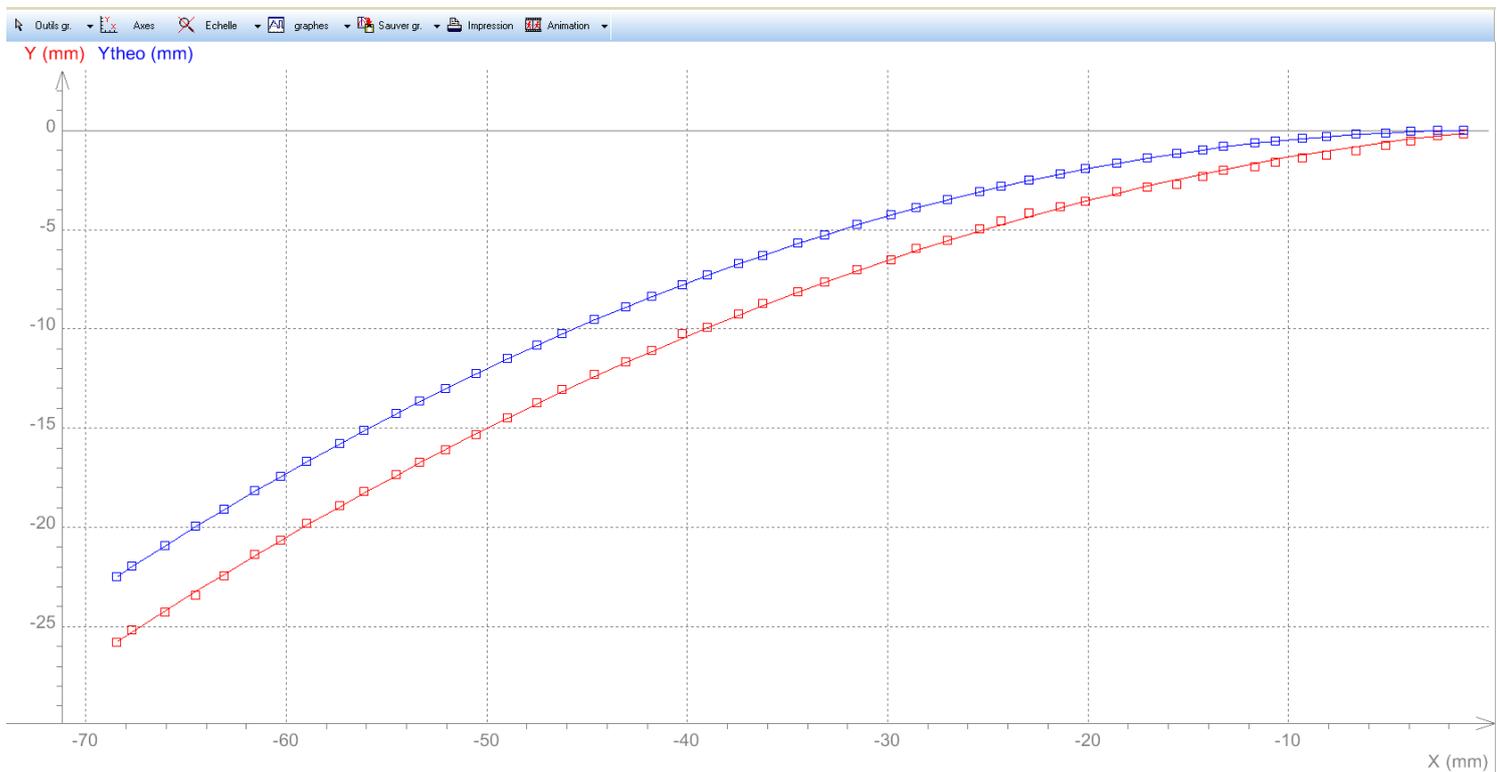
Les résultats présentés ci-dessous ont été obtenus avec la photographie disponible sur le site compagnon.

Nous avons choisi un repère orthonormé, d'axe horizontal (O, \vec{i}) orienté positivement vers la droite et d'axe vertical (O, \vec{j}) orienté positivement vers le haut.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 9. Lois de Newton



Copie d'écran obtenue à la fin du pointage réalisé sur la photographie agrandie en utilisant le logiciel Regavi.



Représentation en rouge du relevé du pointage et de la courbe modélisée passant par les points $y_{\text{modèle}}(x)$ et en bleu de la courbe théorique $y_{\text{theo}}(x)$.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur

Chapitre 9. Lois de Newton

Sur la représentation précédente, on note l'écart entre la courbe expérimentale (en rouge) et la courbe théorique (en bleu). Celle-ci s'appuie sur les hypothèses suivantes :

- champ électrique uniforme et limité à la seule zone intérieure au condensateur plan,
- valeur v_0 de la vitesse identique à celle en sortie du canon.

On note que la tangente en O à la trajectoire (courbe en rouge) n'est pas horizontale, donc que les électrons ne pénètrent pas dans l'espace du condensateur avec la direction de l'axe $x'x$. Ils ont été déviés par un champ électrique existant au voisinage du condensateur.

Équations de la courbe :

- théorique : $y_{\text{theo}} = -4,8x^2$;
- expérimentale : $y_{\text{modèle}} = -4,12x^2 + 0,094x$.

Remarque : l'expérience est réalisée avec la même tension U entre les plaques accélératrices AB et de déviation $A'B'$. Dans le canon à électron, la valeur v_0 de la vitesse de sortie est obtenue avec :

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = eU$$

En notant v_0' la valeur de la vitesse d'entrée des électrons entre les plaques $A'B'$ de déviation, α l'angle d'entrée, l'équation de la trajectoire est :

$$y = -\frac{1}{2} \frac{e U}{m d} \frac{x^2}{v_0'^2 \cos^2 \alpha} + x \tan \alpha$$

En éliminant U et m on obtient :

$$y = -\frac{x^2}{4d} \frac{v_0^2}{v_0'^2 \cos^2 \alpha} + x \tan \alpha$$

La comparaison avec les valeurs de la modélisation donne, en appelant K le rapport des vitesses :

$$\begin{aligned} -4,12 &= -\frac{1}{4d} \left(\frac{K}{\cos \alpha} \right)^2 \\ 0,094 &= \tan \alpha \end{aligned}$$

On trouve un angle de $5,4^\circ$ et un rapport $K = \frac{v_0'}{v_0} = 0,92$.

Ces résultats montrent que le champ entre les deux plaques de déviation n'est certainement pas nul au voisinage de la zone d'entrée des électrons : déviation du faisceau avant l'entrée et modification de la vitesse entre les deux systèmes accélérateur et de déviation.

Exercices d'application

5 minutes chrono !

1. Mots manquants

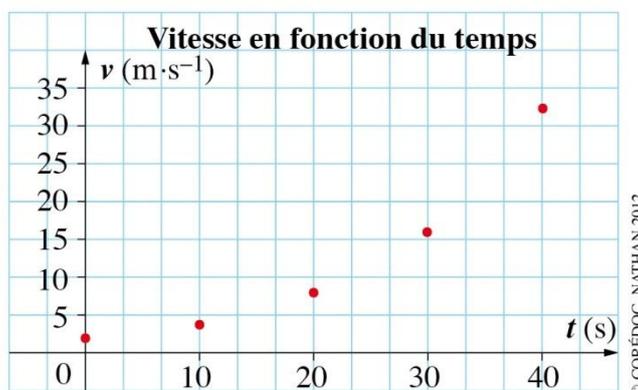
- la dérivée ; au temps
- nul
- somme ; la quantité de mouvement
- uniforme
- \vec{g} ; une parabole

2. QCM

- $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
- Uniforme : courbe 3 ; accéléré sans être uniformément accéléré : courbe 1 ; uniformément accéléré : courbe 2.
- $\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt}$.
- Il n'y a pas de condition.

Compétences exigibles

3. La vitesse n'est pas une fonction affine du temps : l'accélération n'est donc pas constante et le mouvement n'est pas uniformément varié.



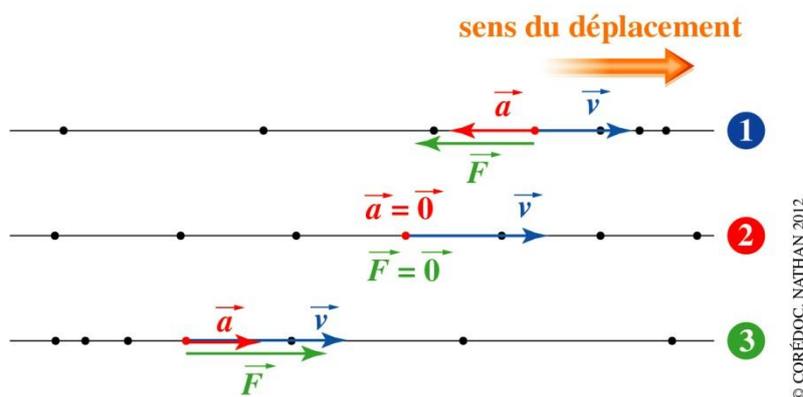
Remarque : le mouvement est accéléré.

4. a. La valeur de l'accélération est : $a = \frac{|\Delta v|}{\Delta t} = 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

b. Le mouvement du point est uniformément décéléré : le vecteur accélération est donc de sens opposé au vecteur vitesse. On choisit un sens de déplacement : le vecteur vitesse \vec{v} a le sens du déplacement et sa valeur diminue alors que le vecteur accélération \vec{a} est dans le sens opposé au vecteur vitesse \vec{v} et garde une valeur constante.



5.



Le vecteur vitesse \vec{v} a le sens du déplacement, le sens du vecteur accélération \vec{a} dépend de la nature accélérée ou décélérée du mouvement. Le vecteur représentant la force \vec{F} qui s'exerce sur le point matériel est lié au vecteur accélération \vec{a} par la deuxième loi de Newton $\vec{F} = m\vec{a}$ avec m masse du point matériel. Le vecteur \vec{F} a donc le même sens que \vec{a} .
 Enregistrement 1 : mouvement rectiligne décéléré, les vecteurs \vec{a} et \vec{v} sont de sens opposés.
 Enregistrement 2 : mouvement rectiligne uniforme, $\vec{v} = cte$ et $\vec{a} = \vec{0}$.
 Enregistrement 3 : mouvement rectiligne accéléré, les vecteurs \vec{a} et \vec{v} ont même sens.

6. Le parachutiste équipé est le système choisi. Les forces qui s'exercent sur le système sont : son poids \vec{P} de valeur $P = 800$ N et la force \vec{F}_{air} due à l'air.
 En appliquant la deuxième loi de Newton au système dont la masse est constante :

$$\vec{P} + \vec{F}_{\text{air}} = m\vec{a}$$

Le vecteur accélération \vec{a} est vertical vers le bas et sa valeur est $a = \frac{P - F_{\text{air}}}{m}$.

	1	2	3	4
Accélération	$a = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ <small>© CORÉDOC, NATHAN 2012</small>	$a = 5,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ <small>© CORÉDOC, NATHAN 2012</small>	$a = 1,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ <small>© CORÉDOC, NATHAN 2012</small>	$a = 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ <small>© CORÉDOC, NATHAN 2012</small>
Nature du mouvement	accélééré	accélééré	accélééré	uniforme

7. D'après la 3^e loi de Newton, quel que soit le cas, la force exercée par le pack bleu sur le pack rose est opposée à la force exercée par le pack rose sur le pack bleu.

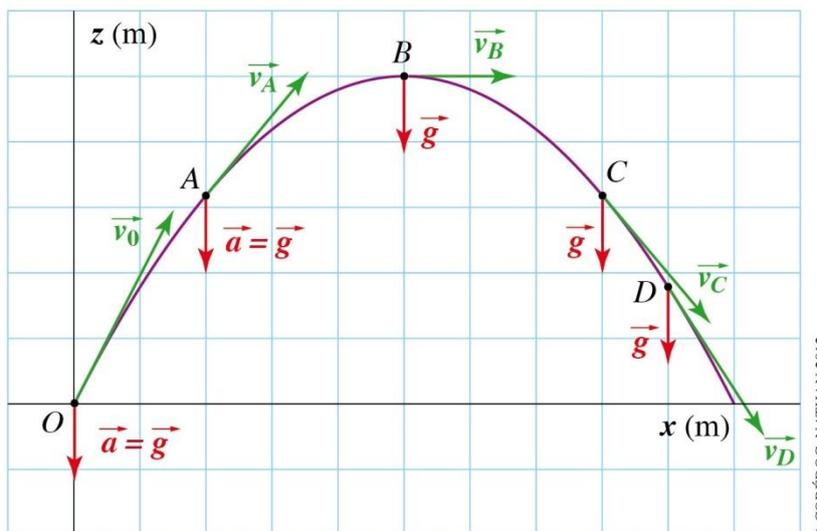
8. Le vecteur accélération est constant :

$$\vec{a} = \vec{g}$$

Le vecteur vitesse est tangent à la trajectoire et orienté dans le sens du déplacement :

- sa composante sur la direction horizontale est constante,
- sa composante sur la direction verticale diminue jusqu'au point *B* où elle s'annule puis augmente lors de la descente.

La valeur de la vitesse est la même aux points *A* et *C*.



© CORÉDOC, NATHAN 2012

9. a. Le champ \vec{E} est uniforme ; il est donc identique en *M* et *N*. Ce champ est orthogonal aux plaques *A* et *B*, son sens est de la plaque portant une charge positive *A* à la plaque *B* et sa valeur est :

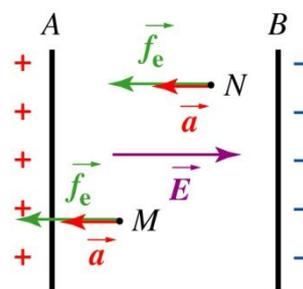
$$E = \frac{400}{0,10} = 4,0 \times 10^3 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$$

La force qui s'exerce sur un électron est alors $\vec{f}_e = -e\vec{E}$ et elle est identique pour un électron en *M* ou en *N*. La force \vec{f}_e est orthogonale aux plaques *A* et *B*, son sens va de la plaque *B*

portant une charge négative à la plaque *A* et sa valeur $f_e = 1,6 \times 10^{-19} \times 4 \times 10^3 = 6,4 \times 10^{-16} \text{ N}$.

b. et c. $\vec{a} = \frac{\vec{f}_e}{m}$: l'accélération \vec{a} a donc même direction, même sens que la force électrique et sa valeur est :

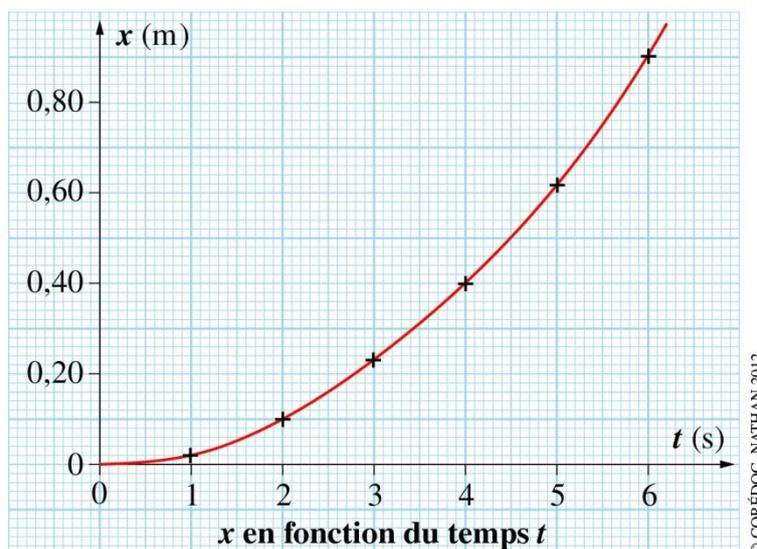
$$a = \frac{6,4 \times 10^{-16}}{9,1 \times 10^{-31}} = 7,0 \times 10^{14} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$



© CORÉDOC, NATHAN 2012

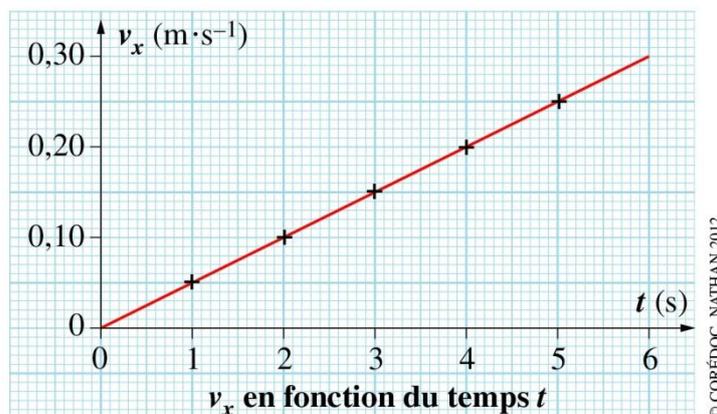
Compétences générales

10. a. La représentation graphique de $x(t)$ a une « allure » de parabole.



b. Pour déterminer les caractéristiques du mouvement, il est nécessaire d'étudier $v_x(t)$. Avec un tableur on peut calculer les valeurs de v_x comme sur les enregistrements :

$$v_{xi} = \frac{(x_{i+1} - x_{i-1})}{(t_{i+1} - t_{i-1})}$$



v_x est une fonction linéaire de t , de coefficient directeur $a_x = 0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

c. L'accélération de ce mouvement rectiligne est $a_x = \frac{dv_x}{dt} = 0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Le mouvement est donc rectiligne uniformément varié, ici il est accéléré.

11. Supposons l'accélération constante. Dans un premier temps, on calcule la valeur de l'accélération supposée constante, puis dans un deuxième temps, on calculera la distance qui serait ainsi parcourue par la voiture. La comparaison avec la valeur donnée permettra de conclure.

Soit a_x la coordonnée du vecteur accélération selon l'axe ($O ; i$) de direction la piste et orienté dans le sens du déplacement du véhicule.

À $t = 0$ s, $v_{x0} = 0$ et $x_0 = 0$.

À $t = 10,0$ s, on a $v_x = 27,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Par intégration, on obtient $v_x = a_x \times t + v_{x0}$ soit $v_x = a_x \times t$ soit $a_x = 2,78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Par intégration, on obtient $x = \frac{1}{2} a_x t^2$.

Quand $t = 10,0$ s, on obtient $x = \frac{1}{2} \times 2,78 \times 10^2 = 139$ m, soit une distance très inférieure à la valeur indiquée : l'accélération n'a pas été constante pendant l'essai.

12. Caractéristiques de la particule :

- charge $q = +2e = 3,2 \times 10^{-19} \text{ C}$;

- masse $m = \frac{20,2 \times 10^{-3}}{6,022 \times 10^{23}} = 3,35 \times 10^{-26} \text{ kg}$.

a. Calcul de la force électrique qui s'exerce sur l'ion :

$$f_e = \frac{3,2 \times 10^{-19} \times 8,0 \times 10^2}{1,2} = 2,1 \times 10^{-16} \text{ N}$$

b. On applique la deuxième loi de Newton à un ion Ne^{2+} : $m\vec{a} = \sum \vec{F}_{ext} = \vec{f}_e$ soit $\vec{a} = \frac{\vec{f}_e}{m}$.

La valeur de l'accélération des ions est alors $a = \frac{f_e}{m} = \frac{2,1 \times 10^{-16}}{3,35 \times 10^{-26}} = 6,3 \times 10^9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Exercices de méthode

13. Exercice résolu.

14. a. On étudie le mouvement rectiligne de la balle dans le référentiel terrestre galiléen.

La seule force qui s'exerce sur la balle est la force \vec{F} . La deuxième loi de Newton appliquée à la balle (de masse constante) s'écrit : $\vec{F} = m\vec{a}$ avec \vec{a} accélération de la balle.

La force \vec{F} étant constante, de direction \overrightarrow{AB} , le vecteur accélération \vec{a} est constant et a la direction \overrightarrow{AB} , un sens de A vers B et une valeur de $a = \frac{F}{m}$.

b. Le vecteur accélération étant constant, le mouvement de la balle est alors rectiligne uniformément varié. Il part avec une vitesse nulle, le mouvement est alors uniformément accéléré entre A et B.

c. Choisissons un axe $\{O, \vec{i}\}$ de direction AB, orienté positivement de A vers B, l'origine O étant au point A :

$$a_x = \frac{F}{m}$$

Par intégration :

$$v_x = \frac{F}{m} t + C_1$$

Choisissons $t = 0$ s, date de lancement de A. On a alors $C_1 = 0$ soit :

$$v_x = \frac{F}{m} t \quad (1)$$

Par intégration, on obtient :

$$x = \frac{F}{2m} t^2 + C_2$$

Quand $t = 0$, $x = 0$ soit $C_2 = 0$. L'équation horaire est alors :

$$x = \frac{F}{2m} t^2 \quad (2)$$

Pour calculer F, il faut éliminer t entre les équations (1) et (2) :

De (1), on obtient : $t = \frac{mv_x}{F}$.

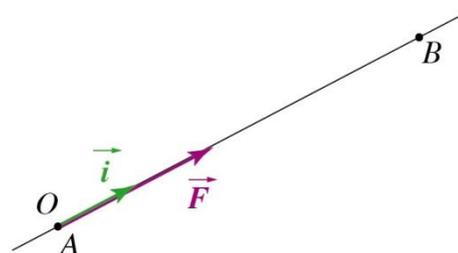
De (2), on obtient : $x = \frac{F}{2m} \left(\frac{mv_x}{F}\right)^2$, soit $F = \frac{mv_x^2}{2x}$

Quand $x = 0,25$ m et $v_x = 126 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1} = 35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, on obtient :

$$F = \frac{0,080 \times 35^2}{2 \times 0,25} = 196 \text{ N}$$

Soit en tenant compte des chiffres significatifs des données :

$$F = 2,0 \times 10^2 \text{ N}$$

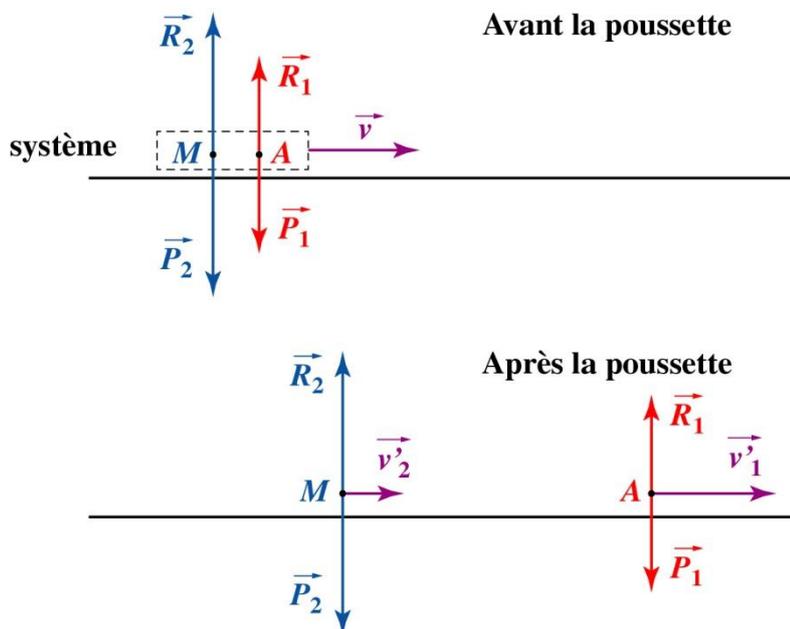


© CORÉDOC, NATHAN 2012

15. a. On choisit le système formé de l'ensemble {Abel + Maxime} et on étudie le mouvement dans le référentiel terrestre.

Le système est soumis à des forces qui se compensent $(\vec{P}_1 + \vec{R}_1) + (\vec{P}_2 + \vec{R}_2) = \vec{0}$.

Juste avant la poussette, on appelle \vec{v} la vitesse du système ; juste après la poussette on appelle \vec{v}'_1 et \vec{v}'_2 les vitesses respectives de Abel et Maxime.



© CORÉDOC. NATHAN 2012

D'après le principe d'inertie, le système étant soumis à des forces qui se compensent, il est isolé : la quantité de mouvement du système se conserve.

$$(m_1 + m_2) \vec{v} = m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2$$

On choisit un axe (O ; \vec{i}) de direction la trajectoire, orienté dans le sens du déplacement des deux patineurs.

On obtient alors la relation algébrique :

$$(m_1 + m_2)v_x = m_1 v'_{1x} + m_2 v'_{2x}$$

On en déduit :

$$v'_{2x} = \frac{(m_1 + m_2)v_x - m_1 v'_{1x}}{m_2}$$

$$\text{Soit } v'_{2x} = +12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$$

On en déduit que Maxime continue à se déplacer dans le même sens mais avec une vitesse plus faible de $v'_2 = 12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

b. On choisit maintenant le système formé de Abel.

Sa quantité de mouvement a varié pendant la poussette de :

$$\Delta \vec{p} = m_1 \vec{v}'_1 - m_1 \vec{v}$$

D'après la deuxième loi de Newton, la force \vec{F} qui s'est exercée sur lui pendant la durée Δt de la poussette est :

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$$

La valeur moyenne de cette force est de :

$$F = \frac{m_1(v'_1 - v)}{\Delta t}$$

Il est indispensable ici d'utiliser les unités SI pour les vitesses ($1\text{km}\cdot\text{h}^{-1} = \frac{1000}{3600} \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

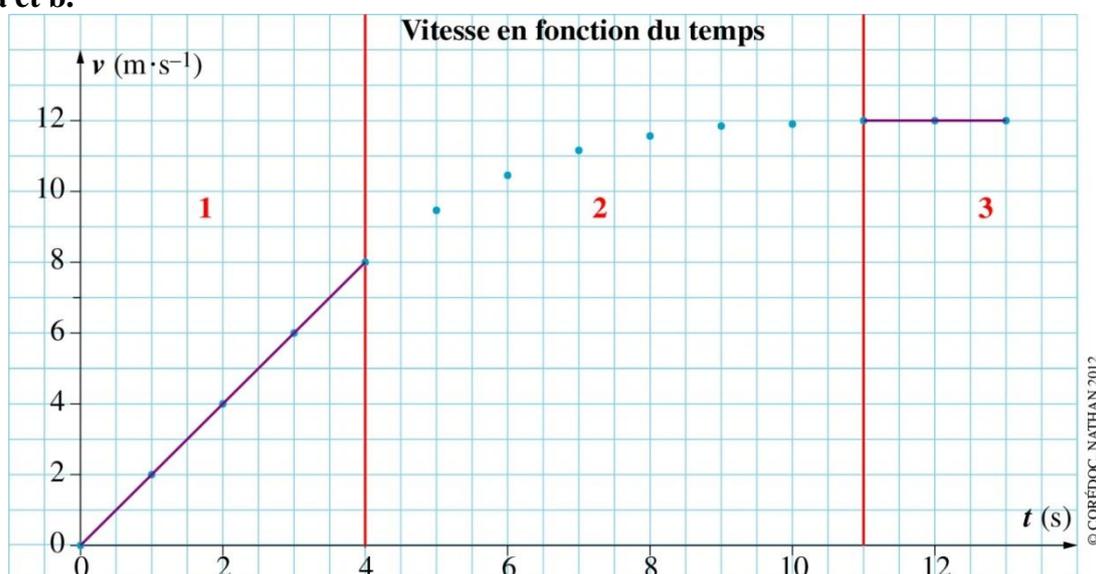
On obtient :

$$F = \frac{60 \times (26 - 18) \frac{1000}{3600}}{0,5} = 2,7 \times 10^2 \text{ N}$$

c. D'après la troisième loi de Newton, la force exercée par Maxime sur Abel est opposée à la force exercée par Abel sur Maxime. La valeur de la force moyenne exercée par Abel sur Maxime est alors de $F = 2,7 \times 10^2 \text{ N}$.

Exercices d'entraînement

16. a et b.



Dans la partie (1), v est une fonction linéaire de t . Dans la partie (2), v est une fonction croissante de t . Dans la partie (3), v est une fonction constante.

c. Dans la partie (1), l'accélération est :

$$a_1 = \frac{\Delta v}{\Delta t} = 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

Le mouvement est rectiligne uniformément accéléré.

d. Dans la partie (3), $a_3 = 0$. Le mouvement de la voiture est rectiligne uniforme.

e. À l'instant de date $t = 7$ s, on calcule l'accélération moyenne entre les dates 6 et 8 s soit :

$$a_7 = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{11,6 - 10,5}{8 - 6} = 0,55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

17. a. On choisit la bille comme système et on étudie son mouvement dans le référentiel terrestre considéré galiléen.

Le poids \vec{P} de la bille est la seule force qui s'exerce sur elle.
La deuxième loi de Newton appliquée à la bille devient :

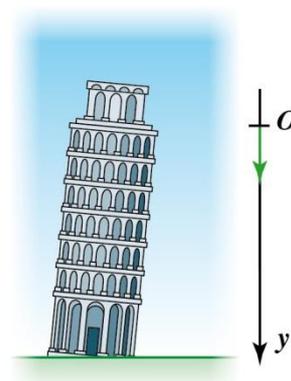
$$m\vec{a} = \vec{P} \text{ soit } \vec{a} = \vec{g}, \text{ champ de pesanteur}$$

Dans le repère (O, \vec{j}) défini dans le texte, on obtient $a_y = g$.

On choisit $t_0 = 0$ s, date de lâcher de la bille.

Par intégration, on obtient (la vitesse à la date $t_0 = 0$ s étant nulle): $v_y = gt$.

Et : $y = \frac{1}{2} gt^2$ (la coordonnée y à la date $t_0 = 0$ s étant nulle).



© CORÉDOC-NATHAN 2012

b. Durée de chute jusqu'au sol : au niveau du sol $y_S = h$; on obtient alors la durée de chute

$$t_S = \sqrt{\frac{2h}{g}} \text{ soit } t_S = \sqrt{\frac{2 \times 54}{9,8}} = 3,3 \text{ s}$$

c. Vitesse à l'arrivée sur le sol :

$$v_s = gt_S \text{ soit } v_s = 9,8 \times 3,3 = 33 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

18. a. À $t_0 = 0$, la bille est à $z = -0,5 \times 9,8 \times 0 + 5 \times 0 + 1,2 = 1,2$ m.

b. $v_z(t) = \frac{dz}{dt} = -gt + v_{0z}$; $v_z(t_0) = v_{0z} = 5,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

c. $v_{0z} > 0$: le vecteur \vec{v}_0 a donc le même sens que $z'z$, la bille est donc lancée vers le haut.

d. Quand la vitesse s'annule $v_z(t_1) = -gt_1 + v_{0z} = 0$ soit $t_1 = \frac{v_{0z}}{g} = 0,51$ s.

Sa position est alors $z_1 = 0,5 \times 9,8 \times t_1^2 + 2t_1 + 1,2 = 3,5$ m.

e. $a_z(t) = \frac{dv_z}{dt} = -g$.

Le vecteur \vec{a} a une direction verticale, un sens vers le bas et une valeur constante : le mouvement est uniformément varié d'accélération \vec{g} : c'est une chute libre verticale.

19. À partir de $t = 1$ s, la valeur de la vitesse est constante (courbe 2) : le mouvement est donc rectiligne (car la chute se fait selon une verticale) et uniforme.

Après $t = 1,5$ s, l'ordonnée z continue à augmenter : la bille continue donc à descendre, elle n'a donc pas encore atteint le fond de l'éprouvette.

De $t = 0$ à $t = 0,75$ s, l'accélération a_z de la bille diminue jusqu'à devenir nulle pour $t = 0,75$ s. Mais le vecteur accélération garde dans cet intervalle le sens de l'axe $z'z$ ($a_z > 0$) comme le vecteur vitesse ($v_z > 0$). La bille a donc bien un mouvement accéléré pendant cette phase, en accord avec l'état initial indiquant une vitesse nulle à l'origine.

20. a. On choisit comme système la luge de masse m , et on étudie son mouvement dans le référentiel terrestre considéré galiléen.

La variation de la quantité de mouvement de la luge entre l'instant t_0 où le pisteur commence à exercer une force sur la luge ($v_0 = 20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) et l'instant t_a où la luge s'arrête ($v_a = 0$) est égale à :

$$\Delta \vec{p} = m \vec{v}_a - m \vec{v}_0 = m(\vec{v}_a - \vec{v}_0)$$

soit :
$$\Delta p = 60 \times \left(0 - \frac{20 \times 1000}{3600}\right) = -3,3 \times 10^2 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Le poids et la force exercée par le sol se compensent, la force exercée par le pisteur est la seule qui a un effet sur la variation de la vitesse de la luge, d'après la deuxième loi de Newton :

$$\vec{F} = \frac{\overline{\Delta p}}{\Delta t}$$

La force a la direction horizontale et le sens de $\overline{\Delta p}$ soit le sens opposé au déplacement.

La valeur moyenne de F est donc $F = \frac{|\Delta p|}{\Delta t} = \frac{3,3 \times 10^2}{5} = 6,7 \times 10^2 \text{ N}$.

Le vecteur accélération $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ a même direction et sens que \vec{F} et une valeur de $a = 1,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

b. On choisit un axe (O, \vec{i}) parallèle à la piste orienté dans le sens du déplacement. La date $t_0 = 0$ est celle du début de l'action du pisteur. \vec{a} étant opposé au sens du déplacement :

$$a_x = -1,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \text{ et } v_{0x} = \frac{20 \times 1000}{3600} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

En intégrant $v_x = a_x t + v_{0x}$ (1)

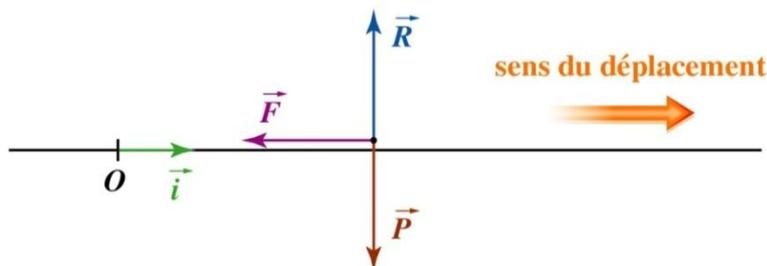
et $x = \frac{a_x t^2}{2} + v_{0x} t$ (2)

et à partir de (1) avec $v_a = 0$, on déduit la durée $t_a = \frac{-v_{0x}}{a_x}$.

On reporte cette valeur dans (2) et on obtient :

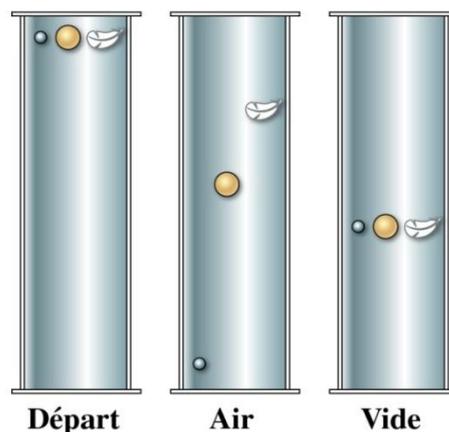
$$D = \frac{a_x \left(\frac{-v_{0x}}{a_x}\right)^2}{2} + v_{0x} \frac{-v_{0x}}{a_x} = -\frac{v_{0x}^2}{2a_x}$$

$$D = -\frac{\left(\frac{20 \times 1000}{3600}\right)^2}{2 \times (-1,1)} = 14 \text{ m}$$



Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 9. Lois de Newton

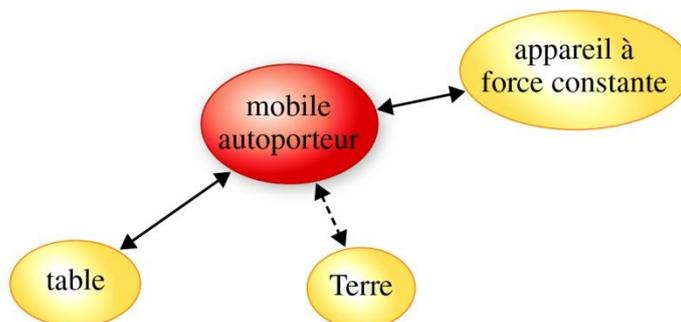
- 21. a.** Il faut comprendre que tous les corps auraient la même vitesse (en effet la vitesse ne reste pas constante au cours d'une chute).
b. « Si on éliminait complètement la résistance du milieu » est équivalent à « si on supprimait les forces exercées par l'air sur les corps ».
c. En faisant le vide dans le tube, Newton supprime l'air et donc les interactions entre le corps et l'air.
d. Schéma ci-contre.



© CORÉDOC. NATHAN 2012

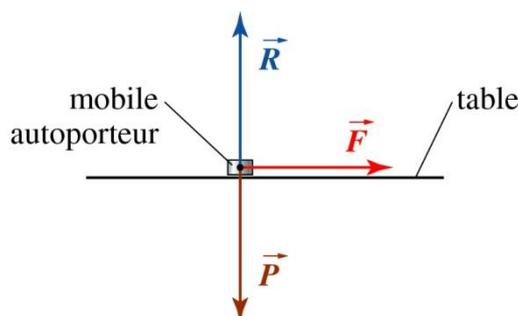
Expériences de Newton.

- 22. a.** Les interactions avec le mobile se font avec la Terre (interaction à distance), la table et le fil de l'appareil à force constante (interactions de contact).



© CORÉDOC. NATHAN 2012

- b.** L'interaction entre la table et le mobile se fait sans frottement (mobile auto porteur), la force \vec{R} exercée par la table sur le mobile est alors perpendiculaire au plan de la table, elle est donc verticale. L'ensemble des forces a une direction horizontale (mouvement rectiligne du point A), la force \vec{R} exercée par la table sur le mobile s'oppose donc au poids.
 $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$; on a alors $\vec{P} + \vec{R} + \vec{F} = \vec{F}$.



© CORÉDOC. NATHAN 2012

- c.** Pour $m = 740 \text{ g}$:

$$v_2 = \frac{0,03}{0,08} = 0,375 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$p_2 = 0,28 \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$v_4 = \frac{0,037}{0,08} = 0,462 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$p_4 = 0,34 \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 9. Lois de Newton

Pour $m' = 1470$ g :

$$v'_2 = \frac{0,022}{0,08} = 0,275 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \qquad v'_4 = \frac{0,025}{0,08} = 0,31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$p'_2 = 0,40 \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1} \qquad p'_4 = 0,46 \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

d. Pour $m = 740$ g, on a : $\frac{p_4 - p_2}{2\tau} = 0,75$.

Pour $m' = 1470$ g, on a : $\frac{p'_4 - p'_2}{2\tau} = 0,75$.

Dans ces expériences, le mobile est soumis à la même force \vec{F} . D'après la deuxième loi de Newton, on doit alors avoir $\frac{p_4 - p_2}{2\tau} = \vec{F}$ pour chaque mobile et donc $\frac{p_4 - p_2}{2\tau} = \frac{p'_4 - p'_2}{2\tau}$ puisque tous les vecteurs ont même direction et même sens. D'où $F = 0,75$ N.

Remarque : des écarts éventuels entre $\frac{p'_4 - p'_2}{2\tau}$ et $\frac{p_4 - p_2}{2\tau}$ sont dus essentiellement aux mesures des longueurs qui sont faites avec une incertitude de l'ordre du millimètre.

23. a. La première phrase du texte fait référence à la première loi de Newton : la conservation de la quantité de mouvement d'un système isolé.

b. La quantité de mouvement de l'ensemble « fusée - gaz » reste constante entre deux instants qui encadrent l'expulsion des gaz. On a alors $\overrightarrow{\Delta p}_{\text{fusée}} = -\overrightarrow{\Delta p}_{\text{gaz}}$. Pour la fusée, la variation de la quantité de mouvement se fait en sens opposé de celle des gaz éjectés : la vitesse de la fusée augmente.

c. Les forces citées sont les deux forces d'interaction entre l'eau et le poisson.

d. Dans l'interaction, les deux forces sont opposées, elles ont donc la même valeur (3^e loi de Newton).

La vitre ne semble pas bouger car la masse de la vitre et des supports solidaires de cette vitre étant beaucoup plus grande que celle de la mouche, une force de même valeur provoque une variation de vitesse beaucoup plus faible :

$$F = \left| \frac{m\Delta v}{\Delta t} \right|$$

24. a. La pierre est le système dont on étudie le mouvement dans le référentiel terrestre galiléen.

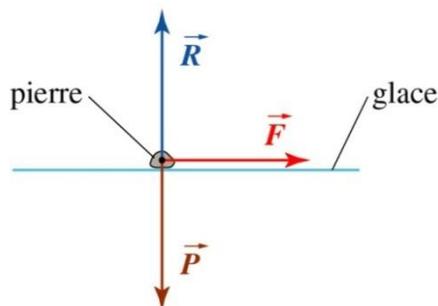
Dans la **phase 1**, la pierre est soumise à des forces : son poids \vec{P} , la force exercée \vec{R} par la glace et la force \vec{F} exercée par le joueur. On applique la deuxième loi de Newton pour un solide de masse m :

$$\vec{P} + \vec{R} + \vec{F} = m\vec{a}$$

Le poids et la force exercée par la glace ont une direction verticale.

Le mouvement de A étant rectiligne et selon une droite horizontale, on a :

$$\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$$



© CORÉDOC, NATHAN 2012

On obtient alors $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$: le vecteur accélération est constant, il a la même direction et le même sens que la force \vec{F} et sa valeur est :

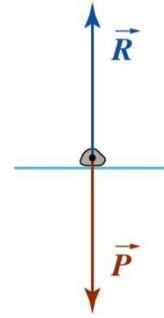
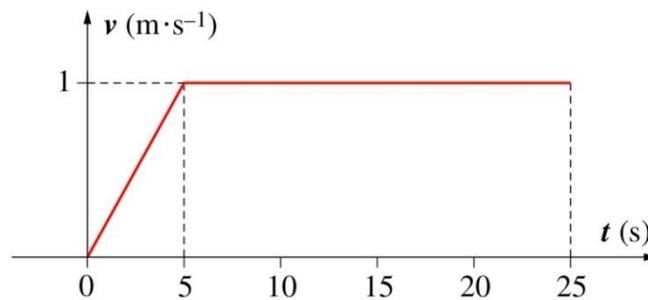
$$a = \frac{F}{m}$$

La pierre a un mouvement rectiligne uniformément accéléré. Dans la **phase 2**, la pierre n'est plus soumise à l'action du joueur on a alors :

$$\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$$

D'après le principe d'inertie, le point matériel A a un mouvement rectiligne uniforme.

b.



© COREDOC, NATHAN 2012

© COREDOC, NATHAN 2012

Au cours de la phase 2, la pierre conserve la vitesse atteinte en fin de la phase. Cette vitesse est de :

$$v_2 = \frac{D}{\Delta t} = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

On choisit un axe $(O ; \vec{i})$ de direction la trajectoire et de sens celui du déplacement avec une origine $x = 0$ au point de lancement à la date $t_0 = 0$. On appelle t' la date de fin de la phase 1.

$v_{1x} = a_x t$ quand $t = t'$, alors $v_{1x} = v_{2x}$.

Dans la phase 1, la vitesse est une fonction linéaire du temps, dans la phase 2, la vitesse de A reste constante et égale à $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

c. Nous avons établi que $v_{1x} = a_x t$ avec $a_x = \frac{F}{m}$.

À la fin de la phase 1, on a $v_{1x} = v_{2x}$ soit $v_{2x} = \frac{F t'}{m}$ on a alors $F = \frac{m v_{2x}}{t'}$.

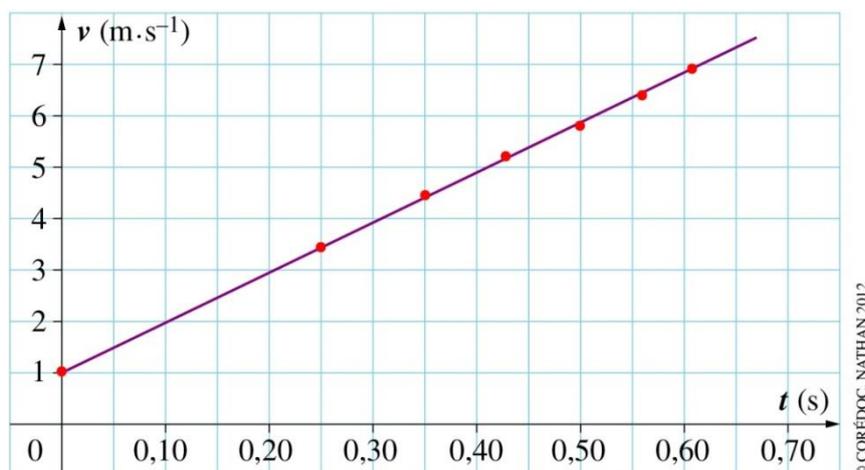
$$v_{2x} = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \text{ d'où } F = 4 \text{ N}$$

25. Dans l'hypothèse où le mouvement rectiligne de la bille est uniformément varié, alors le vecteur accélération est constant : $\vec{a} = \overrightarrow{cte}$.

Dans un repère (O, \vec{j}) vertical orienté vers le bas, $v = v_y$.

L'accélération est verticale et $a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{dv}{dt}$.

La courbe qui passe au mieux entre les points expérimentaux (t, v) est une droite affine d'équation : $v(t) = at + \beta$. On a donc $a_y = \frac{dv}{dt} = a = cte$.

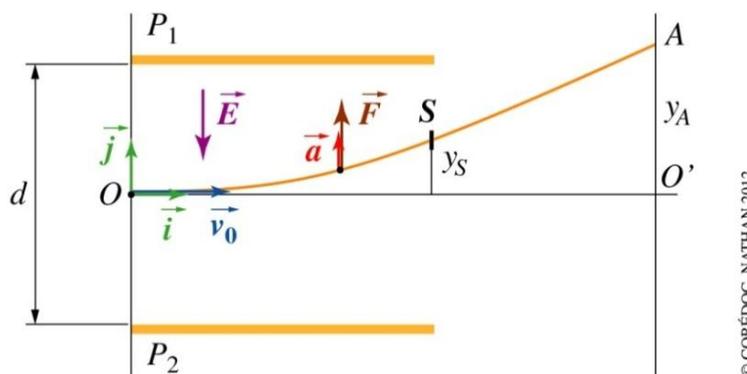


Le mouvement de la bille est bien uniformément varié.

Par ailleurs, la vitesse augmente au cours du mouvement (ou les vecteurs vitesse et accélération ont même sens où le produit $a_y v_y > 0$), on a donc un mouvement uniformément accéléré.

La valeur de l'accélération $a = a_y$ représente le coefficient directeur de la droite. On choisit deux points éloignés sur la droite et on obtient $a = \frac{7-1}{0,62} = 9,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

26. 1. Le système que l'on étudie est l'électron entre les plaques P_1 et P_2 .



Dans le champ électrique, l'électron est soumis à une force électrique $\vec{F} = -e\vec{E}$.

D'après la deuxième loi de Newton, l'accélération \vec{a} de l'électron est telle que $m\vec{a} = \vec{F}$, soit :

$$\vec{a} = -\frac{e\vec{E}}{m}$$

Le champ \vec{E} est orthogonal aux plaques, comme \vec{a} a le même sens que \vec{j} , car la particule est déviée dans ce sens, le vecteur \vec{E} est de sens opposé et va donc de P_1 vers P_2 .

Les coordonnées de \vec{a} sont alors $a_x = 0$ et $a_y = \frac{eE}{m}$.

2. a. Pour établir l'équation de la trajectoire, on établit dans un premier temps les coordonnées du vecteur vitesse de l'électron puis les coordonnées du vecteur position.

Par intégration :

$$a_x = 0 \qquad a_y = \frac{eE}{m}$$

$$x = C_1 = v_0 \qquad v_y = \frac{eE}{m}t + C_2 \quad \text{soit } v_y = \frac{eE}{m}t \quad \text{car à } t_0 = 0, v_y = 0$$

Par intégration :

$$x = v_0t + C_3 \quad ; \quad \text{avec } C_3 = 0 \quad \text{car à } t_0 = 0, \text{ on a } x_0 = 0.$$

On obtient $x = v_0t$ (1) :

$$y = \frac{eE}{2m}t^2 + C_4 \quad ; \quad \text{avec } C_4 = 0, \quad \text{car à } t_0 = 0, \text{ on a } y_0 = 0.$$

On obtient : $y = \frac{eE}{2m}t^2$ (2)

À partir de l'équation (1), on obtient :

$$t = \frac{x}{v_0}$$

En reportant cette expression dans (2), on obtient l'équation de la trajectoire de l'électron :

$$y = \frac{eE}{2mv_0^2}x^2$$

b. Entre O et S , la trajectoire est une courbe d'équation de la forme $y = Ax^2$, c'est donc une portion de parabole d'axe y ' y .

c. À la sortie S de l'espace entre les plaques, on a $x_S = l$; soit $y_S = \frac{eE}{2mv_0^2}l^2$.

3. a. Le champ \vec{E} a une valeur qui dépend de la tension U entre les plaques et de la distance d entre P_1 et P_2 ; soit : $E = \frac{U}{d}$.

En reportant cette expression dans l'expression de y_S ; on obtient : $y_S = \frac{eU}{2mdv_0^2}l^2$ soit pour y_A :

$$y_A = \frac{elL}{mdv_0^2}U$$

La déviation verticale y_A est proportionnelle à la tension U appliquée entre les plaques.

b. Si U diminue, Y_A diminue proportionnellement.

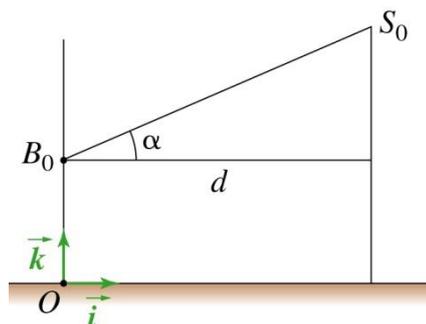
Si U change de signe, le champ \vec{E} change de sens et la déviation change de sens : y_A devient négatif.

Exercices de synthèse

27. Dans le référentiel terrestre, on choisit un repère orthonormé $\{O; \vec{i}, \vec{k}\}$ dans le plan vertical de B_0 et S_0 .

On établit les équations du mouvement de chute libre des points matériels B et S d'accélération $\vec{a} = \vec{g}$.

L'ordonnée de B_0 est h , celle de S_0 est H .



© CORÉDOC. NATHAN 2012

Pour B		Pour S	
$a_{Bx} = 0$	et $a_{Bz} = -g$	$a_{Sx} = 0$	et $a_{Sz} = -g$
$v_{Bx} = v_0 \cos\alpha$	et $v_{Bz} = -gt + v_0 \sin\alpha$	$v_{Sx} = 0$	et $v_{Sz} = -gt$
$x_B = (v_0 \cos\alpha)t$	et $y_B = -\frac{1}{2}gt^2 + (v_0 \sin\alpha)t + h$	$x_S = d$	et $y_S = -\frac{1}{2}gt^2 + H$

(1) S et B se rencontrent s'il existe une date t pour laquelle on a simultanément :

$$x_B = x_S \quad \text{et} \quad y_B = y_S$$

(2) S et B se rencontrent avant d'arriver sur le sol si pour cette date t , on a :

$$y_B \quad \text{ou} \quad y_S > 0$$

Conditions (1) : quand $x_B = x_S$; on déduit $t = \frac{d}{v_0 \cos\alpha}$.

De $y_B = y_S$, on déduit $-\frac{1}{2}gt^2 + (v_0 \sin\alpha)t + h = -\frac{1}{2}gt^2 + H$ soit :

$$\frac{(v_0 \sin\alpha)d}{v_0 \cos\alpha} + h = H \quad \text{soit} \quad d \tan\alpha = H - h$$

Avec les données géométriques de la situation, on trouve :

$$\tan\alpha = \frac{H-h}{d}$$

Les conditions (1) sont donc toujours réalisées : B et S se rencontrent toujours si la condition (2) est réalisée.

Condition (2) : $y_S > 0$ amène à $y_S = -\frac{1}{2}gt^2 + H > 0$ soit $-\frac{1}{2}g\left(\frac{d}{v_0 \cos\alpha}\right)^2 + H > 0$.

En éliminant $\cos^2\alpha$ avec la relation $\frac{1}{\cos^2\alpha} = 1 + \tan^2\alpha$; on en déduit :

$$v_0^2 > \sqrt{\frac{g(d^2 + (H-h)^2)}{2H}} \quad \text{soit} \quad v_0 > 6,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

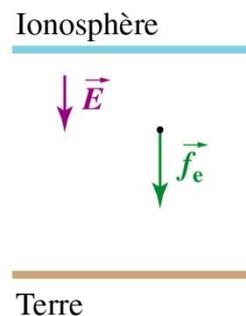
Il existe donc une vitesse limite de lancement de la balle pour qu'elle atteigne le singe pendant sa chute : cette vitesse doit être supérieure à $6,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

28. a. La force électrique qui s'exerce sur un ion positif de charge $q = e$ est :

$$\vec{f}_e = e \vec{E}$$

On en déduit que \vec{f}_e a même direction et même sens que le champ \vec{E} et sa valeur est $f_e = eE$.

Le champ est vertical et son sens va de l'ionosphère (plaque chargée positivement) vers la Terre (plaque chargée négativement).



© CORÉDOC, NATHAN 2012

b. Le poids de l'ion a pour valeur :

$$p = mg \text{ soit } p = 4,8 \times 10^{-26} \times 9,8 = 4,7 \times 10^{-25} \text{ N}$$

La force électrique qui s'exerce sur l'ion a pour valeur :

$$f_e = 1,6 \times 10^{-19} \times 1,0 \times 10^2 = 1,6 \times 10^{-17} \text{ N}$$

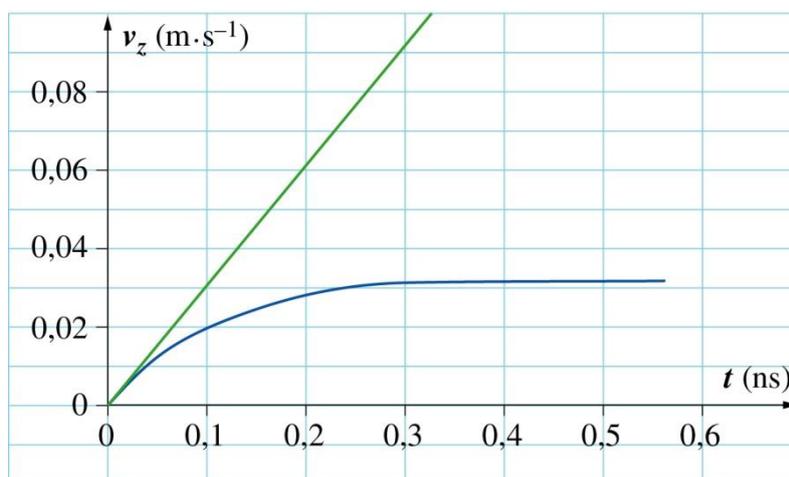
$$\frac{f_e}{p} = \frac{1,6 \times 10^{-17}}{4,7 \times 10^{-25}} = 3,4 \times 10^7$$

La valeur p du poids est donc environ 30 millions de fois plus faible que la valeur f_e de la force électrique.

c. Si la force électrique $\vec{f}_e = e \vec{E}$ était la seule force qui s'exerçait sur l'ion, celui-ci aurait une accélération $\vec{a} = \frac{e}{m} \vec{E}$; soit une accélération constante, et donc le mouvement de l'ion serait

uniformément accéléré. On aurait : $a_z = \frac{eE}{m}$ et $v_z = a_z t$. v_z serait une fonction linéaire de t .

Dans le manuel élève, une erreur sans conséquence sur les résultats numériques a été corrigée : l'axe des temps est gradué en nanoseconde (au lieu de milliseconde).



© CORÉDOC, NATHAN 2012

Dans le cas étudié, la valeur de la vitesse tend très rapidement vers une valeur limite. La particule est donc soumise à des forces qui ne sont pas négligeables devant la force électrique.

d. Quand la valeur limite est atteinte, le mouvement de l'ion est rectiligne uniforme. D'après le principe d'inertie, on a $\vec{F} + \vec{f}_e = \vec{0}$. On a alors $\vec{F} = -\vec{f}_e$

Proposition : l'atmosphère est constituée de nombreuses molécules et de nombreux ions avec lesquels l'ion étudié peut entrer en interaction. \vec{F} modélise à chaque instant l'ensemble de ces interactions.

29. Deux corrections sont à signaler dans le manuel élève :

- $D = 12,0 \text{ m}$ (et non 12) sur la figure ;
- $h = 90 \text{ cm}$ (et non 90,0) dans la question c.

a. $\vec{a} = \vec{g}$ d'où $a_x = 0$ et $a_z = -g$.

b. Équation de la trajectoire : à partir des coordonnées de l'accélération, par intégration, on obtient successivement les coordonnées du vecteur vitesse de la balle et les coordonnées du vecteur position :

$$\begin{aligned} v_x &= v_0 & v_z &= -g \times t \\ x &= v_0 \times t & z &= -\frac{1}{2} g \times t^2 + H \end{aligned}$$

En éliminant t entre $x(t)$ et $z(t)$, on obtient :

$$z = \frac{-gx^2}{2v_0^2} + H$$

c. Pour que la balle passe au-dessus du filet, il faut que lorsque $x = x_{\text{filet}}$, on ait $z_{\text{filet}} > h$:

$$z_{\text{filet}} = \frac{-gx_D^2}{2v_0^2} + H \quad \text{soit} \quad z = 0,74 \text{ m}$$

La balle rentre dans le filet !

30. a. Coordonnées du vecteur vitesse à $t_0 = 0 \text{ s}$:

$$v_{0x} = v_0 \cos \alpha \qquad v_{0z} = v_0 \sin \alpha$$

b. Le système étudié est la balle. Le référentiel choisi est le référentiel terrestre galiléen. La balle est soumise à une seule force, son poids. En appliquant la deuxième loi de Newton pour un solide de masse m constante on obtient :

$$\vec{a} = \vec{g}$$

d'où dans le repère proposé :

$$a_x = 0 \qquad a_z = -g$$

c. Par intégration, on obtient les coordonnées du vecteur vitesse :

$$v_x = C_1 = v_0 \cos \alpha \qquad v_z = -gt + C_2 \quad \text{soit ici} \quad v_z = -gt + v_0 \sin \alpha$$

d. Par intégration, on établit les coordonnées du vecteur position :

$t_0 = 0$, on a $x = 0$ et $z = 0$

$$x = (v_0 \cos \alpha)t + C_3 \quad \text{soit ici} \quad x = (v_0 \cos \alpha)t \quad \text{car à } t_0 = 0, \text{ on a } x = 0$$

$$z = -\frac{1}{2}gt^2 + (v_0 \sin \alpha)t + C_4 \quad \text{soit ici} \quad z = -\frac{1}{2}gt^2 + (v_0 \sin \alpha)t \quad \text{car à } t_0 = 0, \text{ on a } z = 0$$

L'équation de la trajectoire du projectile est obtenue en éliminant t entre $x(t)$ et $y(t)$.

On obtient :

$$z = \frac{-gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} + (\tan \alpha)x$$

e. La vitesse en S ne peut être nulle, car quelle que soit la position de la balle, elle garde une même vitesse de déplacement horizontale $v_x = v_0 \cos \alpha$.

f. Au point S , le vecteur vitesse est tangent à la trajectoire :

$$v_{Sz} = 0 \quad \text{soit} \quad -gt_S + v_0 \sin \alpha = 0$$

On déduit :

$$t_S = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}$$

d'où :
$$y_S = -\frac{1}{2}g \left(\frac{v_0 \sin \alpha}{g} \right)^2 + (v_0 \sin \alpha) \left(\frac{v_0 \sin \alpha}{g} \right) = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$$

La flèche vaut donc :

$$y_S = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$$

g. La portée du tir correspond à la valeur de la distance OI soit à x_I (abscisse du point d'impact I).

Au point I , on a $z_I = 0$, soit :

$$\frac{-gx_I^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} + (\tan \alpha)x_I = 0 \text{ pour } x \neq 0$$

On déduit la portée du tir :

$$x_I = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$$

h. Calcul de la flèche et de la portée.

$$\text{flèche : } y_S = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g} = 4,1 \text{ m}$$

$$\text{portée : } x_I = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g} = 29 \text{ m}$$

i. *La simulation est à disposition sur les sites compagnon Sirius.*

Avec la simulation on retrouve ces valeurs :

- Deux tirs ayant la même vitesse de lancement ont la même portée lorsque les angles de tir sont complémentaires.
- La portée est maximale lorsque l'angle de tir est de 45° .

Remarque : ces résultats peuvent être établis à partir des expressions de y_S et de x_I .

Même portée pour un angle de tir de α et $(\frac{\pi}{2} - \alpha)$:

$$\sin 2(\frac{\pi}{2} - \alpha) = \sin (\pi - 2\alpha) = \sin 2\alpha$$

On a dans les deux cas une même portée : $x_I = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$.

Portée maximale pour $\alpha = 45^\circ$:

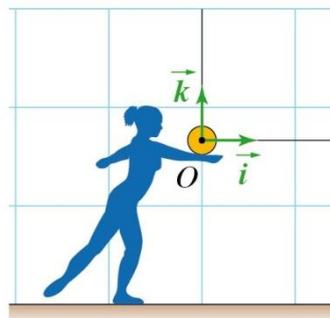
$$x_I \text{ est maximum pour } \sin 2\alpha = 1 \text{ soit pour } 2\alpha = \frac{\pi}{2} \text{ soit } \alpha = \frac{\pi}{4} \text{ rad} = 45^\circ$$

31. Dans le référentiel lié à la gymnaste, le ballon est lancé verticalement avec une vitesse \vec{v} .

Dans le référentiel terrestre, la vitesse de lancement a deux composantes :

- l'une horizontale de valeur V ;
- l'autre verticale de valeur v .

Écrivons les équations horaires du centre du ballon et de la main de la gymnaste dans le référentiel terrestre.



On choisit un repère $(O ; i, j)$ dans le plan de déplacement du ballon et de la gymnaste, l'origine O étant la position du point de lancement du ballon et $t_0 = 0$ s la date du lancement. Pour la gymnaste qui a un mouvement rectiligne uniforme de vitesse V , l'équation de son déplacement est :

$$x_G = V \times t$$

Pour le ballon, en mouvement de chute libre, son accélération est $\vec{a} = \vec{g}$ d'où dans le repère proposé :

$$a_x = 0 \quad a_z = -g$$

Par intégration, on obtient les coordonnées du vecteur vitesse :

$$v_x = V \quad v_z = -g \times t + v$$

Par intégration, on établit les coordonnées du vecteur position du ballon :

$$x_B = V \times t \quad z_B = -\frac{1}{2} g t^2 + v \times t$$

On note qu'à chaque instant t on a :

$$x_G = x_B = V \times t$$

La gymnaste récupèrera donc toujours le ballon si elle garde une vitesse constante car elle est toujours sur la même verticale que le ballon (choisir dans la simulation le référentiel lié à la gymnaste).

Par contre, suivant la vitesse verticale de lancement, le ballon montera plus ou moins haut au-dessus d'elle.

32. Proposition de rédaction de synthèse de documents

Nous avons choisi de faire travailler les élèves sur deux grands instruments scientifiques que sont le LHC et le synchrotron SOLEIL avec comme objectif premier d'aborder des réalisations scientifiques de portée internationale dont les mises en œuvre et résultats sont cités dans l'actualité.

Le deuxième objectif est bien sûr d'aider les élèves à structurer des informations pour réaliser une synthèse. Bien que dans les exercices traditionnels de synthèse, les documents soient des textes, nous avons ici intégré des animations qui sont, a priori, d'un abord plus facile que les textes de vulgarisation scientifique concernant le principe de ces deux instruments.

Remarque : l'animation concernant le LHC est commentée en anglais mais elle est sous-titrée en français.

Les questions posées permettent de structurer la synthèse en trois parties :

1. Rôle des champs électriques et magnétiques dans le mouvement des particules.
2. Points communs et différences entre les deux instruments.
3. Exemples d'applications en recherche fondamentale et appliquée.

Nous donnons ci-dessous quelques pistes concernant chacune de ces parties.

1. Rôle des champs électriques et magnétiques dans le mouvement des particules

En s'appuyant sur les deux animations, les élèves doivent différencier de façon explicite le rôle des champs électriques et magnétiques :

- le champ électrique permet d'accélérer des électrons (Soleil) ou des protons (LHC) dans un accélérateur linéaire (LINAC), d'augmenter leur énergie (champ électrique pulsé) dans les boosters, la boucle du Large Hadron Collider ;
- le champ magnétique a pour rôle de courber ou de maintenir la courbure de la trajectoire des particules chargées (boosters, anneaux de stockage, LHC).

2. Points communs et différences entre les deux instruments

Points communs :

- le LHC (Large Hadron Collider) et le synchrotron SOLEIL sont les deux grands équipements qui utilisent l'énergie de faisceaux de particules pour la recherche fondamentale ;
- ces deux instruments possèdent accélérateurs de particules et larges boucles dans lesquelles circulent les faisceaux de particules chargées ;
- les particules qui circulent dans ces deux instruments ont des vitesses proches de celle de la lumière.

Différences :

- les particules sont différentes : électrons dans le synchrotron Soleil, protons dans le LHC ;
 - les expériences sont également différentes : dans le LHC (Large Hadron Collider), ce sont les particules émises lors de chocs entre protons de très haute énergie qui sont étudiées ;
 - dans SOLEIL, ce sont les interactions entre le rayonnement synchrotron (rayonnement lumineux très intense) et l'échantillon de matière qui permettent d'étudier les propriétés de celle-ci ;
 - les objectifs scientifiques diffèrent également pour ces deux instruments.
- Comme l'indique le texte sur les domaines d'application de SOLEIL, ce sont les structures et propriétés de la matière qui sont explorées avec le rayonnement synchrotron. Pour le LHC, les questions qui guident les recherches concernent la physique théorique.

3. Exemples d'applications en recherche fondamentale et appliquée

- pour le LHC : recherche et découverte du boson de Higgs, nature de la matière noire, antimatière, recherches sur les premiers instants de l'Univers (le Big Bang) – tests des théories de la physique ;
 - pour SOLEIL : les domaines d'application sont cités dans le texte (physique, médecine et biologie, chimie, ...).
-

Chapitre 10 – Mouvements des satellites et planètes

Manuel pages 203 à 222

Choix pédagogiques

Ce troisième chapitre du thème « Comprendre » traite principalement des mouvements de satellites et des planètes.

L'étude cinématique des mouvements circulaires n'ayant pas été encore menée, la première partie du cours lui est consacrée. Les mouvements circulaires, uniformes ou non, y sont décrits et les caractéristiques du vecteur accélération sont données dans chacun des cas.

Il s'agit d'apporter les éléments nécessaires à l'étude dynamique des mouvements de satellites et planètes menée dans la deuxième partie. Celle-ci propose une démonstration, dans l'approximation des trajectoires circulaires, du caractère uniforme du mouvement d'un satellite et établit l'expression de la vitesse et de la période de celui-ci. Le choix d'utiliser le repère de Frenet a été pris dans le but de respecter les méthodes proposées dans les chapitres précédents, notamment la projection dans un repère de la relation vectorielle qui découle de l'application de la deuxième loi de Newton, afin de résoudre le problème posé.

L'énoncé des lois empiriques de Kepler fait l'objet de la troisième partie. La loi des périodes y est expliquée à partir des relations de la partie précédente et exploitée dans l'approximation des trajectoires circulaires.

Le programme de T^{erm} S n'indique pas de compétences expérimentales exigibles en relation directe avec ce chapitre. Les activités expérimentales proposées permettent néanmoins de saisir ce que représente un vecteur accélération et de mobiliser les autres compétences exigibles formulées dans le programme et relatives à ce chapitre. Elles peuvent constituer un point d'entrée de chacune des parties du cours ou être mise en œuvre a posteriori.

Des animations, des simulations, des vidéos documentaires et d'expériences sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et sur les sites compagnon afin d'illustrer ce chapitre et aider à sa compréhension.

Page d'ouverture

La photographie présente les points principaux traités dans ce chapitre : mouvements circulaires et mouvements de satellites et planètes. Suite à la lecture de la légende, le professeur peut poser la problématique suivante : « comment expliquer que la période de révolution d'un élément d'anneau diffère selon son altitude ? » et proposer d'apporter les éléments de réponses au fil de la progression dans le chapitre.

Activités

Activité expérimentale 1. Mouvement circulaire uniforme et accélération

Commentaires

Lors de cette activité, l'élève construit graphiquement le vecteur accélération d'un point en mouvement circulaire uniforme. Il est ainsi amené à :

- comprendre qu'une accélération peut-être non nulle même si un mouvement est uniforme ;
- vérifier les caractéristiques du vecteur accélération dans le cas particulier, mais important pour la suite, de l'étude d'un mouvement circulaire uniforme. Ces caractéristiques (point d'application, direction, sens et valeur) étant énoncées dans le cours sans démonstration, la vérification par construction graphique facilite la compréhension, et donc la connaissance, de celles-ci.

Réponses

1. Exploiter

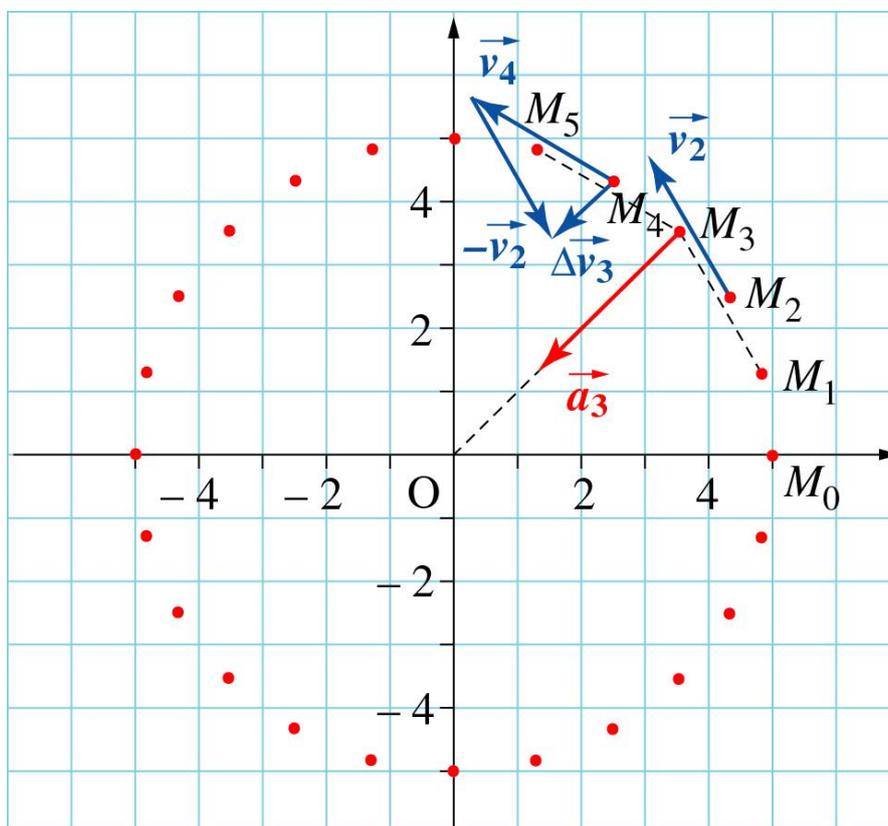
a. Les points M_0 à M_5 sont placés sur l'enregistrement.

b. M_1M_3 mesure 2,6 cm sur le document original $\Rightarrow M_1M_3 = 2,6$ m en réalité. Ainsi :

$$v_2 = \frac{M_1M_3}{2\tau} = \frac{2,6}{2 \times 100 \times 10^{-3}} = 13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

De même :

$$v_4 = \frac{M_3M_5}{2\tau} = \frac{2,6}{2 \times 100 \times 10^{-3}} = 13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$



Le tracé des vecteurs est réalisé sur l'enregistrement :

- \vec{v}_2 est appliqué en M_2 . Il a même direction et même sens que $\overline{M_1M_3}$; il est donc dirigé parallèlement à (M_1M_3) et il est orienté de M_1 vers M_3 .

À l'échelle 1 cm pour $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, sa taille est de $\frac{13}{5} = 2,6 \text{ cm}$.

- \vec{v}_4 est appliqué en M_4 . Il a même direction et même sens que $\overline{M_3M_5}$; il est donc dirigé parallèlement à (M_3M_5) et il est orienté de M_3 vers M_5 .

À l'échelle 1 cm pour $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, sa taille est de $\frac{13}{5} = 2,6 \text{ cm}$.

c. Le vecteur $\Delta\vec{v}_3 = \vec{v}_4 - \vec{v}_2$ est tracé par différence des vecteurs \vec{v}_4 et \vec{v}_2 en reportant $-\vec{v}_2$ au sommet de \vec{v}_4 . La valeur a_3 de l'accélération en M_3 est donc :

$$a_3 = \frac{\|\Delta\vec{v}_3\|}{2\tau} = \frac{\|\vec{v}_4 - \vec{v}_2\|}{2\tau}$$

Or $\Delta\vec{v}_3 = \vec{v}_4 - \vec{v}_2$ mesure 1,3 cm sur le papier avec l'échelle 1 cm pour $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ soit :

$$\|\vec{v}_4 - \vec{v}_2\| = 1,3 \times 5 = 6,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Finalement :

$$a_3 = \frac{6,5}{2 \times 100 \times 10^{-3}} = 33 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

\vec{a}_3 est appliqué en M_3 . Il a même direction et même sens que $\Delta\vec{v}_3 = \vec{v}_4 - \vec{v}_2$. On peut choisir l'échelle 1 cm pour $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ pour sa représentation : sa taille est alors de 3,3 cm.

2. Interpréter et conclure

a. L'accélération n'est pas nulle car elle traduit la variation du vecteur vitesse par unité de temps. Bien que le mouvement soit uniforme et donc que la valeur de la vitesse ne change pas, le mouvement est circulaire et donc non rectiligne : la direction du vecteur vitesse change et subit une variation non nulle par unité de temps.

b. L'accélération est bien radiale puisque sa direction est celle d'un rayon du cercle modélisant la trajectoire. Elle passe par O . Elle est centripète puisque le vecteur est orienté vers le centre O du cercle. Si on applique la relation donnée en **2.b.** :

$$a_3 = \frac{v_3^2}{R} = \frac{13^2}{5,0} = 34 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

L'écart relatif de cette valeur par rapport à celle déduite du tracé est de 3,0 %. Il est faible (inférieur à 5 %) : les valeurs sont compatibles.

c. La vitesse maximale de rotation est de 38,6 tours par minute. En notant L , la longueur du bras, la nacelle parcourt la distance $D = 2\pi L$ à chaque tour. Sa vitesse (linéaire) maximale est donc de :

$$v = \frac{2\pi L}{T} = \frac{38,6 \times 2\pi \times 18}{60} = 73 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

L'accélération de la nacelle est donc :

$$a = \frac{v^2}{L} = \frac{73^2}{18} = 3,0 \times 10^2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 10. Mouvements des satellites et planètes

L'accélération étant de « 30 G », « G » = 10 m·s⁻² correspond à l'intensité de la pesanteur terrestre notée habituellement « g ».

D'autre part :

$$a = \frac{v^2}{L} = \frac{\left(\frac{2\pi L}{T}\right)^2}{L} = \frac{4\pi^2 L}{T^2}$$

Pour une période de rotation donnée (durée T d'un tour fixée), la valeur de l'accélération augmente avec L . Ainsi, on a intérêt à placer la cabine loin du centre pour augmenter la valeur de l'accélération et préparer les membres de l'équipage à des conditions plus extrêmes.

Activité expérimentale 2. Étude d'un mouvement circulaire

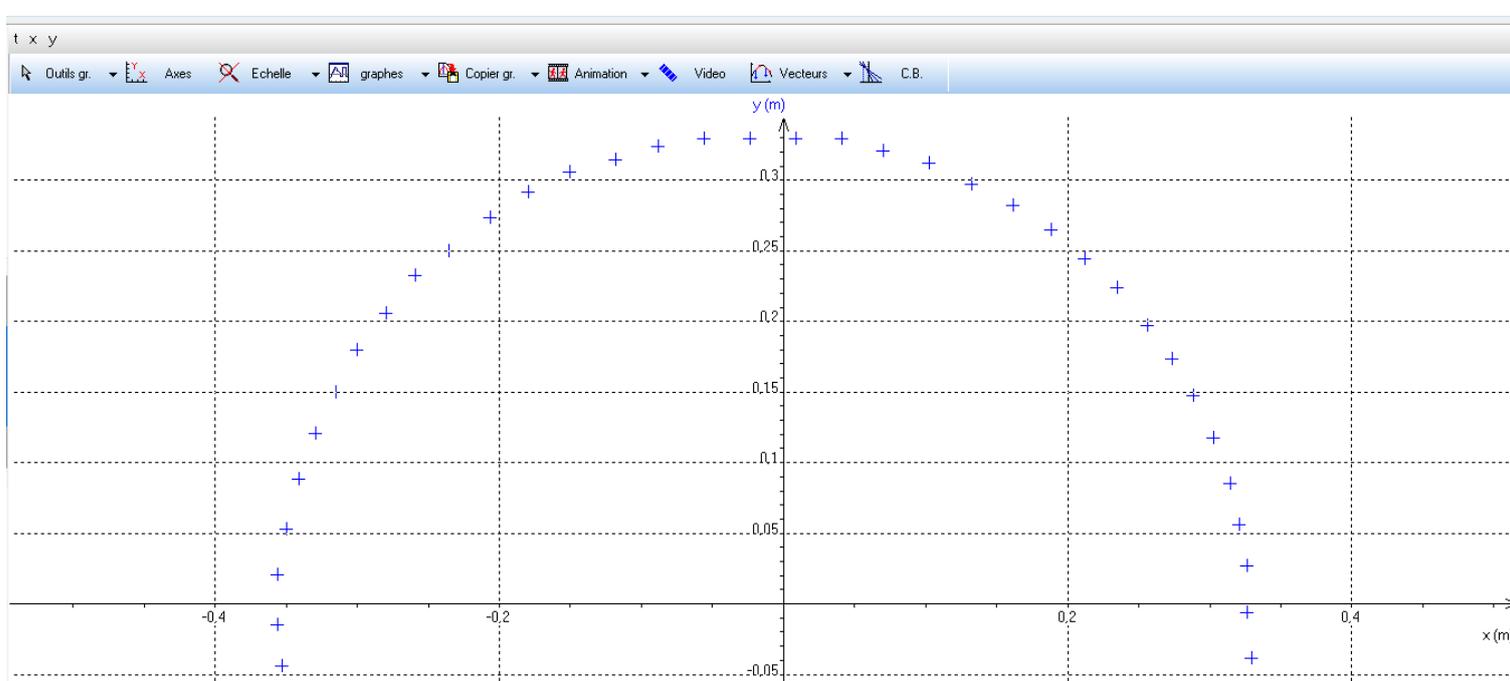
Commentaires

Cette activité propose d'exploiter un enregistrement vidéo pour vérifier l'uniformité du mouvement d'un point filmé et les caractéristiques du vecteur accélération de ce point, déduite des coordonnées données dans la base de Frenet. Sur la vidéo, l'échelle est donnée par le triple décimètre : 30 cm entre les deux marques blanches.

Réponses

1. Observer

a. Le fichier obtenu est issu de la vidéo fournie sur le site Nathan, vidéo réalisée en situation de classe. Le traitement est effectué avec *Regavi* puis *Regressi*.



b. Les points obtenus sont pratiquement équidistants, le mouvement est donc probablement uniforme.

2. Exploiter les résultats

a. La grandeur r est créée à partir des coordonnées x et y :

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (\text{ou } r = \text{sqrt}(x^2 + y^2))$$

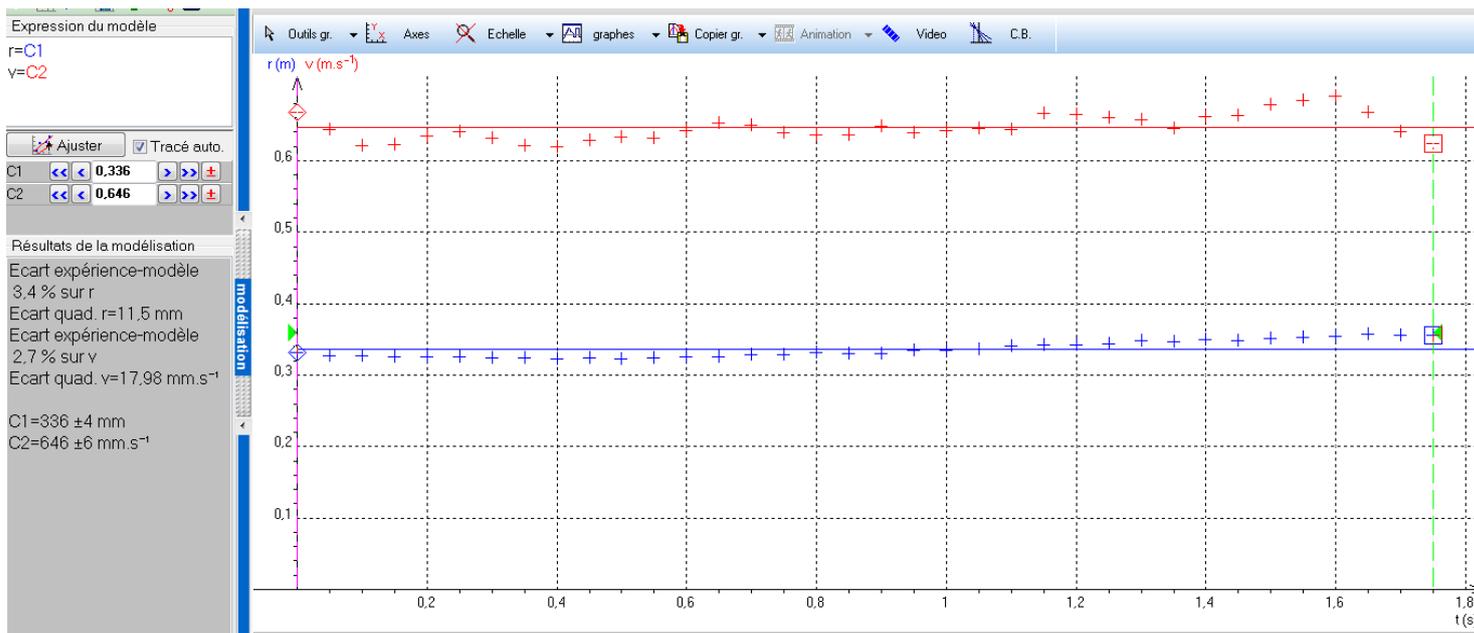
Ensuite, il faut créer les grandeurs :

$$v_x = \frac{dx}{dt} \quad \text{et} \quad v_y = \frac{dy}{dt} \quad \text{puis} \quad v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (\text{ou } \text{sqrt}(v_x^2 + v_y^2))$$

Les résultats pour r et v en fonction du temps sont affichés ci-après.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur

Chapitre 10. Mouvements des satellites et planètes



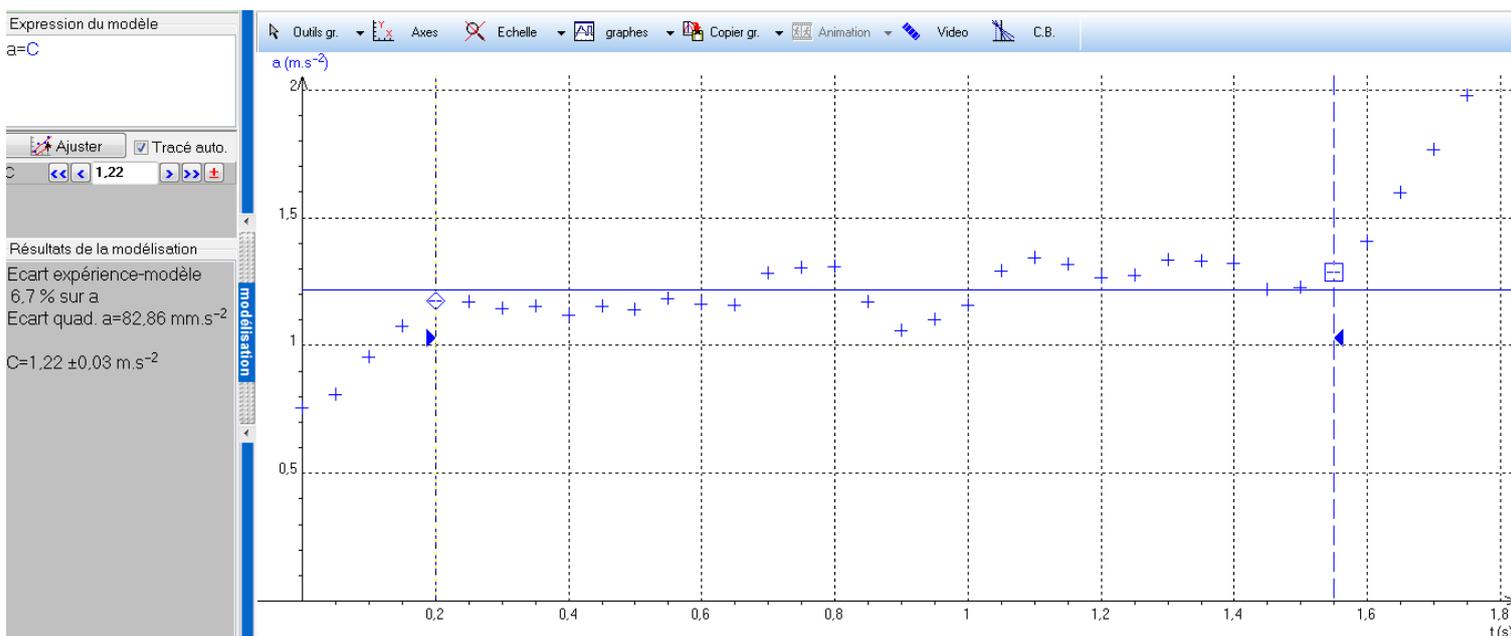
L'écart relatif expérience-modèle ($r = C_1$) est faible (inférieur à 5 %). r est bien constant. Le mouvement est circulaire.

$r = 33,6 \pm 0,4$ cm d'après le logiciel, ce qui correspond à la valeur de $34,0 \pm 0,3$ cm que l'on peut mesurer à l'aide d'un régle gradué en cm (incertitude-type $s = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0,288$ cm arrondie à 0,3 cm) : 1,2 % d'écart seulement séparent les deux valeurs et les intervalles de mesures se chevauchent.

b. Concernant la vitesse, l'écart relatif expérience-modèle ($v = C_2$) est faible (inférieur à 5 %). La valeur v de la vitesse peut-être considérée comme constante et le mouvement uniforme.

$$v = 646 \pm 6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$$

c. Concernant l'accélération, l'écart relatif expérience-modèle ($a = C$) est plus important. Il nous faut réduire le domaine d'étude pour minimiser les erreurs de calculs de dérivées sur les premières et dernières valeurs initiales.



Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 10. Mouvements des satellites et planètes

L'écart est alors de 6,7 %. Compte tenu des erreurs de pointage et de calculs de dérivées enchaînés, on peut considérer que la valeur de l'accélération est constante.

$$a = 1,22 \pm 0,03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

3. Interpréter puis conclure

a. Dans le cas d'un mouvement uniforme :

- $v = \text{cte} \Rightarrow a_t = \frac{dv}{dt} = 0$;
- $a_n = \frac{v^2}{r}$ reste constant.

b. Si ces propriétés sont vérifiées :

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2} = \sqrt{0 + a_n^2} = a_n$$

En utilisant les valeurs de v et r déterminées à l'aide du logiciel, on peut calculer a_n :

$$a_n = \frac{v^2}{r} = \frac{0,646^2}{0,336} = 1,24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

On retrouve la valeur de a à 2 % près. Les valeurs de a et a_n peuvent être considérées comme égales, constantes et a_t nulle.

c. « Lorsqu'un point M est animé d'un mouvement circulaire uniforme, le vecteur accélération est porté par le rayon de sa trajectoire, son sens est vers l'intérieur de la trajectoire (centripète), sa valeur est constante et s'exprime par $a = \frac{v^2}{r}$. »

Simulation 3. Satellite en orbite circulaire

Commentaires

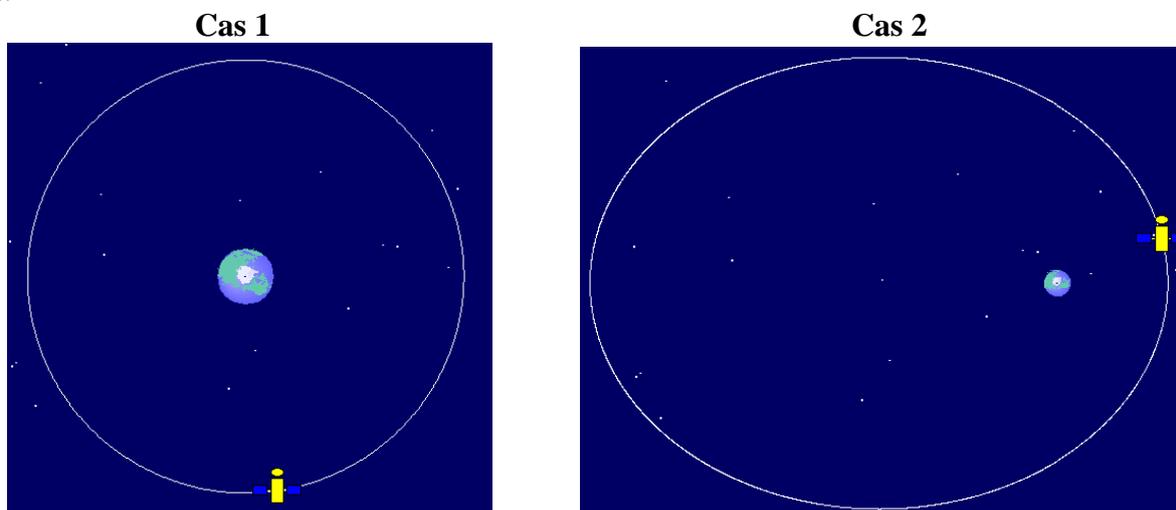
L'objectif de cette activité est de mettre en évidence le caractère uniforme du mouvement d'un satellite en orbite circulaire, de réinvestir les lois de Newton (deuxième loi et loi d'interaction gravitationnelle) pour lui donner une explication et déterminer l'influence de la du rayon r de l'orbite sur celle de la vitesse d'un satellite en orbite circulaire.

Cette activité peut également donner l'occasion d'expliquer comment construire simplement une ellipse (méthode du jardinier) et d'introduire les termes de foyers et de grand axe pour préparer l'énoncé des lois de Kepler.

Réponses

1. Observer

a.

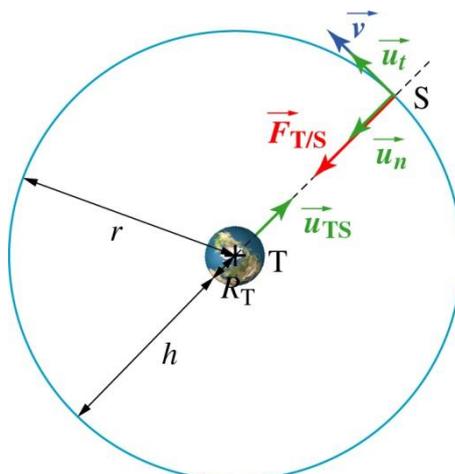


Le mouvement est circulaire dans le cas 1. La valeur de la vitesse est constante : le mouvement est uniforme.

b. Dans le cas d'une orbite elliptique (cas 2), la valeur de la vitesse n'est pas constante : le mouvement n'est pas uniforme. La valeur de la vitesse est minimale lorsque le satellite est au plus loin de la Terre (apogée de sa trajectoire), elle est maximale lorsqu'il est au plus près (périgée).

2. Interpréter

a.



Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 10. Mouvements des satellites et planètes

b. Le satellite S étant ponctuel et la Terre à répartition sphérique de masse, d'après la loi d'interaction gravitationnelle :

$$\overrightarrow{F_{T/S}} = -G \frac{m_s M_T}{r^2} \overrightarrow{u_{TS}}$$

avec $\overrightarrow{u_{TS}}$ vecteur unitaire de direction (TS) orienté de T vers S (voir figure **a.**).

c. L'angle entre $\overrightarrow{F_{T/S}}$ et \vec{v} est continuellement égale à 90° . La force de gravitation ne fait donc pas varier la valeur v de la vitesse \vec{v} mais uniquement la direction de \vec{v} .

d. En considérant que m est constante, l'application de la deuxième loi de Newton donne la relation :

$$\overrightarrow{F_{T/S}} = m_s \times \vec{a} \quad \text{soit} \quad \vec{a} = -G \frac{M_T}{r^2} \overrightarrow{u_{TS}}$$

La direction du vecteur accélération est donc celle du rayon du cercle : \vec{a} est donc radiale, ce qui est conforme avec l'accélération d'un solide en mouvement circulaire uniforme.

3. Exploiter les résultats et conclure

a. Une modification de r permet d'obtenir à nouveau un mouvement circulaire.

Il faut choisir $h_0 = 23\,550$ km soit $r_0 = 29,9 \times 10^3$ km. Le mouvement est uniforme dans ce cas.

b. Le mouvement d'un satellite en orbite circulaire est nécessairement uniforme. Sa vitesse est fonction du rayon de son orbite. Plus celui-ci est petit, plus la vitesse doit être élevée pour que le satellite adopte une orbite circulaire.

Simulation 4. Pesée de Jupiter

Commentaires

À partir d'observations de qualité faites à l'aide du logiciel *Stellarium*, cette activité permet d'exploiter la troisième loi de Kepler dans le cas des quatre satellites « galiléens » de Jupiter pour déterminer la masse de cet astre.

Un tutoriel du logiciel, adapté à cette simulation, est proposé ci-dessous.

Manipulation souhaitée	Opération permettant de la réaliser
Rechercher un astre	<p>☞ Taper sur la touche F3 ou cliquer l'icône de fenêtre de recherche (disponible dans la barre de menu qui peut être masquée) :</p>  <p>Remarque : pour suivre la planète sous l'horizon, l'icône « sol »  doit être éteint :</p>  <p>Cliquer dessus ou appuyer sur G</p>
Faire apparaître le nom des planètes	☞ Cliquer sur l'icône  afin qu'il soit allumé
Augmenter / diminuer le grossissement	☞ Tourner la molette de la souris
Choisir une monture équatoriale	☞ Cliquer sur l'icône  afin qu'il soit allumée
Avancer dans le temps	☞ Appuyer sur la touche de raccourcis clavier « l ». Répéter l'opération pour augmenter la vitesse de défilement
Arrêter l'avancement dans le temps	☞ Appuyer sur la touche « k »
Reculer dans le temps	☞ Appuyer sur la touche « j »
Revenir à la date de début de l'expérience	☞ Appuyer sur touche « 8 »

Réponses

1. Exploiter les résultats

Exemple de résultats dans le cadre de l'activité proposée

- Distance Jupiter–Terre au moment de la visée : $D = 4,19946 \text{ u.a.}$;
- Champ de vision : $\theta = 0,183^\circ$;
- $L = 21,0 \text{ cm.}$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur

Chapitre 10. Mouvements des satellites et planètes

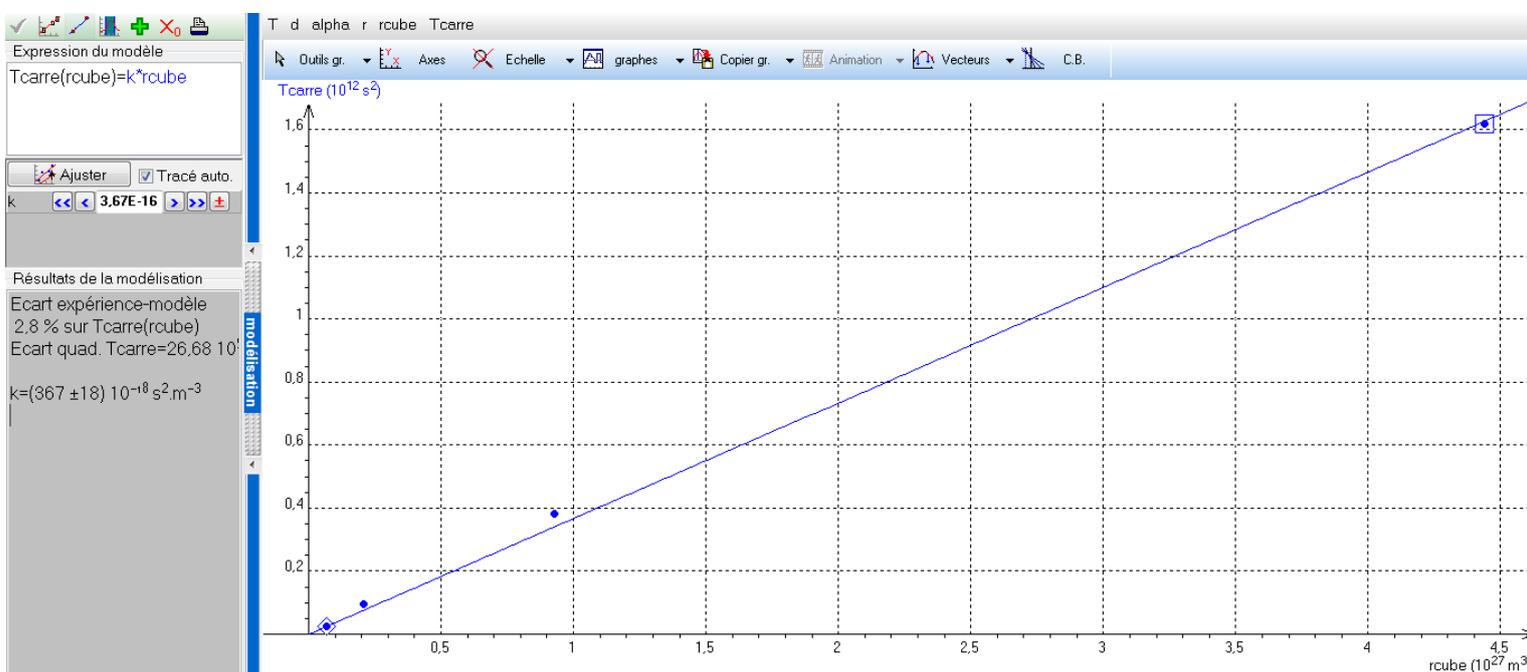
a. $T = t_2 - t_1$.

b. $\alpha = \theta \frac{d}{L} = 0,183 \times \frac{d}{0,21}$.

c. r (en m) = D (en m) $\times \tan \alpha \Rightarrow r = 4,19946 \times 1,496 \times 10^{11} \times \tan \alpha$.

Bilan des mesures, représentation $T^2 = f(r^3)$ et modélisation par une fonction linéaire :

Nom du satellite	d	T	α (°)	r
Io	0,0430	$1,525 \times 10^5$	0,03747	$4,109 \times 10^8$
Europe	0,0620	$3,065 \times 10^5$	0,05403	$5,924 \times 10^8$
Ganymède	0,1020	$6,172 \times 10^5$	0,08889	$9,746 \times 10^8$
Callisto	0,1720	$1,272 \times 10^6$	0,1499	$1,643 \times 10^9$



2. Interpréter et conclure

La modélisation conduit à $k = 3,67 \times 10^{-16} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$.

La masse de Jupiter est $M_J = \frac{4\pi^2}{Gk} = 1,61 \times 10^{27} \text{ kg}$ (valeur table $1,90 \times 10^{27} \text{ kg}$).

Une discussion peut s'engager sur la précision du résultat et peut se poursuivre avec le traitement de l'exercice 24 page 220.

Exercices d'application

5 minutes chrono !

1. Mots manquants

- uniforme ; cercle ; valeur
- accélération ; perpendiculaire
- héliocentrique
- ponctuel ; répartition sphérique
- uniforme
- des orbites ; ellipse ; foyers
- des aires ; Soleil ; aires égales
- des périodes ; carré ; cube

2. QCM

- Quadruple si la valeur de la vitesse double.
 - Héliocentrique.
 - $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$.
 - $\frac{T^2}{r^3} = k$.
 - k dépend de la masse de l'astre autour duquel le satellite tourne.
-

Compétences exigibles

- Le mouvement du solide est circulaire car le solide décrit un arc de cercle. La corde étant inextensible, il se déplace en effet en restant à égale distance d'un point fixe.
 - Le mouvement du solide n'est pas uniforme car la valeur de la vitesse n'est pas constante. En effet, la distance entre deux positions consécutives du solide n'est pas constante alors que la durée qui les sépare l'est.
-

- L'accélération n'est pas nulle car le vecteur vitesse est modifié : il change de direction.
 - Le vecteur accélération du véhicule en mouvement circulaire et uniforme est :
 - radiale. Sa direction est celle du rayon de cercle correspondant à sa trajectoire ;
 - centripète. Il est orienté vers le centre du cercle ;

- a valeur est $a = \frac{v^2}{r} = \frac{\left(\frac{30}{3,6}\right)^2}{300} = 0,23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

- Si v est multipliée par 3 (soit une vitesse de $90 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$), a est multipliée par $3^2 = 9$.
-

5. a. $\frac{r}{L} = \frac{23,5 \times 10^3}{15} = 1,6 \times 10^3$. L est donc négligeable devant r .

Deimos peut être considéré comme ponctuel.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 10. Mouvements des satellites et planètes

b. En considérant Mars à répartition sphérique de masse et Deimos ponctuel, on peut écrire, d'après la loi d'interaction gravitationnelle :

$$\vec{F}_{\text{Mars/Deimos}} = -G \frac{M_{\text{Deimos}} M_{\text{Mars}}}{r^2} \vec{u}_{\text{OD}}$$

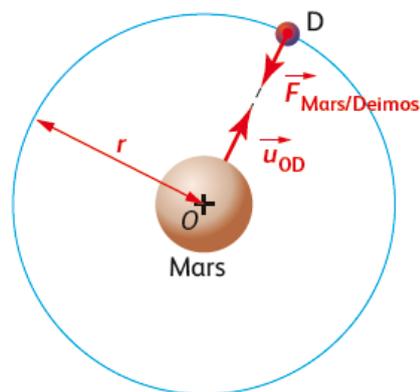
\vec{u}_{OD} est un vecteur unitaire de direction (OD) orienté de O vers D.

c. En considérant que M_{Deimos} est constante, l'application de la deuxième loi de Newton donne la relation :

$$\vec{F}_{\text{Mars/Deimos}} = M_{\text{Deimos}} \cdot \vec{a}_{\text{Deimos}}$$

d. \vec{a}_{Deimos} est donc colinéaire à $\vec{F}_{\text{Mars/Deimos}}$ donc à \vec{u}_{OD} .

\vec{a}_{Deimos} a pour direction la droite (OD), confondue avec le rayon de cercle correspondant à la trajectoire. Le mouvement de Deimos est circulaire et son vecteur accélération est radial. Le mouvement de Deimos est donc uniforme.



6. a. La courbe ainsi obtenue est une ellipse : en notant M un point de la courbe :

$$P_1M + P_2M = \text{cte}$$

b. Mercure se situe sur la courbe (le point M par exemple) et le soleil doit se situer en P_1 ou P_2 . En effet, d'après la 1^e loi de Kepler ou loi des orbites, Mercure décrit, dans le référentiel héliocentrique, une ellipse dont le Soleil occupe l'un des foyers.

7. a. D'après la 2^e loi de Kepler ou loi des aires, le segment [SP], qui relie le centre du Soleil à celui de la planète, balaie des aires égales pendant des durées égales : $A = A'$.

b. Pour respecter l'égalité précédente, $P_3P_4 < P_1P_2$. La distance parcourue pendant une même durée est plus grande lorsque la planète est plus loin du Soleil. Ainsi, la vitesse n'est pas la même entre P_1 et P_2 et entre P_3 et P_4 .

P est plus rapide sur le trajet P_1P_2 .

8. a. En utilisant les valeurs données dans le tableau de l'exercice, on peut écrire :

Satellite	$\frac{T^2}{r^3}$ (j ² ·km ⁻³)	OU	$\frac{T^2}{r^3}$ (s ² ·m ⁻³)
Io	$4,17 \times 10^{-17}$		$3,11 \times 10^{-16}$
Europe	$4,17 \times 10^{-17}$		$3,11 \times 10^{-16}$
Ganymède	$4,17 \times 10^{-17}$		$3,11 \times 10^{-16}$
Callisto	$4,17 \times 10^{-17}$		$3,11 \times 10^{-16}$

La troisième loi de Kepler est vérifiée pour ces satellites : $\frac{T^2}{r^3} = k$.

b. k dépend uniquement de la masse de l'astre autour duquel tournent les satellites. k permet donc de calculer la masse de Jupiter.

Compétences générales

9. a. En considérant Neptune et le Soleil ponctuels (ou à répartition sphérique de masse), la loi d'interaction gravitationnelle permet d'écrire :

$$F_{S/N} = G \frac{M_S M_N}{r_N^2}$$

$$F_{S/N} = \frac{6,67 \times 10^{-11} \times 1,99 \times 10^{30} \times 102 \times 10^{24}}{(4504 \times 10^9)^2}$$

$$F_{S/N} = 6,67 \times 10^{20} \text{ N}$$

b. $T_N = 2\pi \sqrt{\frac{r_N^3}{GM_S}}$ conduit à $T_N^2 = 4\pi^2 \frac{r_N^3}{GM_S}$

soit $\frac{T_N^2}{r_N^3} = \frac{4\pi^2}{GM_S}$ et donc $M_S = \frac{4\pi^2 r_N^3}{GT_N^2}$.

A.N. : en utilisant les valeurs données dans les rabats du manuel, on peut écrire,

$$M_S = \frac{4 \times \pi^2 \times (4504 \times 10^9)^3}{6,67 \times 10^{-11} \times (165 \times 365,25 \times 24 \times 3600)^2} = 1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$$

10. a. Dans la relation $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$: G est la constante de gravitation universelle, M la masse de Saturne et r le rayon de l'orbite de la particule étudiée.

b. v augmente si r diminue. Pour être plus rapide, une particule doit donc être plus proche du centre de Saturne. Par contre, sa masse n'intervient pas dans l'expression de v .

c. La période de révolution est la durée de parcours d'une circonférence de longueur $L = 2\pi r$. Le mouvement étant uniforme :

$$v = \frac{L}{T} \quad \text{soit} \quad T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi r}{\sqrt{\frac{GM}{r}}} = 2\pi r \sqrt{\frac{r}{GM}} \quad \text{soit} \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{GM}}$$

d. T est différent si r est différent. Ainsi, $T_A \neq T_B$. Si A et B sont alignés avec le centre de Saturne à un instant donné, lorsque B aura fait un tour, A ne l'aura pas encore terminé. A et B ne peuvent rester alignés avec le centre de Saturne. Les anneaux de Saturne ne peuvent pas être d'un seul tenant.

11. a. La période de révolution de la Terre est de un an.

b. D'après la troisième de Kepler :

$$\frac{T_{\text{Terre}}^2}{d_{\text{TS}}^3} = \frac{T_{\text{Jupiter}}^2}{d_{\text{JS}}^3} \quad \text{soit} \quad T_{\text{Jupiter}} = \sqrt{\frac{d_{\text{JS}}^3 T_{\text{Terre}}^2}{d_{\text{TS}}^3}} = T_{\text{Terre}} \sqrt{\left(\frac{d_{\text{JS}}}{d_{\text{TS}}}\right)^3} = 1 \times \sqrt{\left(\frac{7,8 \times 10^8}{1,5 \times 10^8}\right)^3} = 12 \text{ ans}$$

c. La troisième loi de Kepler s'applique seulement à tous les satellites d'un même astre. Elle est donc applicable pour la Lune et les satellites de la Terre. Les données concernant les satellites du Soleil ne sont donc pas utilisables pour déterminer la période de révolution de la Lune comme cela a été fait à la question précédente pour Jupiter.

12. a. Dans la relation $\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$, T représente la période de révolution d'Apollo, r est le rayon de son orbite autour de la Lune et M la masse de la Lune.

b. $\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$ conduit à $M = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2} = \frac{4\pi^2 (2040 \times 10^3)^3}{6,67 \times 10^{-11} \times (8240)^2} = 7,40 \times 10^{22} \text{ kg}$.

Exercices de méthode

13. Exercice résolu.

14. Dans le manuel de l'élève, ont été corrigées la longueur L (en mètre) du demi-grand axe de la trajectoire de :

- Jupiter : $778,3 \times 10^9$ (au lieu de $778,39 \times 10^9$) ;
- Saturne : $1429,0 \times 10^9$ (au lieu de $1427,0 \times 10^9$) ;

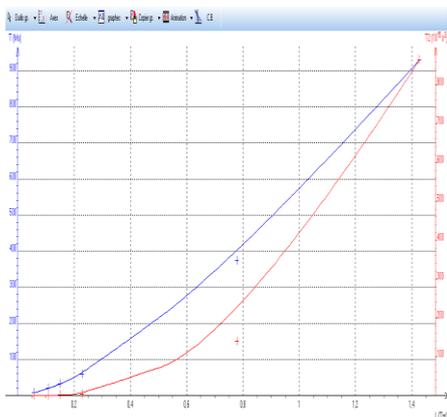
afin d'être en accord avec les valeurs indiquées dans les rabats du manuel.

a. Création du tableau et des variables : $T^2 = T \times T$, $L^2 = L \times L$, $L^3 = L \times L \times L$.

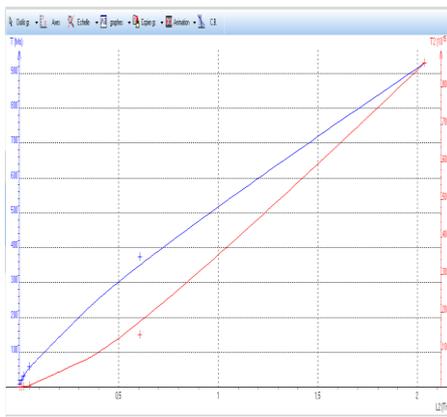
b. Remarque : seule la méthode graphique est détaillée dans ce corrigé. Une méthode calculatoire est employée dans l'exercice 24.

Méthode graphique : les courbes T^2 ou T en fonction de L , L^2 ou L^3 sont tracées. La recherche consiste d'abord à trouver la courbe qui représente au mieux une fonction linéaire, c'est-à-dire prenant la forme d'une droite passant par l'origine.

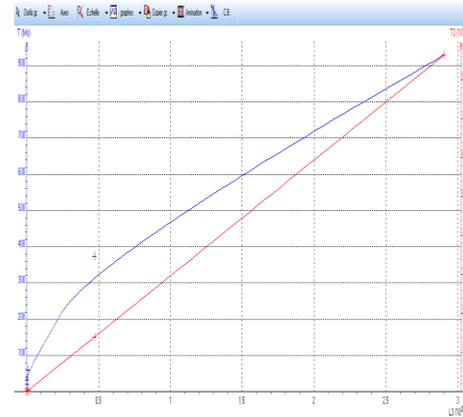
$T^2 = f(L)$ et $T = f(L)$



$T^2 = f(L^2)$ et $T = f(L^2)$



$T^2 = f(L^3)$ et $T = f(L^3)$

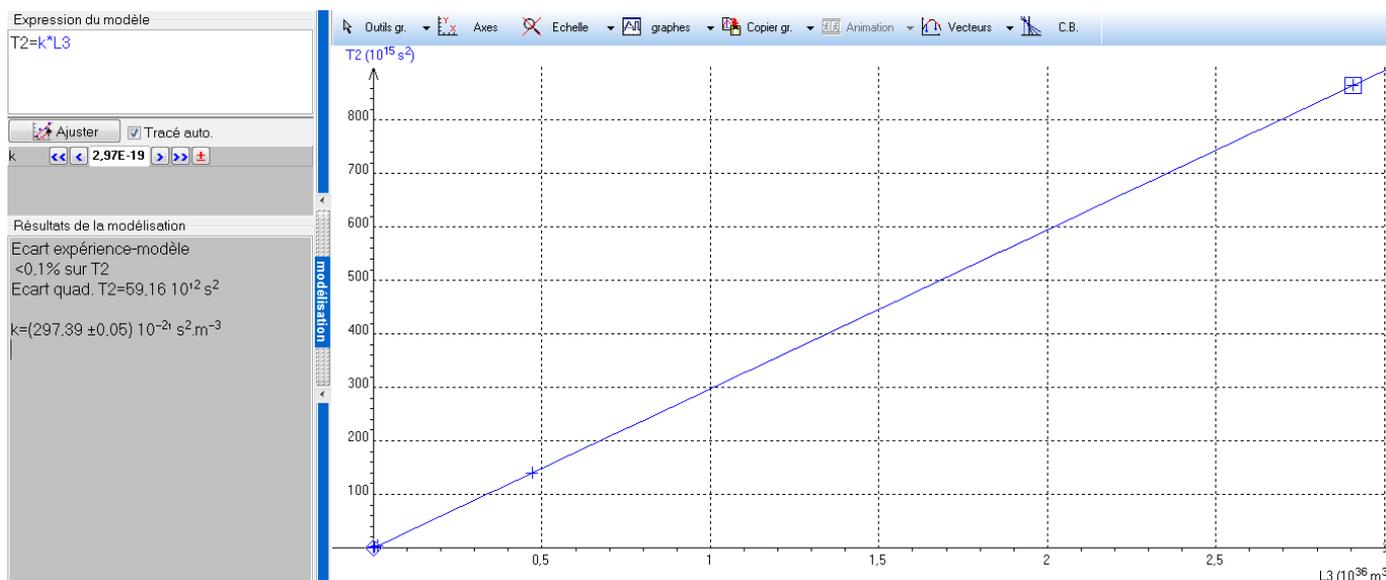


$T^2 = f(L^3)$ semble le plus se rapprocher d'une fonction linéaire de type : $T^2 = kL^3$.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur

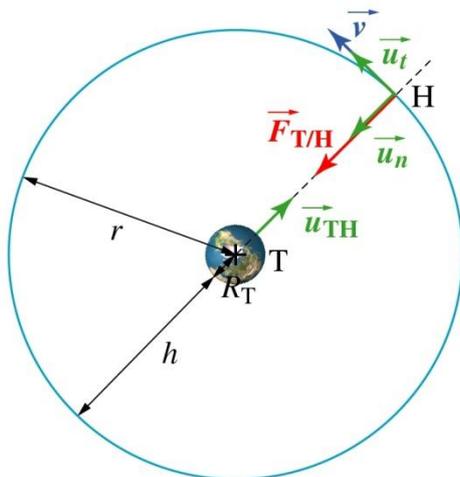
Chapitre 10. Mouvements des satellites et planètes

En modélisant la courbe, on vérifie que le modèle convient et on accède à la valeur de k :



c. $k = (297,39 \pm 0,05) \times 10^{-21} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ d'après le logiciel après modélisation.

15. a. Le système étudié est le satellite terrestre Hubble noté H sur le schéma, de masse m , qui décrit, dans le référentiel géocentrique galiléen, un cercle de rayon $r = R_T + h$.



b. H étant ponctuel et la Terre à répartition sphérique de masse, d'après la loi d'interaction gravitationnelle :

$$\vec{F}_{T/H} = -G \frac{mM_T}{r^2} \vec{u}_{TH}$$

\vec{u}_{TH} est un vecteur unitaire de direction (TH) orienté de T vers H.

$\vec{F}_{T/H}$ est donc appliquée en H, radiale et centripète (figure) et de valeur $F_{T/H} = G \frac{mM_T}{r^2}$.

c. En considérant que m est constante, l'application de deuxième loi de Newton donne la relation :

$$\vec{F}_{T/H} = m \cdot \vec{a} \quad \text{soit} \quad \vec{a} = -G \frac{M_T}{r^2} \vec{u}_{TH}$$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 10. Mouvements des satellites et planètes

\vec{a} est donc colinéaire à \vec{u}_{TH} . \vec{a} a pour direction la droite (TH) confondue avec le rayon de cercle correspondant à la trajectoire.

Le mouvement de Hubble est circulaire et son vecteur accélération est radial.

Le mouvement de Hubble est donc uniforme.

Ce que l'on peut vérifier de la manière suivante :

dans (H, \vec{u}_t , \vec{u}_n), $\vec{u}_n = -\vec{u}_{TH}$,

on peut ainsi écrire : $\vec{a} \begin{cases} 0 \\ G \frac{M_T}{r^2} \end{cases}$ et $\vec{a} \begin{cases} \frac{dv}{dt} \\ \frac{v^2}{r} \end{cases}$

L'égalité des coordonnées de \vec{a} sur (H, \vec{u}_t) conduit à la relation $\frac{dv}{dt} = 0$ valable à chaque instant soit : $v = \text{cte}$. Le mouvement est donc uniforme.

d. L'égalité des coordonnées de \vec{a} sur (H, \vec{u}_n) conduit à la relation :

$$G \frac{M_T}{r^2} = \frac{v^2}{r}$$

soit, après simplification et sachant que de $r = R_T + h$:

$$v = \sqrt{\frac{GM_T}{R_T + h}}$$

$$\text{A.N. : } v = \sqrt{\frac{6,67 \times 10^{-11} \times 5,97 \times 10^{24}}{6,38 \times 10^6 + 600 \times 10^3}} = 7,55 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

e. La période de révolution est la durée de parcours d'une circonférence de longueur $L = 2\pi r$. Le mouvement étant uniforme :

$$v = \frac{L}{T_H}$$

d'où :

$$T_H = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi r}{\sqrt{\frac{GM_T}{r}}} = 2\pi r \sqrt{\frac{r}{GM_T}} \text{ soit } T_H = 2\pi \sqrt{\frac{(R_T + h)^3}{GM_T}}$$

$$T_H = 2\pi \sqrt{\frac{(6,38 \times 10^6 + 600 \times 10^3)^3}{6,67 \times 10^{-11} \times 5,97 \times 10^{24}}} = 5,81 \times 10^3 \text{ s}$$

soit un écart relatif de 3 % (faible) par rapport à l'indication du texte que l'on peut donc considérer comme correcte.

Exercices d'entraînement

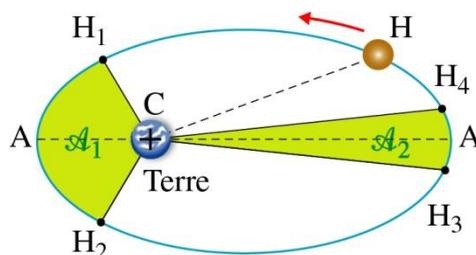
16. a. Dans le référentiel géocentrique, la trajectoire du centre d'Hipparcos est une ellipse dont l'un des foyers est le centre de la Terre.

Le segment [CH] qui relie le centre C de la Terre à celui d'Hipparcos balaie des aires égales pendant des durées égales.

Pour tous les satellites de la Terre, le carré de leur période de révolution T est proportionnel au cube de la longueur L du demi-grand axe de leur orbite :

$$\frac{T^2}{L^3} = k$$

b.



c. D'après la 2^e loi de Kepler ou loi des aires, pendant des durées égales les aires \mathcal{A}_1 et \mathcal{A}_2 balayées par [CH] sont égales : $\mathcal{A}_1 = \mathcal{A}_2$.

Pour respecter cette égalité, $H_3H_4 < H_1H_2$. La distance parcourue pendant une même durée est plus grande lorsque la planète est plus loin du Soleil.

d. Ainsi, la vitesse n'est pas la même entre H_1 et H_2 et entre H_3 et H_4 . H est plus rapide sur le trajet H_1PH_2 , donc sa vitesse est maximale en P au Périgée et minimale en A à l'Apogée.

17. a. Le mouvement d'Eva n'est pas circulaire car l'astéroïde n'évolue pas à égale distance du centre de la trajectoire. D'autre part, on observe clairement que le Soleil n'occupe pas le centre de la trajectoire mais se trouve décalé en un point appelé foyer de l'ellipse.

Le mouvement d'Eva n'est pas non plus uniforme car la valeur de la vitesse d'Eva n'est pas constante le long de la trajectoire. La distance entre deux points consécutifs n'est pas constante.

b. E_0E_2 mesure 1,6 cm sur le document original pour une échelle de 1 cm pour $1,5 \times 10^{11}$ m en réalité.

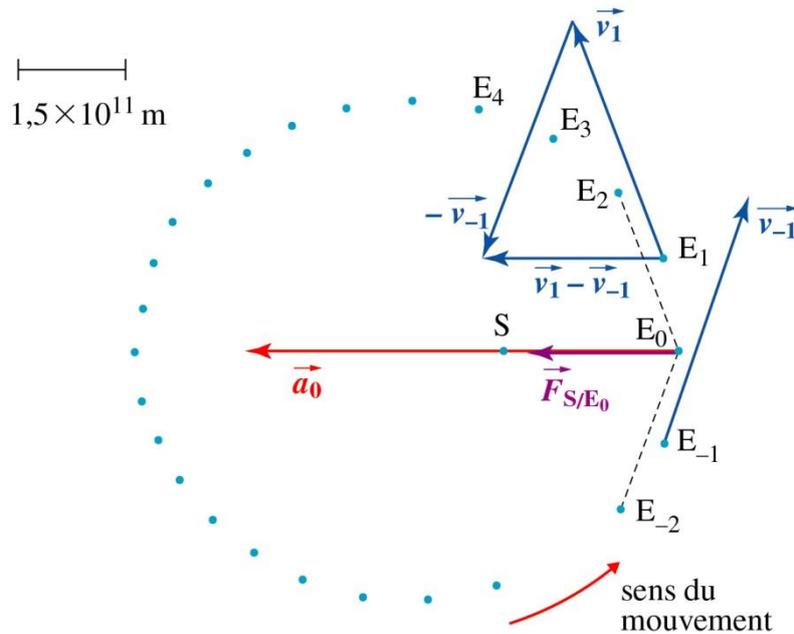
Ainsi :

$$v_1 = \frac{E_0E_2}{2\tau} = \frac{1,6 \times 1,5 \times 10^{11}}{2 \times 54 \times 24 \times 3600} = 2,6 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

De même :

$$v_{-1} = \frac{E_2E_0}{2\tau} = \frac{1,6 \times 1,5 \times 10^{11}}{2 \times 54 \times 24 \times 3600} = 2,6 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

c.



Le tracé des vecteurs est réalisé sur l'enregistrement à l'échelle 1 cm pour $1 \times 10^4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
 Le vecteur $\Delta\vec{v}_0 = \vec{v}_1 - \vec{v}_{-1}$ est tracé par différence des deux vecteurs en reportant $-\vec{v}_{-1}$ au sommet de \vec{v}_1 . La valeur a_0 de l'accélération en E_0 est donc :

$$a_0 = \frac{\|\vec{v}_1 - \vec{v}_{-1}\|}{2\tau}$$

Or, $\Delta\vec{v}_0 = \vec{v}_1 - \vec{v}_{-1}$ mesure 1,9 cm sur le papier avec l'échelle 1 cm pour $1 \times 10^4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ soit :

$$\vec{v}_1 - \vec{v}_{-1} = 1,9 \times 10^4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Finalement : $a_0 = \frac{1,9 \times 10^4}{2 \times 54 \times 24 \times 3600} = 2,0 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, qui confirme la donnée de l'énoncé.

d. \vec{a}_0 est appliqué en E_0 . Il a même direction et même sens que $\Delta\vec{v}_0 = \vec{v}_1 - \vec{v}_{-1}$ et à l'échelle 1 cm pour $0,50 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, sa taille est alors de 4,0 cm (voir figure).

e. En considérant que la masse m d'Eva est constante, l'application de la 2^e loi de Newton dans le référentiel héliocentrique galiléen donne en E_0 la relation :

$$\vec{F}_{S/E_0} = m \cdot \vec{a}_0 \quad (1)$$

Ainsi \vec{F}_{S/E_0} et \vec{a}_0 doivent être colinéaire et de même sens. C'est bien le cas ici.

f. En considérant que l'astéroïde Eva est ponctuel et que le Soleil est à répartition sphérique de masse, la loi d'interaction gravitationnelle permet d'écrire :

$$F_{S/E_0} = G \frac{mM_s}{d_{SE_0}^2}$$

La relation (1) en terme de valeurs permet d'écrire :

$$F_{S/E_0} = ma_0 \text{ soit } G \frac{mM_s}{d_{SE_0}^2} = ma_0$$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 10. Mouvements des satellites et planètes

ce qui conduit à :

$$G \frac{M_S}{d_{SE_0}^2} = a_0$$

Finalement :

$$M_S = \frac{a_0 d_{SE_0}^2}{G}$$

A.N. : d_{SE_0} mesure 1,6 cm sur le papier avec 1 cm pour $1,5 \times 10^{11}$ m en réalité.

Ainsi :

$$M_S = \frac{2 \times 10^{-3} \times (1,6 \times 1,5 \times 10^{11})^2}{6,67 \times 10^{-11}} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$$

18. a. et b. S étant ponctuel et la Terre à répartition sphérique de masse, d'après la loi d'interaction gravitationnelle :

$$\vec{F}_{T/S} = +G \frac{mM_T}{(R_T + h)^2} \vec{u}_n$$

Le signe « + » met en évidence que $\vec{F}_{T/S}$ et \vec{u}_n sont de même sens.

c. En considérant que m est constante, l'application de deuxième loi de Newton, dans le référentiel géocentrique galiléen, donne la relation ;

$$\vec{F}_{T/S} = m \cdot \vec{a}_S \quad \text{soit} \quad \vec{a}_S = G \frac{M_T}{(R_T + h)^2} \vec{u}_n$$

d. Dans le repère de Frenet (S, \vec{u}_t , \vec{u}_n), on peut ainsi écrire :

$$\vec{a} \begin{vmatrix} 0 \\ G \frac{M_T}{r^2} \end{vmatrix} \quad \text{et} \quad \vec{a} \begin{vmatrix} \frac{dv_s}{dt} \\ \frac{v_s^2}{r} \end{vmatrix}$$

L'égalité des coordonnées de \vec{a} sur (S, \vec{u}_n) conduit à la relation :

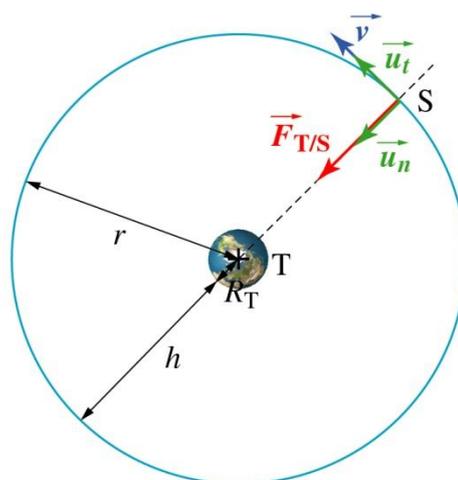
$$G \frac{M_T}{r^2} = \frac{v_s^2}{r}$$

soit, après simplification :

$$v_s = \sqrt{\frac{GM_T}{R_T + h}}$$

e. T est la période de révolution. C'est la durée de parcours d'une circonférence de longueur $L = 2\pi r$. Le mouvement étant uniforme :

$$v_s = \frac{L}{T} \quad \text{soit} \quad T = \frac{2\pi r}{v_s} = \frac{2\pi r}{\sqrt{\frac{GM_T}{r}}} = 2\pi r \sqrt{\frac{r}{GM_T}} \quad \text{soit} \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{(R_T + h)^3}{GM_T}}$$



Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 10. Mouvements des satellites et planètes

19. a. La courbe $T^2 = f(r^3)$ est une droite passant par l'origine.

Ainsi T^2 est proportionnel à r^3 . La 3^e loi de Kepler est vérifiée pour les satellites de la Terre :

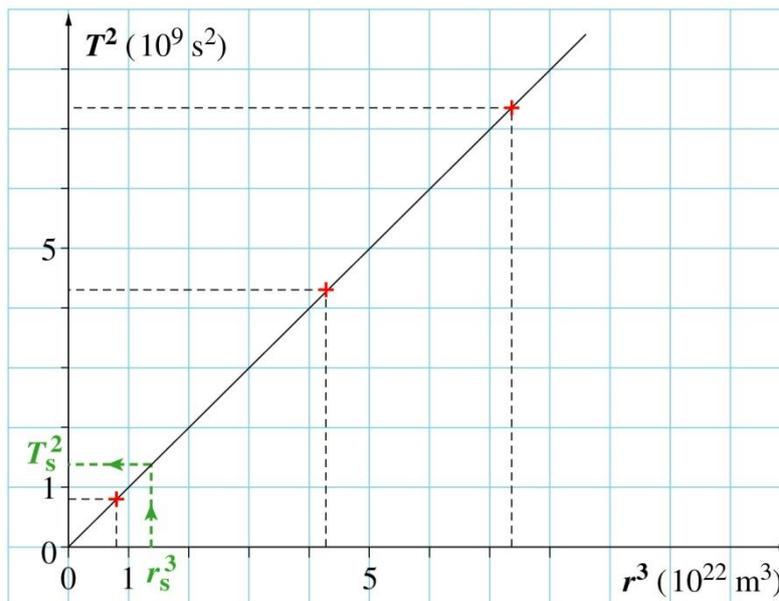
$$T^2 = k \times r^3$$

b. $r_S = 24 \times 10^3$ km
 $\Rightarrow r_S^3 = 1,4 \times 10^{22}$ m³.

Graphiquement :

$$T_S^2 = 1,4 \times 10^9 \text{ s}^2$$

$$\Rightarrow T_S = 3,7 \times 10^4 \text{ s}$$



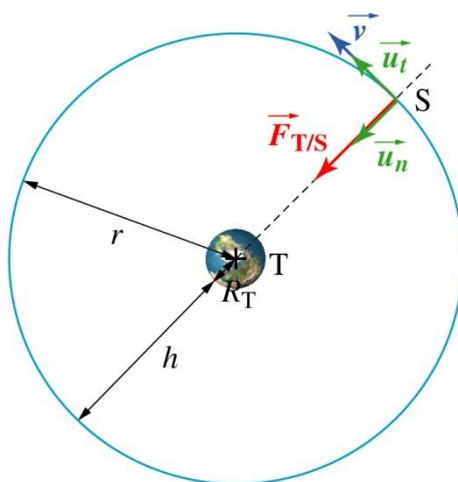
20. 1. a. Le système étudié est un satellite terrestre ponctuel S, de masse m_S , qui décrit, dans le référentiel géocentrique galiléen, un cercle de rayon r .

S est considéré comme étant uniquement soumis à la force d'attraction gravitationnelle $\overrightarrow{F}_{T/S}$ exercée par la Terre, de masse M_T .

S étant ponctuel et la Terre à répartition sphérique de masse, d'après la loi d'interaction gravitationnelle :

$$\overrightarrow{F}_{T/S} = -G \frac{m_S M_T}{r^2} \overrightarrow{u}_{TS}$$

\overrightarrow{u}_{TS} est un vecteur unitaire de direction (TS) orienté de T vers S.



En considérant que m est constante, l'application de la 2^e loi de Newton donne la relation :

$$\overrightarrow{F}_{T/S} = m_S \cdot \vec{a}$$

Cette relation implique que l'accélération et la force de gravitation sont colinéaires.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 10. Mouvements des satellites et planètes

Or, la trajectoire 2 ne permet pas de respecter cette condition. L'accélération doit être contenue dans le plan de la trajectoire circulaire (\vec{a} est contenu dans le plan de la base de Frenet), elle ne peut également passer par le centre de la Terre comme $\vec{F}_{T/S}$.

b. Pour être immobile dans un référentiel terrestre, le satellite doit rester immobile par rapport à un point de la surface de la Terre et tourner dans un plan parallèle ou confondu avec celui de la trajectoire de ce point. Ce plan doit donc être perpendiculaire à l'axe des pôles. La trajectoire 2 ne convenant pas d'après la réponse **1. a.**, il ne reste que la trajectoire 1 possible.

2. a. Dans la relation $\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$, T représente la période de révolution du satellite, r est le rayon de son orbite autour de la Terre et M la masse de la Terre.

b. Pour être immobile dans un référentiel terrestre, le satellite doit rester immobile par rapport à un point de la surface de la Terre et tourner donc avec la même période : la période de révolution T_S d'un satellite géostationnaire est égale à la période de rotation T_{Terre} de la Terre :

$$T_S = T_{\text{Terre}} = 23 \text{ h}, 56 \text{ min}, 4 \text{ s} = 86164 \text{ s}$$

$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM} \text{ conduit à } T_S = 2\pi \sqrt{\frac{(R_T + h)^3}{GM_T}}$$

Pour l'ISS :
$$T_{\text{ISS}} = 2\pi \sqrt{\frac{(6,38 \times 10^6 + 400 \times 10^3)^3}{6,67 \times 10^{-11} \times 5,97 \times 10^{24}}} = 5,56 \times 10^3 \text{ s}$$

Pour Anik1 :
$$T_{\text{Anik1}} = 2\pi \sqrt{\frac{(6,38 \times 10^6 + 35,8 \times 10^3 \times 10^3)^3}{6,67 \times 10^{-11} \times 5,97 \times 10^{24}}} = 8,63 \times 10^4 \text{ s}$$

$T_{\text{Anik1}} \approx T_{\text{Terre}}$ (0,1 % d'écart relatif seulement) alors que $T_{\text{ISS}} \neq T_{\text{Terre}}$ (94 % d'écart relatif) : Anik1 est un satellite géostationnaire contrairement à la station ISS.

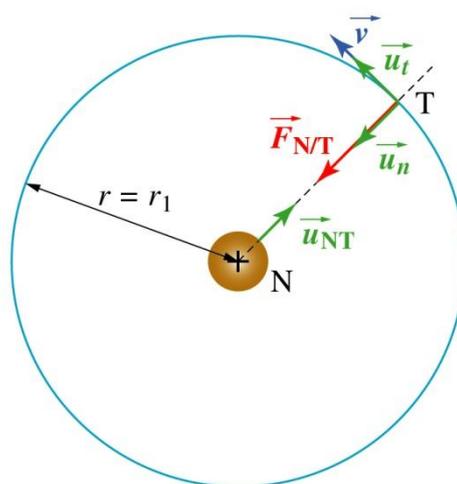
21. a. Le référentiel dans lequel le mouvement de Triton est circulaire est le référentiel lié au centre de l'astre autour duquel tourne Triton : il s'agit du référentiel neptunocentrique.

b. Dans le référentiel neptunocentrique, galiléen, le système étudié est Triton de masse m , qui décrit, un cercle de rayon r et de centre N, centre de Neptune de masse M_N .

Triton et Neptune pouvant être considéré comme ponctuels (« le rayon de l'orbite de Triton est grand devant la dimension de Neptune ou Triton »), d'après la loi d'interaction gravitationnelle :

$$\vec{F}_{N/T} = -G \frac{mM_N}{r^2} \vec{u}_{NT}$$

\vec{u}_{NT} est un vecteur unitaire de direction (TN) orienté de N vers T.



Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 10. Mouvements des satellites et planètes

En considérant que m est constante, l'application de deuxième loi de Newton donne la relation :

$$\vec{F}_{N/T} = m \cdot \vec{a} \quad \text{soit} \quad \vec{a} = -G \frac{M_N}{r^2} \vec{u}_{NT}$$

Dans $(T, \vec{u}_t, \vec{u}_n)$, $\vec{u}_n = -\vec{u}_{TN}$, on peut ainsi écrire : $\vec{a} \begin{cases} 0 \\ G \frac{M_N}{r^2} \end{cases}$ et $\vec{a} \begin{cases} \frac{dv}{dt} \\ \frac{v^2}{r} \end{cases}$

L'égalité des coordonnées de \vec{a} sur (T, \vec{u}_t) conduit à la relation $\frac{dv}{dt} = 0$ valable à chaque instant soit : $v = \text{cte}$. Le mouvement est donc uniforme.

c. On note maintenant v_1 la vitesse de Triton et r_1 le rayon de sa trajectoire utilisée à la question suivante. En adaptant les relations précédentes à ces notations, l'égalité des coordonnées de \vec{a} sur (T, \vec{u}_n) conduit à la relation $G \frac{M_N}{r_1^2} = \frac{v_1^2}{r_1}$ soit, après simplification :

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM_N}{r_1}}$$

La période de révolution est la durée de parcours d'une circonférence de longueur $L = 2\pi r$. Le mouvement étant uniforme :

$$v_1 = \frac{L}{T_1} \quad \text{soit} \quad T_1 = \frac{2\pi r_1}{v_1} = \frac{2\pi r_1}{\sqrt{\frac{GM_N}{r_1}}} = 2\pi r_1 \sqrt{\frac{r_1}{GM_N}} \quad \text{soit} \quad T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{r_1^3}{GM_N}}$$

d. $T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{r_1^3}{GM_N}}$ conduit à $T_1^2 = 4\pi^2 \frac{r_1^3}{GM_N}$ soit $r_1 = \sqrt[3]{\frac{GM_N \times T_1^2}{4\pi^2}}$.

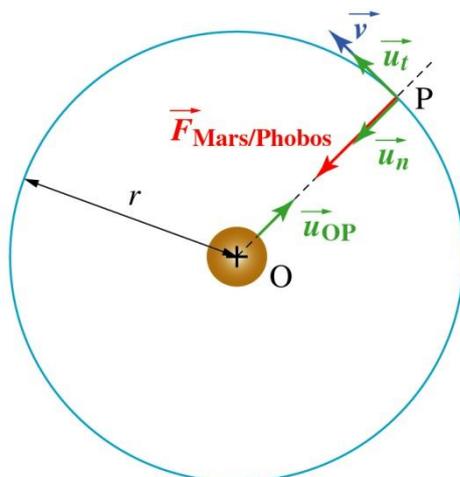
$$\text{A.N. : } r_1 = \sqrt[3]{\frac{6,67 \times 10^{-11} \times 1,0 \times 10^{26} \times (5,9 \times 24 \times 3600)^2}{4\pi^2}} = 3,5 \times 10^8 \text{ m.}$$

e. D'après la 3^e loi de Kepler :

$$\frac{T_1^2}{r_1^3} = \frac{T_2^2}{L_2^3}$$

$$\text{soit : } T_2 = \sqrt{\frac{L_2^3 T_1^2}{r_1^3}} = T_1 \sqrt{\left(\frac{L_2}{r_1}\right)^3} = 5,9 \times \sqrt{\left(\frac{5,5 \times 10^6 \times 10^3}{3,5 \times 10^8}\right)^3} = 3,7 \times 10^2 \text{ j} = 3,2 \times 10^7 \text{ s}$$

22. a.



b. Dans le référentiel marsocentrique, galiléen, le système étudié est Phobos de masse m , qui décrit, un cercle de rayon r et de centre O, centre de Mars de masse M . Phobos étant ponctuel et Mars à répartition sphérique de masse, d'après la loi d'interaction gravitationnelle :

$$\overrightarrow{F_{\text{Mars/Phobos}}} = -G \frac{mM}{r^2} \overrightarrow{u_{OP}}$$

$\overrightarrow{u_{OP}}$ est un vecteur unitaire de direction (OP) orienté de O vers P.

Ainsi la force exercée par Mars sur Phobos a pour :

- direction : la droite (OP) ;
- sens : vers O ;
- point d'application : P ;
- valeur : $F_{\text{Mars/Phobos}} = G \frac{mM}{r^2}$.

c. En considérant que m est constante, l'application de la 2^e loi de Newton donne la relation :

$$\overrightarrow{F_{\text{Mars/Phobos}}} = m \cdot \vec{a} \quad \text{soit} \quad \vec{a} = -G \frac{M}{r^2} \overrightarrow{u_{OP}}$$

Dans $(P, \overrightarrow{u_t}, \overrightarrow{u_n})$, $\overrightarrow{u_n} = -\overrightarrow{u_{OP}}$, on peut ainsi écrire : $\vec{a} \begin{cases} 0 \\ G \frac{M}{r^2} \end{cases}$ et $\vec{a} \begin{cases} \frac{dv}{dt} \\ \frac{v^2}{r} \end{cases}$

L'égalité des coordonnées de \vec{a} sur $(P, \overrightarrow{u_n})$ conduit à la relation :

$$G \frac{M}{r^2} = \frac{v^2}{r} \quad \text{soit après simplification} \quad v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

La période de révolution est la durée de parcours d'une circonférence de longueur $L = 2\pi r$. Le mouvement étant uniforme :

$$v = \frac{L}{T} \quad \text{soit} \quad T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi r}{\sqrt{\frac{GM}{r}}} = 2\pi r \sqrt{\frac{r}{GM}} \quad \text{soit} \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{GM}}$$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 10. Mouvements des satellites et planètes

d. A.N. : $T = 2\pi \sqrt{\frac{((6000+3400) \times 10^3)^3}{6,67 \times 10^{-11} \times 6,4 \times 10^{23}}} = 2,8 \times 10^4 \text{ s}.$

e. $T = 24 \text{ h } 36 \text{ min} = 88\,560 \text{ s}.$

$$\frac{T}{T_1} = 3,2$$

Ainsi, pendant que Mars effectue un tour sur elle-même, Phobos en effectue un peu plus de trois dans le même sens et passe donc deux fois au-dessus d'un point fixe de la surface de Mars. Les informations du texte sont vérifiées.

23. a. L'application de la deuxième loi de Newton et celle de l'interaction gravitationnelle à Janus dans le référentiel Saturnocentrique, galiléen, conduit à :

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{r_1^3}{GM_S}}$$

d'où :

$$T_1^2 = 4\pi^2 \frac{r_1^3}{GM_S} \quad \text{soit} \quad r_1 = \sqrt[3]{\frac{GM_S T_1^2}{4\pi^2}}$$

A.N. : $r_1 = \sqrt[3]{\frac{6,67 \times 10^{-11} \times 5,7 \times 10^{26} \times (17 \times 3600 + 58 \times 60)^2}{4\pi^2}} = 1,6 \times 10^8 \text{ m}$

b. D'après la troisième de Kepler :

$$\frac{T_1^2}{r_1^3} = \frac{T_2^2}{r_2^3}$$

soit :

$$T_2 = \sqrt{\frac{r_2^3 T_1^2}{r_1^3}} = T_1 \sqrt{\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^3} = (17 \times 3600 + 58 \times 60) \times \sqrt{\left(\frac{238 \times 10^3 \times 10^3}{1,6 \times 10^8}\right)^3} = 1,2 \times 10^5 = 33 \text{ h}$$

24. a. Consigner les valeurs des périodes de révolution et le rayon des orbites dans un tableau. Créer les variables T_1 et L_1 correspondant aux valeurs de T_i et L_i converties en s et m. Créer les variables $T_{\text{carré}} = T_1^2$ et $L_{\text{cube}} = L_1^3$

Créer la variable $k = \frac{T_{\text{carré}}}{L_{\text{cube}}}.$

Calculer la valeur moyenne la série des valeurs de k et l'écart type.

Noter la valeur retenue pour k .

Calculer M sachant que $\frac{T_{\text{carré}}}{r_{\text{cube}}}$ avec $k = \frac{4\pi^2}{GM}.$

On utilisera une valeur de G plus précise que celle de k pour que la précision soit davantage limitée par k plutôt que G .

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 10. Mouvements des satellites et planètes

b. Les valeurs de T_i , L_i sont disponibles sur Internet, par exemple à l'adresse ci-dessous :
http://fr.wikipedia.org/wiki/Satellites_naturels_de_Jupiter
 avec les données pour 63 satellites :

Nom	Rayon orbital (km)	Période (j)
Métis	128 000	0,295
Adrastée	129 000	0,298
Amalthée	181 400	0,498
Thébé	221 900	0,675
Io	421 800	1,769
...
Coré	24 011 000	779,180
S/2003 J 2	29 541 000	979,990

Extrait du tableur :

Nom	L	L^1	T	T^1	L_{cube}	T_{carre}	k
	(km)	(m)	(j)	(s)	(m ³)	(s ²)	(s ²)/(m ³)
Métis	128 000	128 000 000	0,295	25488	2,09715E+24	649638144	3,09772E-16
Adrastée	129 000	129 000 000	0,298	25747,2	2,14669E+24	662918308	3,0881E-16
Amalthée	181 400	181 400 000	0,498	43027,2	5,96914E+24	1851339940	3,10152E-16
Thébé	221 900	221 900 000	0,675	58320	1,09263E+25	3401222400	3,11289E-16
Io	421 800	421 800 000	1,769	152841,6	7,50446E+25	2,3361E+10	3,11289E-16
...
Coré	24 011 000	24 011 000 000	779,18	67321152	1,3843E+31	4,5321E+15	3,27395E-16
S/2003 J 2	29 541 000	29 541 000 000	979,99	84671136	2,57796E+31	7,1692E+15	2,78096E-16
						Moy	3,13706E-16
						s_{exp}	7,49256E-18
						s	9,43974E-19

s_{exp} est l'écart type expérimental, s est l'incertitude type :

$$s = \frac{s_{\text{exp}}}{\sqrt{n}} = 0,009 \times 10^{-16} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3} \quad \text{avec } n = 63 \text{ (nombre de satellites)}$$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 10. Mouvements des satellites et planètes

Pour un niveau de confiance de 95 %, on aura une incertitude :

$$\Delta k = 2 \text{ s} = 2 \frac{s_{\text{exp}}}{\sqrt{n}}$$

$\Delta k = 0,02 \times 10^{-16} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ en ne conservant qu'un chiffre significatif. Voir la page A-3 « Mesures et Incertitudes ».

Ainsi, on peut retenir une valeur pour k de :

$$k = k_{\text{moy}} \pm \Delta k = (3,14 \pm 0,02) \times 10^{-16} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$$

$$M = \frac{4\pi^2}{Gk} = \frac{4\pi^2}{6,6742 \times 10^{-11} \times 3,137 \times 10^{-16}} = 1,886 \times 10^{27} \text{ kg}$$

c. M est proportionnelle à l'inverse de k :

$$\frac{\Delta M}{M} = \frac{\Delta k}{k} = \frac{0,02}{3,14} = 6 \times 10^{-3}$$

$$\Delta M = 1,886 \times 10^{27} \times 6 \times 10^{-3} = 1,1 \times 10^{25} \text{ kg}$$

Ainsi : $M = (1,89 \pm 0,01) \times 10^{27} \text{ kg}$

25. 1. a. Le carré de la période de révolution T d'une planète est proportionnel au cube de la longueur L du demi-grand axe de son orbite : $\frac{T^2}{L^3} = k$.

b. D'après le document 2, $T_E = 557$ années. Or, les données indiquent $T_P = 248$ ans.

La troisième loi de Kepler implique que si T diminue, L diminue également ($T^2 = kL^3$).

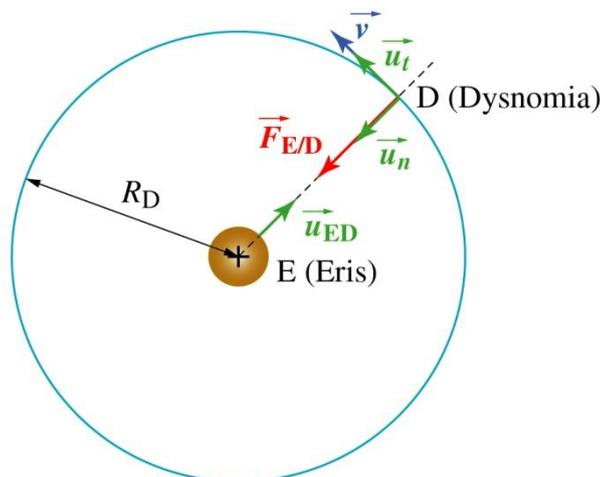
Ainsi, $T_E > T_P$ implique $L_E > L_P$. Eris se situe donc au-delà de Pluton.

2. a. Le référentiel d'étude du mouvement de Dysnomia est le référentiel Erisocentrique lié à un solide imaginaire contenant le centre d'Eris et trois étoiles éloignées, considérées comme fixes pendant la durée de l'étude.

b. Dans le référentiel Erisocentrique supposé galiléen, le système étudié est Dysnomia de masse m , qui décrit un cercle de rayon r et de centre E, centre d'Eris de masse M .

Dysnomia étant ponctuel et Eris supposé à répartition sphérique de masse, d'après la loi d'interaction gravitationnelle :

$$\vec{F}_{E/D} = -G \frac{mM_E}{R_D^2} \vec{u}_{ED} \text{ est un vecteur unitaire de direction (ED) orienté de E vers D.}$$



Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 10. Mouvements des satellites et planètes

En considérant que m est constante, l'application de deuxième loi de Newton donne la relation :

$$\vec{F}_{E/D} = m \cdot \vec{a} \quad \text{soit} \quad \vec{a} = -G \frac{M_E}{R_D^2} \vec{u}_{ED}$$

Dans $(D, \vec{u}_t, \vec{u}_n)$, $\vec{u}_n = -\vec{u}_{DE}$, on peut ainsi écrire : $\vec{a} \begin{cases} 0 \\ G \frac{M_E}{R_D^2} \end{cases}$ et $\vec{a} \begin{cases} \frac{dv}{dt} \\ \frac{v^2}{r} \end{cases}$

L'égalité des coordonnées de \vec{a} sur (D, \vec{u}_n) conduit à la relation :

$$G \frac{M_E}{R_D^2} = \frac{v^2}{R_D} \quad \text{soit, après simplification} \quad v = \sqrt{\frac{GM_E}{R_D}}$$

La période de révolution est la durée de parcours d'une circonférence de longueur $L = 2\pi R_D$.
 Le mouvement étant uniforme :

$$v = \frac{L}{T} \quad \text{soit} \quad T_D = \frac{2\pi R_D}{v} = \frac{2\pi R_D}{\sqrt{\frac{GM_E}{R_D}}} = 2\pi R_D \sqrt{\frac{R_D}{GM_E}} \quad \text{soit} \quad T_D = 2\pi \sqrt{\frac{R_D^3}{GM_E}}$$

Ainsi :

$$\frac{T_D^2}{R_D^3} = \frac{4\pi^2}{GM_E}$$

ce qui conduit à :

$$M_E = \frac{4\pi^2 R_D^3}{GT_D^2} \quad \text{soit} \quad \frac{M_E}{M_p} = \frac{4\pi^2 R_D^3}{M_p GT_D^2} = \frac{4\pi^2 (3,60 \times 10^7)^3}{1,31 \times 10^{22} \times 6,67 \times 10^{-11} \times (1,30 \times 10^6)^2} = 1,25$$

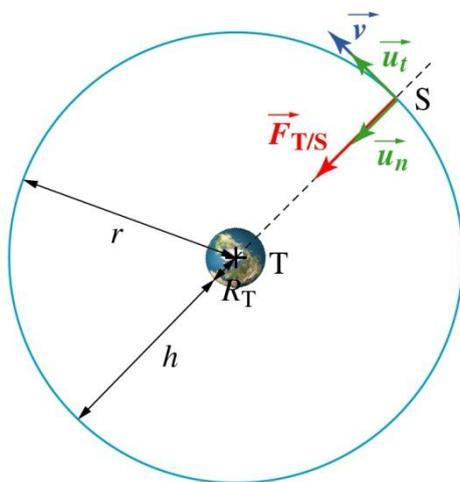
Eris a une masse de l'ordre de celle de Pluton. La découverte d'Eris a donc logiquement entraîné une modification de statut de Pluton afin de classer Pluton dans la même catégorie qu'Eris.

Exercices de synthèse

26. Application des lois de Newton

D'après la loi d'interaction gravitationnelle, S étant ponctuel et la Terre à répartition sphérique de masse :

$$\vec{F}_{T/S} = +G \frac{mM_T}{r^2} \vec{u}_n \quad (1)$$



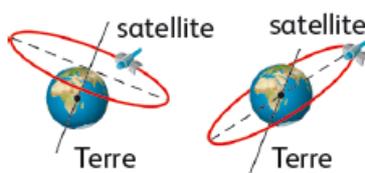
Deuxième loi de Newton

En considérant que m est constante, l'application de deuxième loi de Newton dans le référentiel géocentrique galiléen donne la relation :

$$\vec{F}_{T/S} = m \cdot \vec{a}_S \quad (2)$$

Étude du plan de la trajectoire

Les trajectoires ci-dessous ne peuvent donc convenir :



En effet, la relation (2) précédente implique que l'accélération et la force de gravitation sont colinéaires. Or, la trajectoire de la figure de gauche ne permet pas de respecter cette condition. L'accélération doit être contenue dans le plan de la trajectoire circulaire ; elle ne peut également pas passer par le centre de la Terre comme $\vec{F}_{T/S}$ (1).

D'autre part, pour être immobile dans un référentiel terrestre, le satellite doit rester immobile par rapport à un point de la surface de la Terre et donc tourner dans un plan parallèle ou confondu avec celui de la trajectoire de ce point. Ce plan doit donc être perpendiculaire à l'axe des pôles. La trajectoire de la figure de droite ne convient pas non plus.

Finalement, le mouvement d'un satellite géostationnaire s'effectue dans le plan équatorial de la Terre.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 10. Mouvements des satellites et planètes

Accélération, vitesse et période

Les relations (1) et (2) conduisent à :

$$\vec{a}_S = G \frac{M_T}{r^2} \vec{u}_n \quad \text{soit} \quad \vec{a}_S = G \frac{M_T}{(R_T + h)^2} \vec{u}_n$$

Dans le repère de Frenet (S, \vec{u}_t , \vec{u}_n), on peut ainsi écrire : $\vec{a} \left| \begin{array}{l} 0 \\ G \frac{M_T}{r^2} \end{array} \right.$ et $\vec{a} \left| \begin{array}{l} \frac{dv}{dt} \\ \frac{v^2}{r} \end{array} \right.$

L'égalité des coordonnées de \vec{a} sur (S, \vec{u}_n) conduit à la relation :

$$G \frac{M_T}{r^2} = \frac{v_s^2}{r} \quad \text{soit, après simplification} \quad v_s = \sqrt{\frac{GM_T}{R_T + h}}$$

T est la période de révolution. C'est la durée de parcours d'une circonférence de longueur $L = 2\pi r$. Le mouvement étant uniforme :

$$v_s = \frac{L}{T} \quad \text{soit} \quad T = \frac{2\pi r}{v_s} = \frac{2\pi r}{\sqrt{\frac{GM_T}{r}}} = 2\pi r \sqrt{\frac{r}{GM_T}} \quad \text{soit} \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{(R_T + h)^3}{GM_T}}$$

Altitude

$$T^2 = 4\pi^2 \frac{(R_T + h)^3}{GM_T}$$

$$R_T + h = \sqrt[3]{\frac{T^2 GM_T}{4\pi^2}}$$

$$h = \sqrt[3]{\frac{T^2 GM_T}{4\pi^2}} - R_T$$

A.N. : pour être immobile dans un référentiel terrestre, le satellite doit rester immobile par rapport à un point de la surface de la Terre et donc tourner avec la même période ; la période de révolution d'un satellite géostationnaire est égale à la période de rotation de la Terre :

$$T = T_{\text{Terre}} = 23 \text{ h } 56 \text{ min } 4 \text{ s} = 86\,164 \text{ s}$$

$$h = \sqrt[3]{\frac{86164^2 \times 6,67 \times 10^{-11} \times 5,97 \times 10^{24}}{4\pi^2}} - 6,38 \times 10^6 = 3,58 \times 10^7 \text{ m} \approx 36\,000 \text{ km}$$

Ainsi, un satellite géostationnaire orbite à environ 36 000 km de la surface de la Terre dans le plan équatorial de la Terre.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 10. Mouvements des satellites et planètes

27. 1. a. On étudie tout d'abord la navette dans un référentiel terrestre considéré comme galiléen.

Au décollage, en négligeant les frottements, la navette subit :

- son poids \vec{P} ;
- la poussée \vec{F}_p .

b. En négligeant la variation de masse, l'application de la deuxième loi de Newton donne :

$$\vec{P} + \vec{F}_p = m\vec{a}_G$$

En projection sur (O, \vec{k}) , on a :

$$P_z + F_{pz} = m \cdot a_z$$

$$-mg + F_p = m \cdot a$$

soit :

$$a = \frac{F_p}{m} - g$$

A.N. :

$$a = \frac{32,4 \times 10^6}{2,041 \times 10^6} - 9,8 = 6,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

c. Les conditions initiales sont pour $t_0 = 0 \text{ s}$: $z(t_0) = 0 \text{ m}$ et $v_z(t_0) = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

En supposant l'accélération constante : $a_z = +a$.

Or, $a_z = \frac{dv_z}{dt}$. Par intégration, $v_z = at + C$.

D'après les conditions initiales : $v_z(t_0) = a \times 0 + C = 0$.

Ainsi, $v_z = at$.

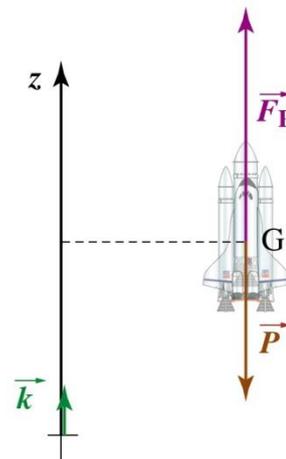
Or $v_z = \frac{dz}{dt}$. Par intégration, $z = \frac{1}{2} at^2 + C$.

D'après les conditions initiales $z(t_0) = \frac{1}{2} a \times 0 + C = 0$.

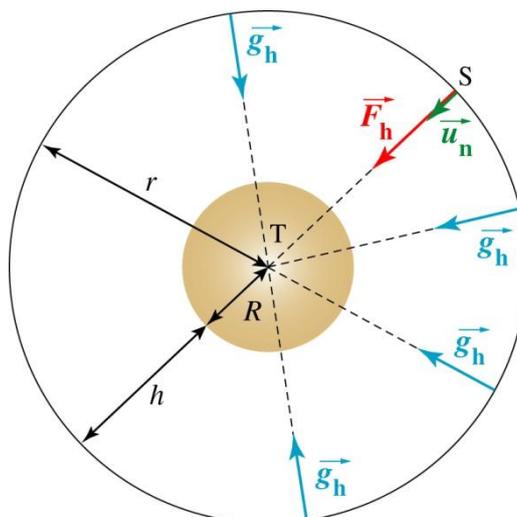
Ainsi, $z = \frac{1}{2} at^2$.

La distance parcourue pendant $t = 2 \text{ s}$ est :

$$d = \frac{1}{2} \times 6,1 \times 2^2 = 1 \times 10^1 \text{ m (12 m)}$$



2. a.



b. La navette étant satellisée, on la note S. On la considère comme étant ponctuelle et la Terre à répartition sphérique de masse.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 10. Mouvements des satellites et planètes

D'après la loi d'interaction gravitationnelle :

$$\vec{F}_h = +G \frac{mM_T}{r^2} \vec{u}_n \quad (1)$$

Ainsi, comme $\vec{g}_h = \frac{\vec{F}_h}{m}$ alors $\vec{g}_h = G \frac{M_T}{(R+h)^2} \vec{u}_n$

c. D'après l'expression précédente :

$$g_h = G \frac{M_T}{(R+h)^2} \text{ et } g_0 = G \frac{M_T}{(R)^2}$$

ce qui implique : $g_0 R^2 = GM_T$ et donc $g_h = \frac{R^2}{(R+h)^2} g_0$

d. Dans la base de Frenet (S, \vec{u}_t , \vec{u}_n), $\vec{a} \begin{cases} \frac{dv}{dt} \\ v^2 \\ r \end{cases}$

ce qui donne pour la navette en mouvement uniforme : $\vec{a} \begin{cases} 0 \\ v^2 \\ r \end{cases}$

Ainsi $a = \frac{v^2}{r}$.

e. L'application de deuxième loi de Newton appliquée à la navette satellisée dans le référentiel géocentrique galiléen conduit à :

$$\vec{F}_h = m\vec{a}$$

ce qui implique :

$$F_h = ma \text{ soit } G \frac{mM_T}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \text{ soit } v^2 = G \frac{M_T}{r} \Rightarrow v^2 = \frac{g_0 R^2}{r} \Rightarrow v^2 = g_h \frac{(R+h)^2}{(R+h)} = g_h (R+h)$$

$$\text{f. } g_h = \frac{R^2}{(R+h)^2} g_0 = \frac{(6,38 \times 10^6)^2}{(6,38 \times 10^6 + 296 \times 10^3)^2} 9,8 = 9,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$v = \sqrt{g_h (R+h)} = \sqrt{9,0 \times (6,38 \times 10^6 + 296 \times 10^3)} = 7,8 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

L'écart relatif par rapport à la donnée du texte est inférieur à 0,5 %. Les valeurs sont compatibles.

28. a. Pour être géostationnaire, le satellite doit rester immobile par rapport à un point de la surface de la Terre et tourner donc dans un plan parallèle ou confondu avec celui de la trajectoire de ce point dans le référentiel géocentrique. Il faut donc $I = 0^\circ$.

D'autre part, le satellite doit rester immobile par rapport à un point de la surface de la Terre et tourne donc avec la même période ; la période de révolution d'un satellite géostationnaire est égale à la période de rotation de la Terre :

$$T_S = T_{\text{Terre}} = 23 \text{ h } 56 \text{ min } 4 \text{ s} = 86\,164 \text{ s}$$

Les deux conditions précédentes sont remplies par Météosat :

$$I = 0^\circ \text{ et } T = 14\,36 \text{ min} = 1436 \times 60 = 8,616 \times 10^4 \text{ s}$$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 10. Mouvements des satellites et planètes

b. Dans le référentiel géocentrique, le plan de la trajectoire des satellites NOAA est fixe alors que la Terre tourne autour de l'axe des pôles. Une caméra placée à bord du satellite voit la Terre « défiler » d'où le nom de satellites à défilement.

Si on note T la période de révolution du satellite, α l'angle de rotation de la Terre pendant la durée T ; la Terre effectue une rotation de 2π pendant la durée $T_{\text{Terre}} = 1\,436$ min.

Donc, pendant T : $\alpha = \frac{2\pi T}{T_{\text{Terre}}}$.

Notons M_1 le point de la surface de la Terre lors du premier passage et M_2 celui survolé lors du passage suivant. La distance d recherchée est la longueur de l'arc :

$$d = M_1 M_2 = \alpha R_T = \frac{2\pi T}{T_{\text{Terre}}} R_T$$

$$\text{A.N. : } d = \frac{2\pi \times 100}{1436} \times 6,38 \times 10^3 = 2,79 \times 10^3 \text{ km}$$

$$\text{c. } T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{GM_T}} \text{ implique } T = 2\pi \sqrt{\frac{(R_T + h)^3}{GM_T}}$$

$$\text{d'où : } T^2 = 4\pi^2 \frac{(R_T + h)^3}{GM_T} \Rightarrow (R_T + h) = \sqrt[3]{\frac{T^2 GM_T}{4\pi^2}} \Rightarrow h = \sqrt[3]{\frac{T^2 GM_T}{4\pi^2}} - R_T$$

Pour un satellite géostationnaire :

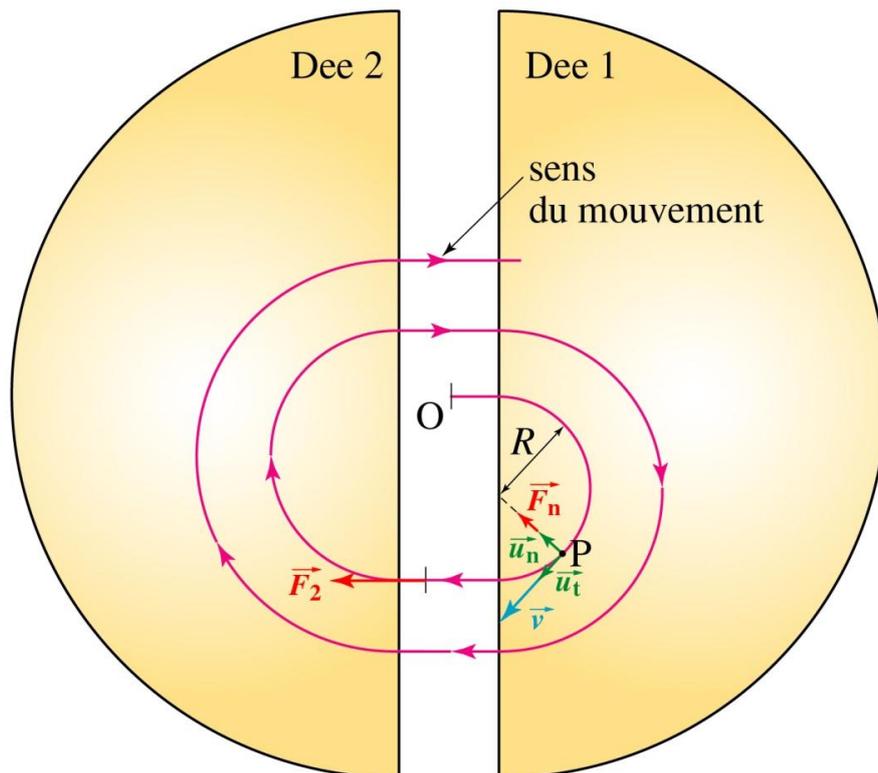
$$h = \sqrt[3]{\frac{(1436 \times 60)^2 \times 6,67 \times 10^{-11} \times 5,97 \times 10^{24}}{4\pi^2}} - 6,38 \times 10^6 = 3,58 \times 10^7 \text{ m}$$

Pour un satellites NOAA :

$$h = \sqrt[3]{\frac{(100 \times 60)^2 \times 6,67 \times 10^{-11} \times 5,97 \times 10^{24}}{4\pi^2}} - 6,38 \times 10^6 = 7,45 \times 10^5 \text{ m}$$

29. Dans le manuel élève, une erreur a été corrigée dans le texte : la valeur de la force magnétique est $|q|vB$ et non de $|q|\vec{v}B$, la flèche sur v a été supprimée.

a. On étudie dans le référentiel terrestre, galiléen pendant la durée d'étude, la particule P chargée. Dans un dee, P est supposée être soumise uniquement à la force magnétique notée \vec{F}_m . D'après le document, cette force magnétique est radiale (direction confondue avec le rayon de la trajectoire de P dans le dee) et centripète (orientée vers le centre de la trajectoire).



c. En considérant que la masse m de P constante et l'application de deuxième loi de Newton à P dans un dee donne la relation $\vec{F}_m = m \cdot \vec{a}$ (1).

Dans le repère de Frenet (P, \vec{u}_t , \vec{u}_n), on peut ainsi écrire : $\vec{F}_m \Big|_{+F_m} = |q|vB$ et $\vec{a} \Big|_{\frac{dv}{dt}, \frac{v^2}{R}}$

La projection de (1) sur (P, \vec{u}_t) conduit à la relation $0 = m \frac{dv}{dt}$ soit $\frac{dv}{dt} = 0$ à chaque instant du mouvement de P dans un dee soit $v = cte$: le mouvement de la particule est uniforme dans un dee.

c. La projection de (1) sur (P, \vec{u}_n) conduit à la relation $|q|vB = m \frac{v^2}{R}$ soit $R = \frac{mv}{|q|B}$.

Entre les dees, la particule est soumise à une force électrique qui l'accélère. Sa vitesse augmente donc le rayon de la trajectoire dans un dee augmente d'un dee au suivant.

d. Pendant un demi-tour, P parcourt une demi-circonférence de longueur $L = \pi R$. Le mouvement étant uniforme :

$$v = \frac{L}{t_{1/2}} \text{ soit } t_{1/2} = \frac{\pi R}{v} = \frac{\pi \frac{mv}{|q|B}}{v} = \frac{\pi m}{|q|B}$$

La fréquence est : $f = \frac{1}{T} = \text{avec } T = 2t_{1/2} \text{ soit } f = \frac{|q|B}{2\pi m}$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 10. Mouvements des satellites et planètes

e. m, q, B étant constant, la fréquence est constante et ne dépend pas de v : inutile d'adapter la fréquence à la vitesse de la particule.

f. Pour conserver une trajectoire fixe, R doit rester constant en dépit de l'augmentation de v .

D'après $R = \frac{mv}{|q|B}$, le champ magnétique doit donc augmenter si v augmente pour maintenir R constant.

29. Rédiger une synthèse de documents

Rédiger une synthèse de documents (ou de connaissances) consiste à extraire des informations de documents ou de connaissances et à les mettre en relation pour répondre à une problématique. Elle est parfois guidée, ce qui n'est pas le cas ici.

La rédaction d'une synthèse ne fait pas appel à d'autres sources, comme le dictionnaire ou Internet. Les documents, le cours et la culture générale suffisent à sa rédaction.

Les tableaux suivants regroupent les éléments attendus dans la synthèse et permet également de construire un barème de correction.

Le barème de notation peut être le suivant.

Synthèse satisfaisante		Synthèse non satisfaisante		Aucune synthèse	
Les éléments scientifiques sont présents (documents et connaissances) et mis en relation ; ils permettent de répondre à la problématique. La réponse est organisée sous forme d'une synthèse correctement rédigée.	Des éléments scientifiques solides sont présents mais de manière incomplète ou ils sont tous présents mais non mis en relation. La réponse est organisée et correctement rédigée.	Des éléments scientifiques solides et bien choisis mais non mis en relation. La réponse est organisée et correctement rédigée.	Des éléments scientifiques incomplets ou mal choisis et mis en relation. La réponse est organisée sous forme de synthèse et correctement rédigée.	Des éléments scientifiques corrects.	Pas d'éléments scientifiques corrects.
5 points	4 points	3 points	2 points	1 point	0 point

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 10. Mouvements des satellites et planètes

Eléments attendus	Exemples	
Eléments scientifiques : docs et connaissances	<p>1. Explication de ce qu'est un rendez-vous orbital</p> <p>2. Situation imposée : même plan d'orbite pour le chasseur et la cible</p> <p>3. Les impossibilités évidentes avec explications</p> <p>4. Solution pour que le chasseur atteigne la cible.</p> <p>5. Difficultés de l'opération</p>	<p>Docs 4 et 5 : rencontre organisée (avec amarrage) entre deux vaisseaux spatiaux.</p> <p>Docs 2 et 3 : changer de plan coûte trop cher \Rightarrow chasseur et cible sont en mouvement dans un même plan.</p> <p>Docs 1, 2 et 3 + connaissances : s'immobiliser (donc faire demi-tour) ou ralentir sur la même orbite + explication (gravitation, lien entre v et la distance satellite-planète,...).</p> <p>Docs 3, 5 et connaissances : modification de vitesse et troisième loi de Kepler. Changer de période permet de changer d'altitude et d'orbite.</p> <p>Doc 5 : L'amarrage nécessite à un instant donné la même position et la même vitesse \Rightarrow il faut déterminer avec précision : - l'instant du changement de vitesse pour atteindre la cible ; - celui de reprise d'une vitesse égale à celle de la cible (vitesse relative du chasseur/à la cible nulle lors de l'amarrage ou docking.</p>
Rédaction	<p>Structure et documents cités</p> <p>Extraction des informations :</p> <ul style="list-style-type: none"> - pertinence - exactitude - intégralité <p>Expression</p> <p>Lien</p> <p>Réponse à la problématique</p>	<p>Introduction : contexte (rdv cité en 4 par exemple) + présentation des deux objectifs. Développement et conclusion.</p> <p>Absence d'information non nécessaire et place de l'information utile correcte dans l'argumentation.</p> <p>Pas de déformation de l'information (ne pas lui faire dire autre chose et encore moins le contraire).</p> <p>Toutes les informations à extraire sont présentes (ici 1,2, 3, 4, 5).</p> <p>Orthographe, formulation, argumentation (cause \rightarrow conséquence), paraphrase évitée (ou copier/coller), concision (30 lignes max.).</p> <p>Liaison logique entre les différentes parties (pas de 1, 2, 3...) + mise en relation des informations pour répondre à la problématique.</p> <p>Réponse claire mettant en évidence la compréhension du sujet traité.</p>

Chapitre 11 – Les oscillateurs et la mesure du temps

Manuel pages 223 à 242

Choix pédagogiques

Au cours de ce chapitre, de nombreux concepts sont développés et mis en œuvre dans l'étude des oscillateurs : certains ont déjà été travaillés dans les classes précédentes (énergies cinétique, potentielle de pesanteur, mécanique), d'autres sont introduits ici (travail d'une force constante, forces conservatives et non conservatives).

Pour faire le lien entre les oscillateurs mécaniques et la mesure du temps, nous avons privilégié l'étude des pendules. En effet, ceux-ci rappellent l'image traditionnelle des pendules à balancier et par ailleurs, le programme limitant l'énergie potentielle à la seule énergie potentielle de pesanteur, l'introduction de l'énergie potentielle élastique (nécessaire à l'étude des horloges à ressort) ne nous a pas paru indispensable.

Parallèlement, nous avons cherché à montrer les développements actuels des horloges à travers une description simple du fonctionnement de l'horloge atomique au césium et des exemples de leurs utilisations (dans la vie quotidienne comme dans la recherche) et des recherches concernant leur évolution.

Cette double entrée (pendule à balancier, horloge atomique) permet de mettre en évidence la présence, la différence de nature et le rôle de l'oscillateur ; elle met également en valeur l'articulation entre les connaissances scientifiques d'une époque et les instruments qui sont développés, montrant ainsi l'évolution des théories scientifiques et des techniques.

Nous avons cherché à conserver cette cohérence jusqu'à l'exercice de synthèse final qui propose d'étudier l'importance de la mesure du temps pour la localisation.

Des animations, des simulations et des vidéos documentaires illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et, certaines d'entre elles, sur les sites Internet compagnon Sirius.

Page d'ouverture

Le projet européen *Pharao* et l'horloge atomique

La photographie de la page d'entrée montre la station spatiale internationale (ISS) dans laquelle prendra prochainement place l'horloge atomique du projet européen *Pharao*.

La discussion autour de cette photographie amène à montrer que le thème de « la mesure du temps » est plus que jamais d'actualité.

Activités

Activité documentaire 1. Les horloges atomiques

Commentaires

Nous avons choisi une première activité centrée sur les horloges pour situer clairement la problématique de ce chapitre. Noël Dimarcq, physicien impliqué directement dans la conception des horloges atomiques, fait découvrir aux élèves le monde des laboratoires de recherche (avec ses questions théoriques sensibles, ses applications dans les grandes expériences scientifiques, etc), et d'autre part, les amène à faire le lien avec des applications très courantes (mais pas forcément visibles) de la vie quotidienne.

Dans cette interview, les élèves situent d'emblée les horloges atomiques et les recherches actuelles dans le long processus de recherche pour améliorer la précision des horloges.

Dans les explications du principe de l'horloge au césium, les élèves retrouvent des notions connues : niveaux d'énergie d'un atome, énergie des photons et fréquence associée, précision d'une mesure.

Le film édité par le CNRS « À l'heure des atomes froids » permet de compléter et d'enrichir cette approche de la mesure du temps. Vous pouvez le retrouver à l'adresse suivante :

<http://videotheque.cnrs.fr/>

Réponses

Exploiter les documents

a. On utilise le qualificatif « atomique » car c'est la fréquence de radiations particulières émises par des atomes qui régulent ces horloges.

b. Augmenter la fréquence de l'oscillateur qui pilote une horloge, permet d'augmenter la précision de celle-ci.

c. Pour vérifier la cohérence entre les deux valeurs de la précision, on compare l'écart exprimé en seconde à la durée également exprimée en secondes soit :

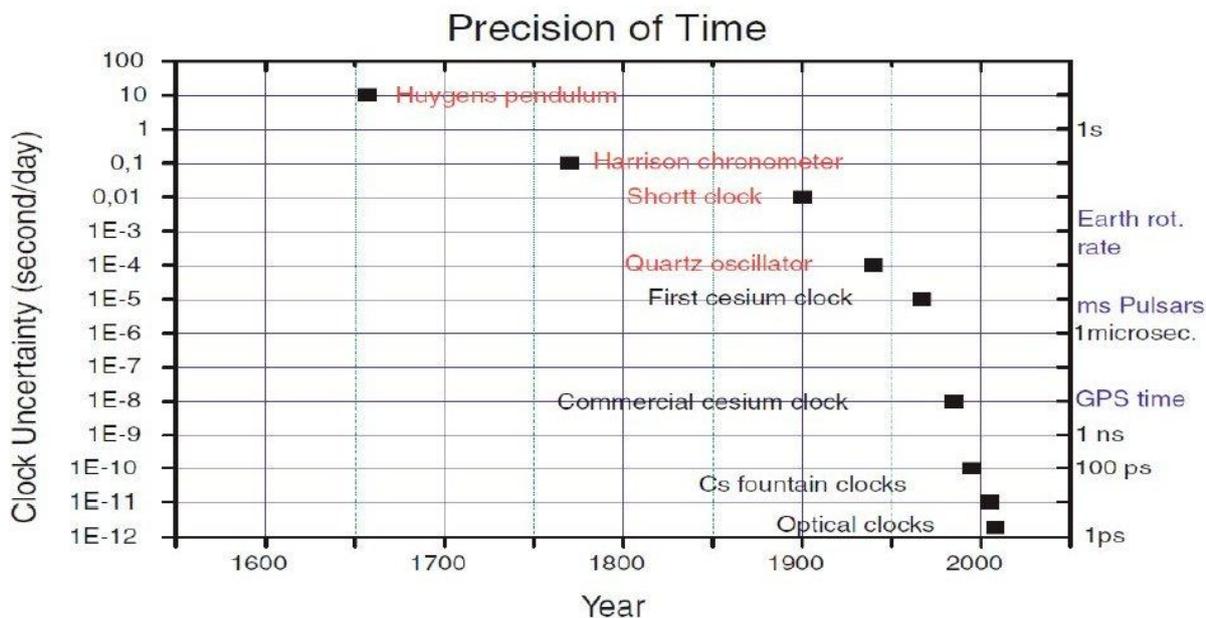
$$10^{-11} \text{ s/jour} = \frac{10^{-11}}{24 \times 3600} = 1,1 \times 10^{-16}$$

Les résultats ont bien le même ordre de grandeur 10^{-16} .

Remarque : la précision exprimée en s/jour paraît moins abstraite aux élèves que lorsqu'elle est exprimée par son ordre de grandeur.

d. L'objectif de cette recherche documentaire est d'amener les élèves à utiliser les données du texte de l'entretien, de rechercher des compléments, de nouvelles pistes, à s'intéresser et s'interroger sur la science d'aujourd'hui.

Dans l'article « La mesure du temps au XXI^e siècle » de C. Salomon (Séminaire Poincaré XV Le Temps (2010), p103 – 113) disponible sur le site <http://www.bourbaphy.fr/salomon.pdf> ; on trouve la représentation graphique page suivante représentant l'évolution de la précision de la mesure du temps depuis Huyghens.



Activité expérimentale 2. Étude des oscillations d'un pendule

Commentaires

L'objectif de cette activité expérimentale est d'étudier les facteurs qui influent sur la période d'un oscillateur. Le matériel décrit dans cette activité est distribué par la société *Jeulin*.

La première partie de l'activité permet de définir les grandeurs caractéristiques du pendule et de lier positions du pendule, valeurs de l'abscisse angulaire et courbes de l'abscisse angulaire en fonction du temps.

Les élèves sont ainsi amenés à donner du sens aux grandeurs cinématiques et aux courbes qu'ils étudieront dans la suite du cours et des exercices.

D'autre part, la question de la mesure de la période se pose d'emblée, et peut déboucher sur le choix d'une méthode qui sera conservée pour toute l'activité (durée de l'enregistrement, mesure sur plusieurs périodes, utilisation de l'outil pointeur, etc).

La deuxième partie propose aux élèves d'élaborer une méthodologie pour étudier les différents facteurs qui influencent la période du pendule.

Les enregistrements sont rapidement réalisés et peuvent être partagés par tous les groupes d'élèves et les résultats attendus sont qualitatifs (l'expression de la période propre d'un pendule simple n'est pas une connaissance attendue), et par ailleurs, il paraît aussi difficile de modéliser le cylindre par un point matériel que de tenir compte, à ce niveau d'enseignement de son moment d'inertie.

Avec ces enregistrements, on met en évidence l'influence de l'amplitude sur la période des oscillations (ce qui est plus difficile à réaliser avec un chronomètre), l'influence de la longueur du pendule, et on vérifie que pour deux cylindres de mêmes dimensions mais de masses différentes, la période conserve une même valeur ; toutes les autres caractéristiques (forme du cylindre, fil) étant inchangées.

La conclusion permet de s'interroger sur l'utilisation d'un pendule (non entretenu) comme instrument de mesure du temps.

Remarque 1 : parmi les deux types de pendules proposés par le constructeur, « fil-cylindre » et « tige-cylindre », nous avons choisi la solution « fil-cylindre » car sur la durée de quelques périodes, le phénomène d'amortissement est très peu sensible contrairement au cas du pendule « tige-cylindre ». Toutefois, dans la pratique, la mesure de la longueur de la distance entre l'axe de rotation et le centre du cylindre se révèle plus délicate à réaliser.

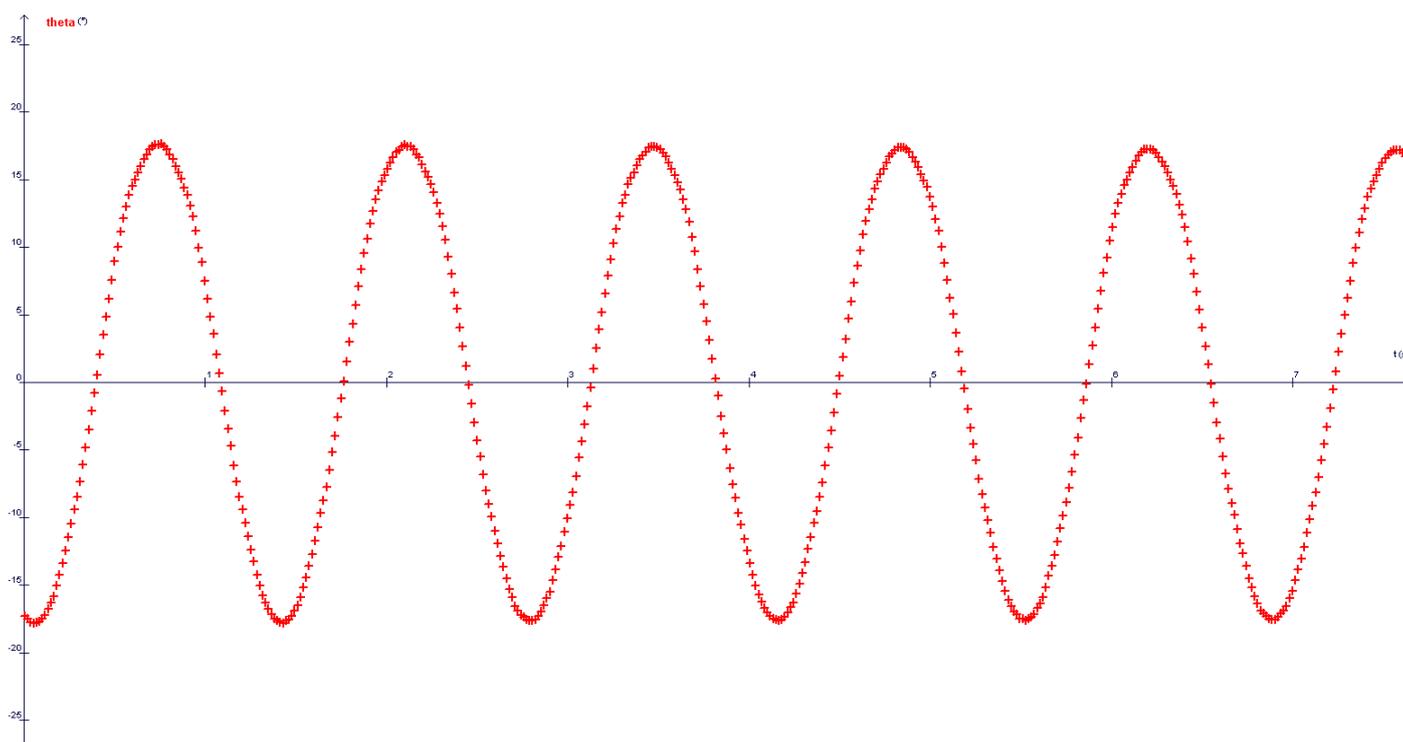
Remarque 2 : avant de démarrer l'acquisition des mesures, il est nécessaire de lancer les oscillations du pendule avec une amplitude proche de l'amplitude voulue : on peut ainsi vérifier que les oscillations se font dans un même plan. La valeur de l'amplitude est ensuite mesurée directement sur l'enregistrement.

Réponses

1. Observer

a. et b. Le fichier de mesures disponible a été réalisé avec un pendule dont les caractéristiques sont :

- Longueur $L = 46$ cm ;
- Cylindre de masse $m = 103$ g ;
- Amplitude des oscillations $\approx 19^\circ$;
- La durée de 4 périodes, mesurée en utilisant l'outil pointeur, est $4T = 5,46$ s donc $T = 1,37$ s.



2. Interpréter

a. et b. Sur l'enregistrement, on note un très faible amortissement des oscillations : sur la durée de 4 périodes, la valeur de l'amplitude évolue de $19,3^\circ$ à $19,0^\circ$.

On peut alors considérer que, sur une durée courte de quelques périodes, les oscillations du pendule sont périodiques.

3. Proposer et réaliser un protocole expérimental

a. et b. Le protocole doit permettre d'étudier séparément l'influence de la masse m , de la longueur ℓ du pendule et de l'amplitude des oscillations.

Quelques résultats

Les fichiers correspondants à ces mesures sont disponibles sur le Manuel Numérique Enrichi et sur le site compagnon.

Influence de l'amplitude :

$\ell = 46 \text{ cm}$ et $m = 103 \text{ g}$

Amplitude	$4T$
11°	5,43 s
19°	5,46 s
29°	5,51 s
40°	5,58 s

Ces résultats montrent que la durée de la période varie avec l'amplitude des oscillations.

Influence de la masse du pendule :

Amplitude $\approx 11^\circ$ et $\ell = 46 \text{ cm}$

Masse	$4T$
103 g	5,43 s
163 g	5,43 s

On note que pour les deux valeurs différentes de masse des pendules (les cylindres ont des dimensions identiques), la période garde une même valeur. On fait alors l'hypothèse qu'avec une même configuration (même fil, mêmes dimensions des cylindres), la période ne dépend pas de la masse du pendule.

Influence de la longueur du pendule :

Amplitude $\approx 20^\circ$ et $m = 163 \text{ g}$

Longueur	$4T$
20 cm	3,60 s
30 cm	4,41 s
46 cm	5,46 s
60 cm	6,23 s

La période des oscillations augmente quand la longueur du pendule augmente.

4. Conclusion

La période des oscillations du pendule dépend de sa longueur : une variation de température entraîne des variations dans les dimensions du pendule (longueur du fil, dimensions du cylindre), ce qui entraîne une modification de la durée de la période du pendule. Pour garder une même valeur, et permettre une mesure précise du temps, il faudrait donc que le pendule soit maintenu à une température constante.

Nous avons vu par ailleurs que le phénomène d'amortissement des oscillations est peu sensible sur des durées courtes. Mais sur des durées plus longues, on note que l'amplitude des oscillations diminue nettement. Nous avons vu que la durée d'une oscillation (appelée pseudo-période) diminue lorsque l'amplitude des oscillations diminue : avec un tel pendule, la mesure du temps ne peut donc utiliser la durée d'une oscillation comme étalon (il est nécessaire d'entretenir les oscillations pour qu'elles gardent une amplitude constante).

Simulation 3. Étude énergétique des oscillations du pendule

Commentaires

L'objectif de cette activité est d'étudier l'évolution de l'énergie mécanique d'un oscillateur lorsqu'il se déplace sans frottement (le pendule simple) ou au contraire lorsqu'il est soumis à des frottements. C'est donc la problématique de la conservation et non conservation de l'énergie qui est traitée ici.

Nous avons choisi de faire travailler les élèves sur une simulation pour qu'ils puissent explorer en parallèle les deux modèles d'oscillateur (ce qui est difficile à réaliser expérimentalement).

Nous proposons également dans la simulation, plusieurs représentations de l'évolution des formes cinétique, potentielle et mécanique (en fonction du temps, en fonction de l'abscisse angulaire) de l'énergie mécanique du système. Les élèves peuvent faire jouer la simulation pas à pas, faire ainsi le lien entre toutes les représentations (oscillations, énergies) pour interpréter l'influence des frottements sur le mouvement et sur l'énergie du système. Toutefois, il est possible de cacher la représentation de l'énergie en fonction de l'abscisse angulaire, celle-ci étant plus délicate à exploiter.

Réponses

1. Exploiter

a. L'énergie cinétique du pendule s'exprime par $\mathcal{E}_c = \frac{1}{2}mv^2$.

L'énergie potentielle de pesanteur s'exprime par $\mathcal{E}_p = mgz$ avec z l'altitude du point matériel.

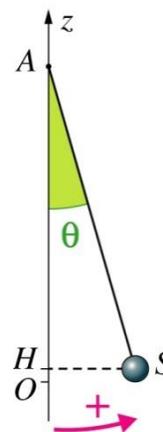
$$z = \overline{OH} = \ell - \ell \cos\theta = \ell(1 - \cos\theta)$$

On a donc :

$$\mathcal{E}_p = mg\ell(1 - \cos\theta)$$

A $t_0 = 0$ s, on obtient les valeurs suivantes (en accord avec les valeurs lues sur la simulation) :

$$\mathcal{E}_c = 0 \text{ J} ; \mathcal{E}_p = 1,2 \text{ J} ; \mathcal{E}_m = 1,2 \text{ J}$$



b. La période T des oscillations a une valeur double de celle de la période des énergies cinétique et potentielle.

2. Interpréter

a. Le parallèle entre les courbes $\theta(t)$, $\mathcal{E}_c(t)$ et $\mathcal{E}_p(t)$ permettent de répondre à la question.

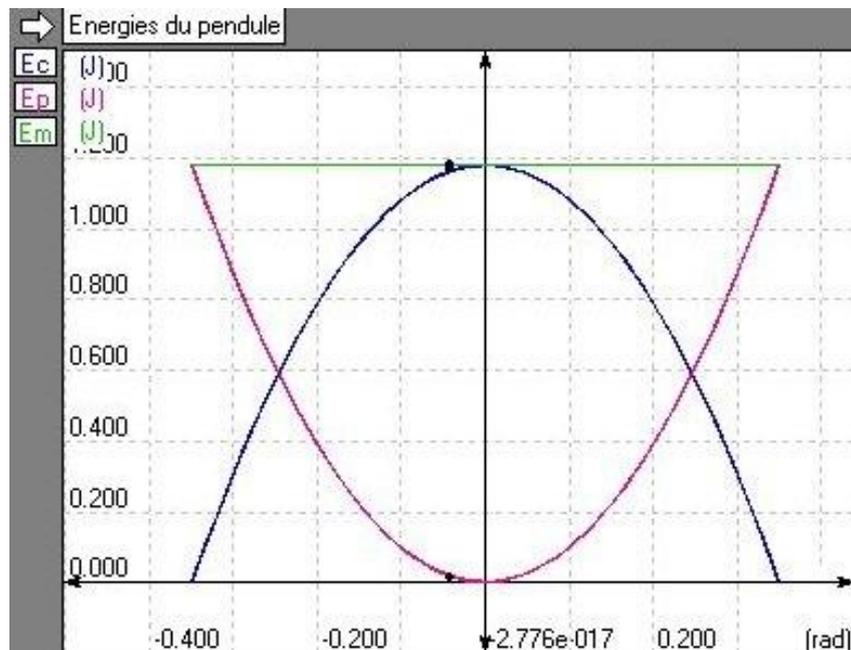
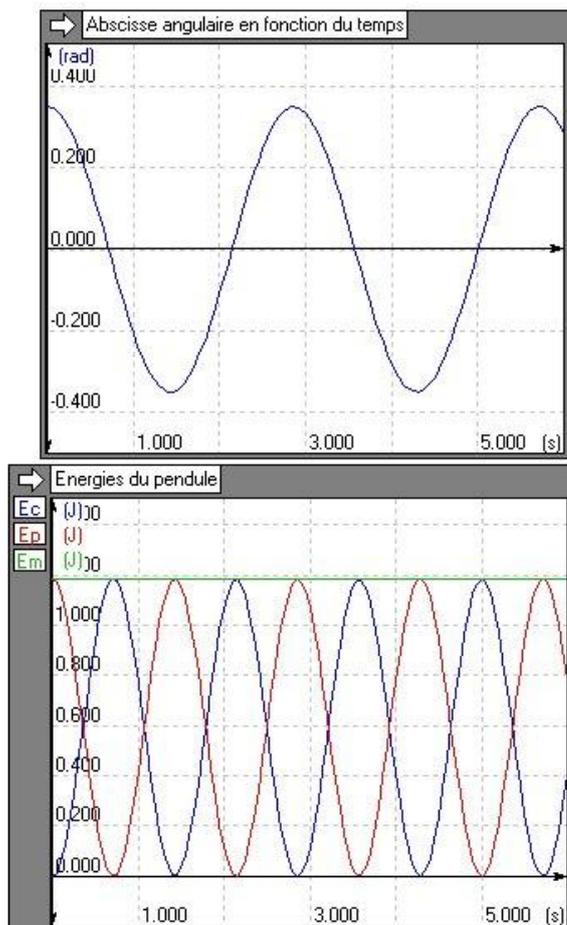
\mathcal{E}_c minimale et \mathcal{E}_p maximale lorsque $\theta = \pm \theta_m$;

\mathcal{E}_c maximale et \mathcal{E}_p minimale lorsque $\theta = 0$ rad.

On note qu'en l'absence de frottements, l'énergie mécanique reste constante au cours des oscillations : elle se conserve.

b. On retrouve ces résultats sur les représentations graphiques $\mathcal{E}_c(\theta)$, $\mathcal{E}_p(\theta)$ et $\mathcal{E}_m(\theta)$.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 11. Les oscillateurs et la mesure du temps



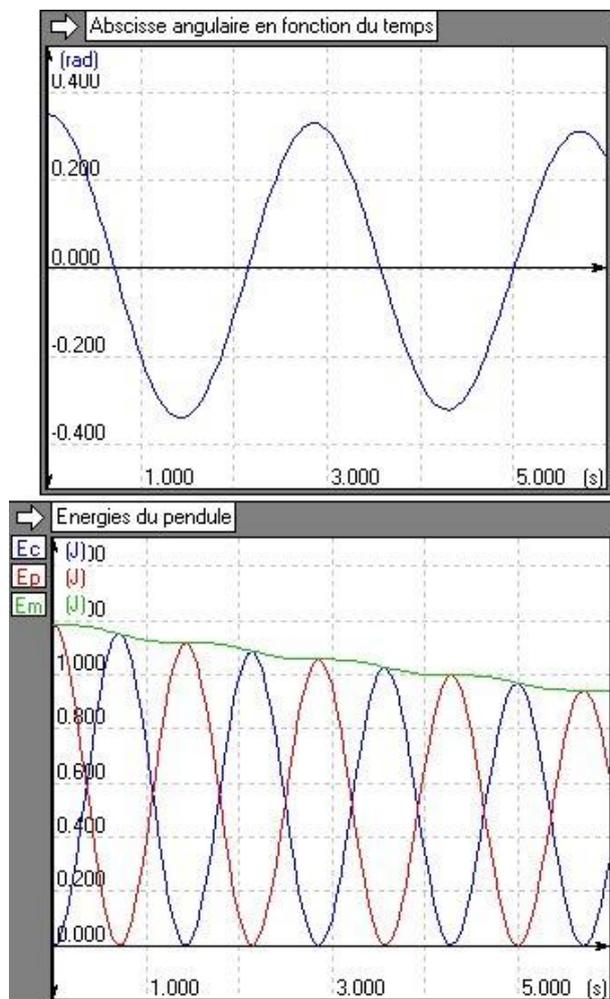
Remarque : il est important pour les élèves qu'ils puissent suivre en parallèle la position du pendule et les positions du point correspondant sur les trois courbes.

3. Observer et interpréter

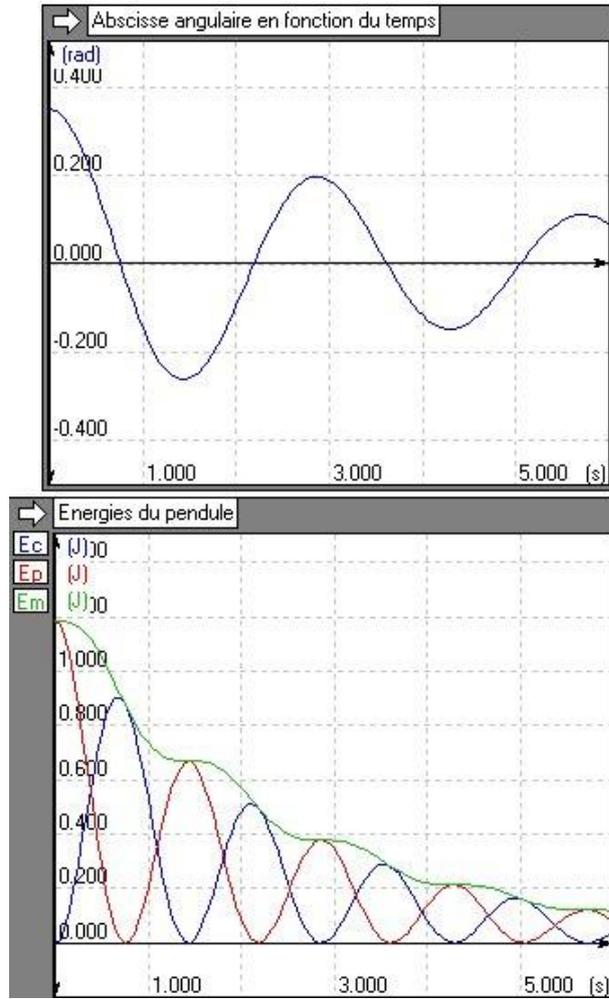
a. Nous avons choisi des frottements qui restent faibles de façon à conserver un mouvement oscillatoire au pendule (mais il est simple de modifier la valeur du coefficient k pour obtenir la simulation d'un mouvement non oscillatoire).

Avec frottements très faibles ($k = 0,1$)

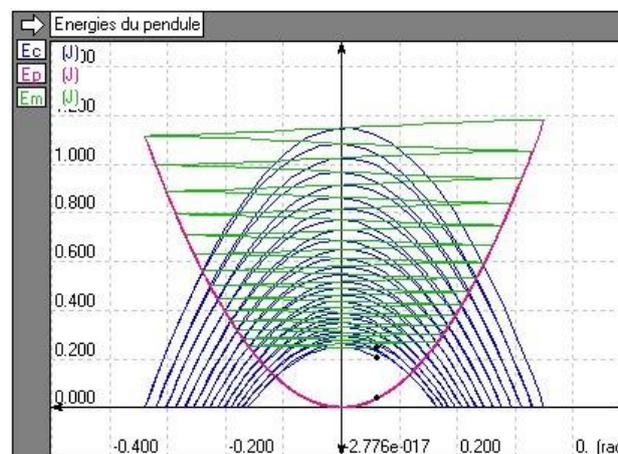
Avec frottements plus importants ($k = 1$)



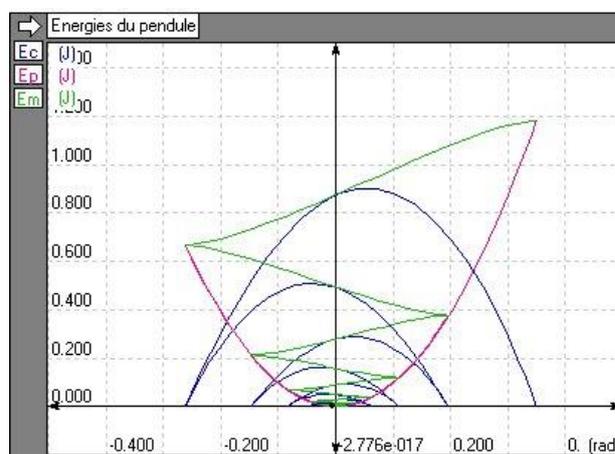
$\theta(t)$ et énergies en fonction de t



$\theta(t)$ et énergies en fonction de t



Formes d'énergie en fonction de θ



Formes d'énergie en fonction de θ

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 11. Les oscillateurs et la mesure du temps

Sur les courbes $\theta(t)$, on note la diminution de l'amplitude des oscillations (plus forte quand les frottements deviennent plus importants) et donc l'amortissement des oscillations.

On note parallèlement que l'énergie mécanique du pendule diminue au cours du temps (avec les valeurs maximales des énergies cinétique et potentielle).

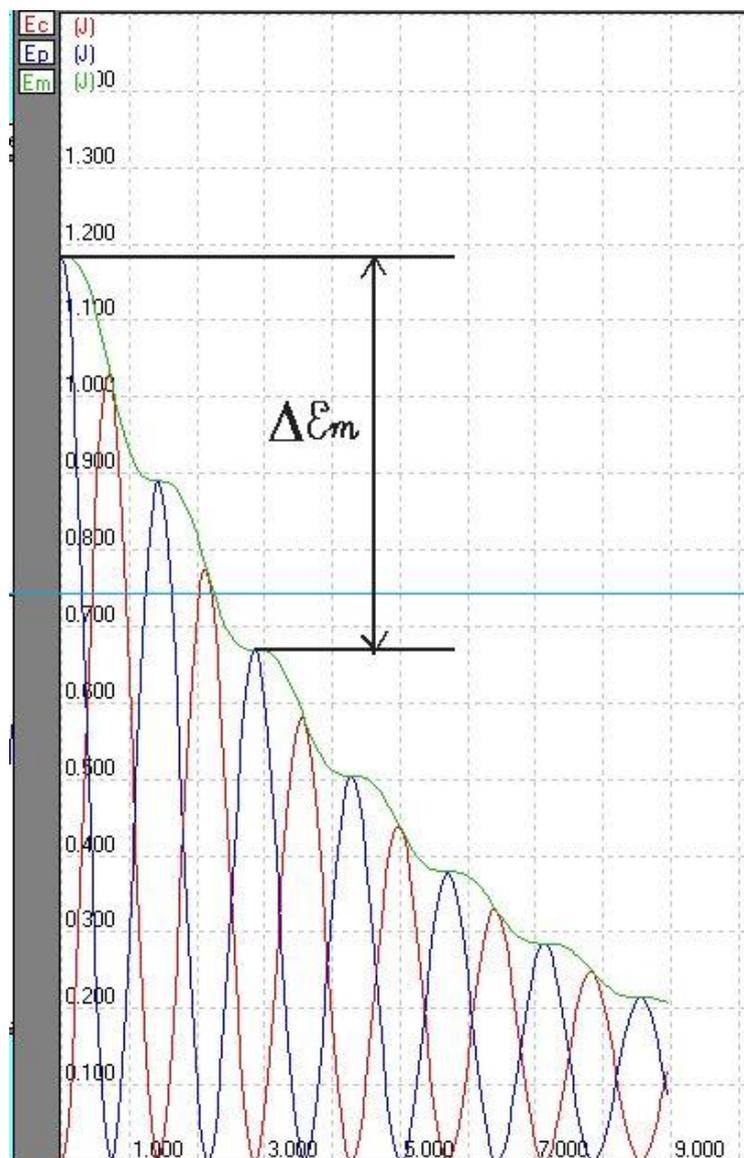
b. La variation de l'énergie mécanique du pendule lors de la première oscillation peut se mesurer sur les courbes représentant l'énergie mécanique en fonction du temps ou l'énergie mécanique en fonction de l'abscisse angulaire.

La diminution de l'énergie mécanique dépend de la valeur du coefficient de frottement.

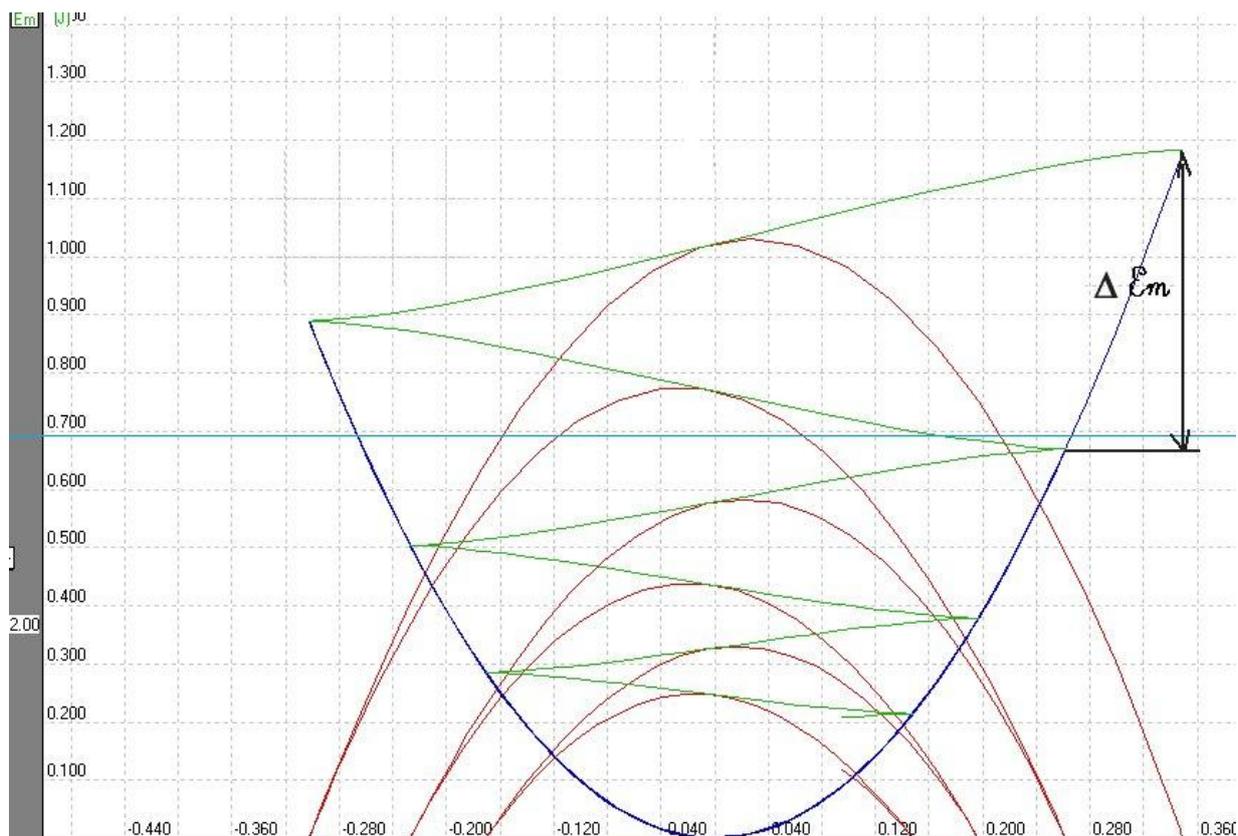
Pour un coefficient $k = 0,5$, on obtient une diminution de l'énergie mécanique de :

$$1,18 - 0,68 = 0,5 \text{ J}$$

soit une variation d'énergie de $-0,5 \text{ J}$



Courbes des énergies en fonction de t



Courbes des énergies en fonction de θ

c. On retrouve les résultats sur les courbes des énergies en fonction de l'élongation, et il est intéressant de noter que les courbes de l'énergie cinétique et de l'énergie mécanique sont modifiées pendant les oscillations, alors que la courbe de l'énergie potentielle ne change pas (seule la position des valeurs maximales changent, à rapprocher de l'expression établie en **1.a.** pour $\mathcal{E}_p(\theta)$).

4. Conclusion

Dans les horloges traditionnelles à balancier, c'est la « chute d'un poids » qui transfère au pendule l'énergie nécessaire à l'entretien de ses oscillations (voir représentation page 228 du cours).

Exercices d'application

5 minutes chrono !

1. Mots manquants

- d'altitude ; A ; B
- joule
- \vec{F} ; \overline{AB}
- diminue ; non conservatives

2. QCM

- Dépend du signe de la charge q .
- Est toujours positif quand le corps descend .
- Son travail ne dépend pas du chemin suivi par le point matériel pendant son déplacement.
- Il y a conversion d'énergie de A entre les formes potentielle et cinétique.
- Reste constante en l'absence de frottements.

Compétences exigibles

3. a. Le travail de la force \vec{F} exercée par le déménageur pour déplacer l'armoire sur une longueur $L = 5$ m de A à B est égal à :

$${}^{\circ}W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \overline{AB}$$

Comme \vec{F} et \overline{AB} ont même direction et même sens :

$${}^{\circ}W_{AB}(\vec{F}) = F \times L \quad \text{soit} \quad {}^{\circ}W_{AB}(\vec{F}) = 4 \times 10^2 \times 5 = 2 \times 10^3 \text{ J}$$

Le travail est moteur : il favorise le déplacement et sa valeur est positive.

b. Le poids \vec{P} de l'armoire est une force verticale donc toujours orthogonale au déplacement horizontal \overline{AB} . Le travail du poids ${}^{\circ}W_{AB}(\vec{P})$ qui s'exprime par le produit scalaire $\vec{P} \cdot \overline{AB}$ est donc nul :

$${}^{\circ}W_{AB}(\vec{P}) = 0 \text{ J}$$

4. À la montée :

$${}^{\circ}W_{AB}(\vec{P}) = mg (\text{alt}_{\text{départ}} - \text{alt}_{\text{arrivée}}) = 6,5 \times 10^3 \times 9,8 \times (1038 - 2310) = -8,1 \times 10^7 \text{ J}$$

Le travail du poids de la cabine est résistant.

À la descente ${}^{\circ}W_{BA}(\vec{P}) = 8,1 \times 10^7 \text{ J}$. Le travail du poids de la cabine est moteur.

5. a. La force électrique \vec{F}_E est liée au champ électrique \vec{E} par la relation :

$$\vec{F}_E = q\vec{E}$$

La charge q étant positive les vecteurs \vec{F}_E et \vec{E} ont même direction et même sens.

\vec{F}_E a pour valeur :

$$F_E = |q| \times E \text{ soit } F_E = 3,2 \times 10^{-19} \times 5 \times 10^4 = 1,6 \times 10^{-14} \text{ N}$$

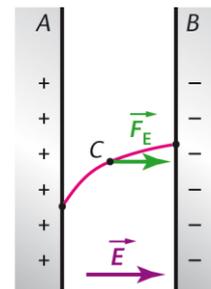
Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 11. Les oscillateurs et la mesure du temps

b. Le travail de la force électrique constante \vec{F}_E ne dépend que de la tension U entre les plaques A et B :

$${}^qW_{AB}(\vec{F}_E) = qU_{AB}$$

Dans le condensateur plan, la tension entre les plaques A et B et la valeur du champ électrique E sont liés par la relation :

$$E = \frac{U_{AB}}{d} \quad \text{soit} \quad U_{AB} = Ed$$



On en déduit ${}^qW_{AB}(\vec{F}_E) = qEd = F_E d$;

soit ${}^qW_{AB}(\vec{F}_E) = 1,6 \times 10^{-14} \times 0,10 = 1,6 \times 10^{-15} \text{ J}$.

6. a. L'énergie mécanique de la balle s'exprime par :

$$\mathcal{E}_m = mgz + \frac{1}{2}mv^2$$

avec z altitude de la balle et v sa vitesse.

On choisit l'origine des potentiels $\mathcal{E}_p = 0$ pour $z = 0$; c'est-à-dire lorsque la balle est sur le sol.

Juste après l'impact sur la raquette l'énergie mécanique de la balle est :

$$\mathcal{E}_m = mgz + \frac{1}{2}mv_0^2 = 0,150 \times 9,8 \times 2 + \frac{1}{2} \times 0,150 \times \left(\frac{90 \times 10^3}{3,6 \times 10^3} \right)^2 = 5,0 \times 10^1 \text{ J}$$

b. En l'absence de frottements, le système est conservatif. Lorsque la balle atteint son altitude maximale, son énergie mécanique a la même valeur que juste après l'impact soit :

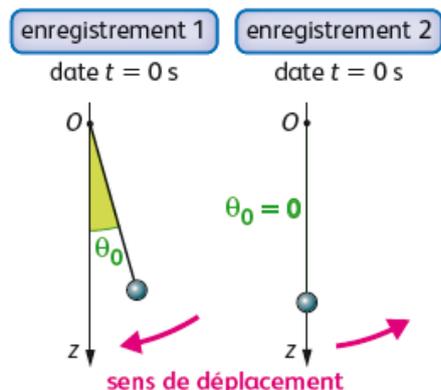
$$\mathcal{E}_m = 5,0 \times 10^1 \text{ J}$$

7. a. et b. On choisit d'étudier le mouvement du centre d'inertie du trapéziste depuis une position d'altitude maximale et le retour à cette position (soit une oscillation).

	Descente 1		Montée 1		Descente 2		Montée 2
\mathcal{E}_p	diminue	0	augmente		diminue	0	augmente
\mathcal{E}_c	augmente		diminue	0	augmente		diminue

8. Les mesures de distances nécessaires au positionnement sont calculées à partir de mesures de temps. Pour que le positionnement soit précis, les mesures de temps doivent l'être également. Ce qui explique l'utilisation d'horloges atomiques dont la précision atteint 10^{-9} s/jour soit 10^{-14} et non une horloge dont la précision est 10 000 fois plus faible (10^{-4} s/jour).

Compétences générales



9. a. Pour l'enregistrement 1, à la date $t = 0$ s, l'abscisse angulaire θ a sa valeur maximale $\theta_{\max} = 15^\circ$. Quand t augmente, θ diminue : le pendule part donc de sa position d'élongation maximale vers la position d'équilibre.

Pour l'enregistrement 2, à la date $t = 0$ s, l'abscisse angulaire θ a la valeur $\theta = 0^\circ$. Quand t augmente, θ augmente : le pendule part donc de sa position d'équilibre et se déplace dans le sens positif choisi.

b. L'amplitude des oscillations est :

- pour l'enregistrement 1 : $\theta_{1\max} = 15^\circ$;
- pour l'enregistrement 2 : $\theta_{2\max} = 10^\circ$.

c. La période du pendule est de $T = 0,5$ s.

10. $\dim(T) = T$. Déterminons la dimension des différentes expressions proposées et comparons le résultat à la dimension de la période T .

$$\dim\left(2\pi \sqrt{\frac{g}{L}}\right) = \sqrt{\frac{\dim(g)}{\dim(L)}} = \sqrt{\frac{LT^{-2}}{L}} = T^{-1} \neq T$$

$$\dim\left(2\pi \sqrt{\frac{L}{m}}\right) = \sqrt{\frac{\dim(L)}{\dim(m)}} = \sqrt{\frac{L}{M}} \neq T$$

$$\dim\left(2\pi \sqrt{\frac{mg}{L}}\right) = \sqrt{\frac{\dim(mg)}{\dim(L)}} = \sqrt{\frac{MLT^{-2}}{L}} = \sqrt{MT^{-2}} \neq T$$

$$\dim\left(2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}\right) = \sqrt{\frac{\dim(L)}{\dim(g)}} = \sqrt{\frac{L}{LT^{-2}}} = T$$

On en déduit que l'expression $T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$ est l'expression correcte.

11. Juste après le lancement, le boulet s'élève en altitude : son énergie potentielle \mathcal{E}_p augmente alors que son énergie cinétique \mathcal{E}_c diminue. Lorsque le boulet redescend vers le mur du château, son énergie potentielle \mathcal{E}_p diminue alors que son énergie cinétique \mathcal{E}_c augmente. Lors de l'impact sur le mur, l'énergie cinétique du boulet devient nulle, et son énergie potentielle constante. Le boulet transfère alors de l'énergie au mur du château... ce qui participe à la destruction de celui-ci.

12. Calcul de l'écart relatif :

- pour la mesure du temps : 10^{-11} s/jour = $\frac{10^{-11}}{24 \times 60 \times 60} = 1,2 \times 10^{-16}$

- pour la mesure de la distance Terre-Soleil : $\frac{\text{épaisseur d'un cheveu}}{\text{distance Terre-Soleil}} = \frac{50 \times 10^{-6}}{1,5 \times 10^{11}} = 3,3 \times 10^{-16}$

Les deux écarts relatifs sont comparables : ils ont le même ordre de grandeur. L'affirmation est donc juste.

Exercices de méthode

13. Exercice résolu.

14. a. Les erreurs possibles peuvent être dues à :

- l'expérimentateur : décalage aux instants du déclenchement et d'arrêt du chronomètre, choix de la position de déclenchement (élongation maximale, élongation nulle), observation correcte ou pas, comptage correct ou non ;
- l'appareil de mesure.

b. Tableau des valeurs :

T(s)	1,33	1,28	1,31	1,30	1,33	1,29	1,30	1,31	1,33	1,34	1,28	1,32
-------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Avec la fonction statistique d'un tableur ou d'une calculatrice on obtient :

- la valeur moyenne de la période : $T_{\text{moy}} = 1,310 \text{ s}$;
- la valeur de l'écart type expérimental : $s_{\text{exp}} = 0,02045 \text{ s}$;
- la valeur de l'incertitude pour un niveau de confiance de 95 % : $\Delta T = 0,01 \text{ s}$.

Le résultat de la mesure s'écrit alors : $T = 1,31 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$.

15. a. La balle est le système dont on étudie le mouvement. On choisit le référentiel terrestre. Lorsque la balle est lancée, elle est soumise à la seule action du poids (les forces dues à l'air sont considérées comme nulles). Le système est donc conservatif.

D'après la loi de conservation de l'énergie, l'énergie mécanique \mathcal{E}_{mA} de la balle en A est égale à l'énergie mécanique \mathcal{E}_{mB} de la balle au point B .

On choisit l'origine des potentiels à l'altitude du point A : $\mathcal{E}_{pA} = 0$.

$$\mathcal{E}_{mA} = \mathcal{E}_{pA} + \mathcal{E}_{cA} = \frac{1}{2}mv_0^2$$

(en supposant que la balle est lancée sans effet de rotation)

Au point B le plus haut atteint par la balle, la balle s'est élevée de h au-dessus du point A et sa vitesse est $v_B = 0$. On a alors : $\mathcal{E}_{mB} = \mathcal{E}_{pA} = mgh$.

De la loi de conservation, on déduit :

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = mgh \quad \text{soit} \quad h = \frac{v_0^2}{2g} \quad \text{A.N. : } h = \frac{6^2}{2 \times 9,81} = 1,8 \text{ m}$$

b. Au retour en A , le système étant conservatif, l'énergie mécanique du système en A à la date de lancement est égale à l'énergie mécanique du système en A à la date du retour.

On en déduit que la vitesse de retour en A notée $v'_A = v_0$ soit $v'_A = 6,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

c. Appelons $h' = 1,5 \text{ m}$ la différence d'altitude entre B' et A .

En B' la vitesse de la balle est nulle.

$$\mathcal{E}_{mB'} = \mathcal{E}_{pB'} + \mathcal{E}_{cB'} = mgh' + \frac{1}{2}mv_{B'}^2 = mgh'$$

$$\Delta \mathcal{E}_m = \mathcal{E}_{mB'} - \mathcal{E}_{mA} = \mathcal{E}_{mB'} - \mathcal{E}_{mB} = mgh' - mgh = mg(h' - h)$$

On déduit : $\Delta \mathcal{E}_m = 1,5 \times 10^{-1} \times 9,81 \times (1,5 - 1,8) = -0,44 \text{ J}$

Dans la réalité, de l'énergie est transférée vers l'extérieur par les forces de frottement qui sont non conservatives.

L'indication $\Delta \mathcal{E}_m = -0,50 \text{ J}$ donnée dans le spécimen est corrigée en $\Delta \mathcal{E}_m = -0,44 \text{ J}$ dans le manuel élève pour être en accord avec la valeur de $h = 1,8 \text{ m}$, donnée dans les commentaires (avec la valeur non arrondie de h , le résultat conduit à $-0,49 \text{ J}$).

Exercices d'entraînement

16. a. Travail de la force de traction :

$${}^qW_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB} = F \times L \cos\theta$$

soit : ${}^qW_{AB}(\vec{F}) = 2,0 \times 10^2 \times 350 \times \cos 10 = 6,9 \times 10^4 \text{ J}$

Ce travail est moteur.

b. Travail de la force de frottement :

$${}^qW_{AB}(\vec{f}) = \vec{f} \cdot \overrightarrow{AB} = -f \times L$$

soit : ${}^qW_{AB}(\vec{f}) = -1,7 \times 10^2 \times 350 = -6,0 \times 10^4 \text{ J}$

Ce travail est résistant.

17. On choisit par exemple l'origine des altitudes au point B soit $z_B = 0$.

Travail du poids entre A et B :

$${}^qW_{AB}(\vec{P}) = mg(z_A - z_B) = mg \ell$$

soit ${}^qW_{AB}(\vec{P}) = 0,10 \times 9,81 \times 0,50 = 0,49 \text{ J}$ (travail moteur)

Travail du poids entre B et C :

$${}^qW_{BC}(\vec{P}) = mg(z_B - z_C) = -mg \ell = -0,49 \text{ J}$$
 (travail résistant)

Travail du poids entre A et C :

$${}^qW_{AC}(\vec{P}) = mg(z_A - z_C) = 0 \text{ J}$$

18. La variation d'énergie potentielle de pesanteur ne dépend que de la différence d'altitude entre le point de départ A et le point d'arrivée B, elle est indépendante du chemin suivi.

On obtient :

$$\mathcal{E}_{pA} - \mathcal{E}_{pB} = mg(z_B - z_A) \text{ soit } \mathcal{E}_{pA} - \mathcal{E}_{pB} = 90 \times 9,81 \times (-870) = -7,7 \times 10^5 \text{ J}$$

19. a. À l'instant où le parachutiste quitte sa cabine à l'altitude $h_1 = 40 \text{ km}$, dans le référentiel terrestre, sa vitesse est nulle. Son énergie cinétique est alors : $\mathcal{E}_{c1} = 0 \text{ J}$.

En prenant $\mathcal{E}_p = 0$ au niveau du sol on obtient au départ de la cabine :

$$\mathcal{E}_{m1} = \mathcal{E}_{c1} + \mathcal{E}_{p1} = mgh_1 \text{ soit } \mathcal{E}_{m1} = 1,5 \times 10^2 \times 9,75 \times 4,0 \times 10^4 = 5,85 \times 10^7 \text{ J}$$

Lorsqu'il a atteint l'altitude de 35 000 m, d'après les données du texte, sa vitesse est :

$$v = 1,1 \times 10^3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \text{ soit } v = 3,1 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Son énergie cinétique est alors :

$$\mathcal{E}_{c2} = 0,5 \times 1,5 \times 10^2 \times (3,1 \times 10^2)^2 = 7,0 \times 10^6 \text{ J}$$

Son énergie mécanique devient :

$$\mathcal{E}_{m2} = \mathcal{E}_{c2} + \mathcal{E}_{p2} = 7,0 \times 10^6 + 1,5 \times 10^2 \times 9,75 \times 3,5 \times 10^4 = 5,8 \times 10^7 \text{ J}$$

b. L'écart relatif entre les valeurs de \mathcal{E}_{m1} et \mathcal{E}_{m2} est extrêmement faible et peut être dû à la précision des données : on peut considérer que l'énergie mécanique du parachutiste s'est conservée pendant cette phase du saut, la chute s'est produite sans frottement.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 11. Les oscillateurs et la mesure du temps

20. a. $\mathcal{E}_{m_c} = mgz_C + \frac{1}{2}mv_C^2$

b. Le déplacement se faisant sans frottement (système conservatif), on a alors :

$$\mathcal{E}_{m_c} = \mathcal{E}_{m_A}$$

soit : $mgz_A + \frac{1}{2}mv_A^2 = mgz_C + \frac{1}{2}mv_C^2$

soit : $v_A^2 = 2g(z_C - z_A) + v_C^2$

or : $v_C = 20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ soit $v_C = 5,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

La mesure sur le graphique donne : $z_A = \frac{40 \times 15}{29} = 20,7 \text{ m}$.

d'où : $v_A^2 = 2 \times 9,81 \times (40 - 20,7) + 5,6^2$

On obtient $v_A = 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ soit $v_A = 73 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

c. En *D*, l'expression devient : $v_D^2 = 2g(z_C - z_D) + v_C^2$

On obtient $v_D = 29 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ soit $v_D = 1,0 \times 10^2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

d. Avec des frottements, il faudrait que la vitesse de lancement en *A* soit supérieure à $73 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ pour que, au point *C*, la vitesse du wagon soit de $20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. L'arrivée en *D* se ferait alors avec une vitesse inférieure à $1,0 \times 10^2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

21. Pour la bille 1

Au départ : $\mathcal{E}_{m_1} = \frac{1}{2}mv_{01}^2$

et au sommet : $\mathcal{E}'_{m_1} = mgh_1$ avec $\mathcal{E}_{m_1} = \mathcal{E}'_{m_1}$.

Pour la bille 2

Au départ : $\mathcal{E}_{m_2} = \frac{1}{2}mv_{02}^2$

et au sommet : $\mathcal{E}'_{m_2} = mgh_2$ avec $\mathcal{E}_{m_2} = \mathcal{E}'_{m_2}$.

Comme $v_{01} = v_{02}$, on a $\mathcal{E}_{m_1} = \mathcal{E}_{m_2}$ soit $\mathcal{E}'_{m_1} = \mathcal{E}'_{m_2}$.

On en déduit $h_1 = h_2$.

Les deux billes atteindront la même altitude.

22. a. Le champ \vec{E} est uniforme entre l'anode et la cathode. Il est perpendiculaire aux plaques (cathode et anode).

• La force électrique qui s'exerce sur l'électron dans le champ électrique \vec{E} est définie par :

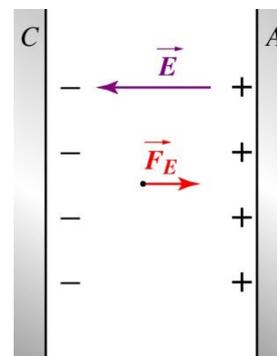
$$\vec{F}_E = -e\vec{E}$$

Ses caractéristiques sont :

- direction : perpendiculaire aux plaques comme \vec{E} ;
- sens : celui du vecteur accélération \vec{a} de la particule donc de la cathode vers l'anode ;
- valeur : $F = eE$;

• Les caractéristiques du champ électrique \vec{E} sont :

- direction : perpendiculaire aux plaques ;
- sens opposé à la force électrique donc de l'anode vers la cathode ;
- valeur : E .



Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 11. Les oscillateurs et la mesure du temps

• Le signe des plaques *A* et *C* : le sens du champ électrique entre les deux plaques va de la plaque chargée positivement vers la plaque chargée négativement. Ici, *A* est chargée positivement et *C* négativement.

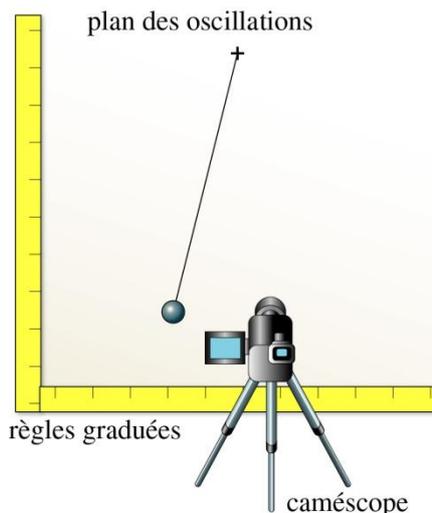
b. Le travail de la force électrostatique \vec{F}_E pour un déplacement de l'électron de la plaque *C* à la plaque *A* est égal à :

$${}^qW_{CA}(\vec{F}_E) = -eU_{CA} = eU_{AC} = eU$$

c. La force électrique est une force conservative car son travail ne dépend pas du chemin suivi par l'électron entre les deux plaques.

23. Pour étudier comment varie au cours du temps l'énergie d'un pendule formé d'un fil et d'une bille, il faut enregistrer les positions successives de la bille du pendule :

- on positionne la caméra vidéo face au pendule ;
- on place une (ou deux) règle(s) graduées dans le champ de la caméra afin de pouvoir étalonner la vidéo lors du pointage, avec un logiciel approprié, des positions successives de la bille ;
- cette ou ces règles graduée(s) sont placée(s) dans le même plan que le pendule et le plus proche possible de l'axe de la caméra afin d'éviter au maximum les erreurs de parallaxe.



24. a. Les missions attribuées aux deux satellites Giove A et Giove B sont : la sécurisation des radio-fréquences allouées au système européen Galileo par l'Union Internationale de Télécommunications, la collecte de données sur l'environnement radiatif des orbites à moyenne distance de la Terre, la validation des principales charges de Galileo en orbite.

« *To secure the radio frequencies provisionally allocated to Europe's Galileo satnav system by the International Telecommunications Union, gather data on the radiation environment of medium Earth orbit, and validate key Galileo payloads in orbit.* »

b. « *Giove B carries a passive hydrogen maser (PHM), accurate to one second in three million years, compared to an accuracy of three seconds in one million years for the smaller rubidium clocks first demonstrated on Giove A.* »

Giove B transporte l'horloge qui a la meilleure précision (1 seconde pour 3 millions d'années) alors que Giove A transporte une horloge au rubidium dont la précision est de 3 secondes pour 1 million d'années.

c. La précision de la localisation est d'autant plus grande que la précision des horloges est grande : les distances sont calculées à partir de mesures de temps (une erreur de 1 ns entraîne un écart de localisation de 30 cm environ).

d. La période de révolution des satellites autour de la Terre étant inférieure à la période de rotation de la Terre sur son axe, les satellites au cours de leurs révolutions passent entre le Soleil et la Terre puis à l'ombre de la Terre. Ils sont donc soumis à d'importantes différences de température au cours de chaque révolution.

Note : sur le site de l'ESA, dans ce même article, on trouve une description des méthodes mises en œuvre pour conserver une température constante.

25. a. L'énergie potentielle de pesanteur s'exprime par $\mathcal{E}_p = mgz$ avec z altitude du point matériel :

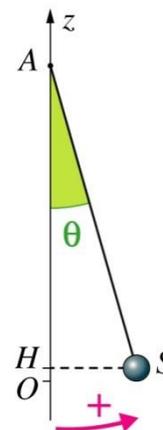
$$z = \overline{OH} = \ell - \ell \times \cos\theta = \ell \times (1 - \cos\theta)$$

On a donc :

$$\mathcal{E}_p = mg \ell \times (1 - \cos\theta)$$

b. Dans le spécimen, une erreur dans la graduation de l'axe des énergies a été corrigée pour le manuel élève : les graduations 30 et 35 sont remplacées respectivement par 25 et 30, car elles laissaient croire à une valeur maximale de 34 mJ.

L'amplitude correspond à la valeur maximale θ_{\max} de l'élongation θ . Quand S est dans sa position l'altitude maximale, θ est maximal et l'énergie potentielle du pendule est maximale. On a alors $\mathcal{E}_{p_{\max}} = 29 \text{ mJ}$.



$$\mathcal{E}_{p_{\max}} = mg \ell (1 - \cos\theta_{\max})$$

Soit :

$$\cos\theta_{\max} = 1 - \frac{\mathcal{E}_{p_{\max}}}{mg\ell}$$

On en déduit :

$$\cos\theta_{\max} = 1 - \frac{29 \times 10^{-3}}{0,20 \times 9,81 \times 0,50} = 0,97$$

Soit :

$$\theta_{\max} = 14^\circ$$

c. $\mathcal{E}_m = \mathcal{E}_c + \mathcal{E}_p$. Quand $\theta = \theta_{\max}$, on a : $\mathcal{E}_p = 29 \text{ mJ}$ et $\mathcal{E}_c = 0 \text{ J}$.

L'énergie mécanique \mathcal{E}_m vaut donc $\mathcal{E}_m = 29 \text{ mJ}$.

Au passage par la position d'équilibre $z = 0$, l'énergie potentielle est nulle $\mathcal{E}_{p_0} = 0 \text{ J}$.

L'énergie cinétique vaut alors $\mathcal{E}_{c_0} = 29 \text{ mJ}$.

La vitesse de passage v_0 de S en O est alors de :

$$v_0 = \sqrt{\frac{2\mathcal{E}_{c_0}}{m}} \quad \text{soit} \quad v_0 = \sqrt{\frac{2 \times 29 \times 10^{-3}}{0,20}} = 0,54 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

d. Les oscillations ont une amplitude inférieure à 20° , cette amplitude est donc considérée ici comme faible.

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}} = 2\pi \sqrt{\frac{0,50}{9,81}} = 1,4 \text{ s}$$

La période des oscillations est deux fois plus grande que celle de l'énergie \mathcal{E}_p (ou \mathcal{E}_c) ; en effet au cours de chaque oscillation, le pendule passe deux fois par sa position d'altitude maximale ($\mathcal{E}_{p_{\max}}$) et deux fois par sa position d'altitude minimale ($\mathcal{E}_{p_0} = 0$).

26. a. Recherchons la dimension de $\sqrt{\frac{\ell}{g}}$:

$$\dim\left(\sqrt{\frac{\ell}{g}}\right) = \sqrt{\frac{\dim(\ell)}{\dim(g)}} = \sqrt{\frac{\text{L}}{\text{L}\cdot\text{T}^{-2}}} = \text{T}$$

On en déduit que $\sqrt{\frac{\ell}{g}}$ est bien homogène à une durée.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 11. Les oscillateurs et la mesure du temps

b. L'écart relatif est :

$$\frac{T - T_0}{T_0} = \frac{\theta^2}{16}$$

En exprimant θ en radian on obtient $\frac{T - T_0}{T_0} = \frac{\theta^2}{16} = 3 \times 10^{-4}$ soit un écart relatif de $\frac{3}{10000}$.

c. Soit T_2 la nouvelle valeur de la période : $T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g_2}}$.

$$\text{Soit } T_2 = T_1 \times \sqrt{\frac{g_1}{g_2}} = 2,001 \text{ s}$$

d. Cette horloge à balancier ne convient pas parce que la valeur de la période changeant avec la valeur de g , elle dépend de la longitude du lieu où elle se trouve.

e. La précision de l'horloge H4 est :

$$\frac{15}{156 \times 24 \times 3600} = 1,1 \times 10^{-6}$$

f. Le rayon r du parallèle de Plymouth est tel que :

$$\cos \lambda = \frac{r}{R_T}$$

soit $r = R_T \cos \lambda$

soit $r = 4,10 \times 10^6 \text{ m}$

En 24 h, un point de la latitude de Plymouth se déplace dans le référentiel géocentrique de :

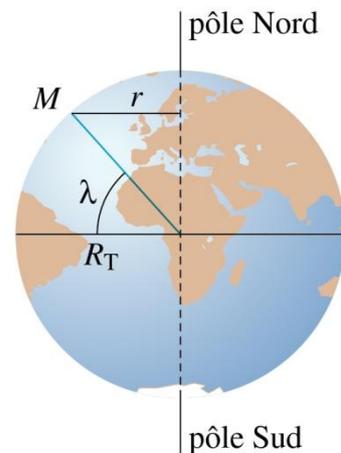
$$L = 2\pi r$$

En 15 s, le déplacement sera de :

$$\ell = L \times \frac{15}{24 \times 3600}$$

$$\ell = 4,5 \times 10^3 \text{ m}$$

$$\ell = 4,5 \text{ km}$$



Exercices de synthèse

27. En l'absence de frottement, le système pendule est conservatif : son énergie mécanique est constante au cours des oscillations et conserve donc la valeur $\mathcal{E}_{m_0} = 8,5 \text{ mJ}$ qu'il a à $t_0 = 0 \text{ s}$.

Lorsque le système est soumis à des frottements, il échange de l'énergie avec l'extérieur et son énergie mécanique diminue. La variation de son énergie mécanique $\Delta\mathcal{E}_m$ est alors égale à l'énergie échangée avec l'extérieur soit le travail des forces de frottement. On a alors :

$$\Delta\mathcal{E}_m = {}^oW \overrightarrow{f_{\text{frot}}}$$

La période T des oscillations correspond à 2 périodes pour l'énergie potentielle (ou cinétique). On lit $T = 1,2 \text{ s}$.

À $t = 1,2 \text{ s}$, l'énergie mécanique $\mathcal{E}'_m = 5,5 \text{ mJ}$.

On obtient alors :

$$\Delta\mathcal{E}_m = {}^oW \overrightarrow{f_{\text{frot}}} = 5,5 - 8,5 = -3,0 \text{ mJ}$$

Le rapport en valeur absolue du travail des forces de frottement et de l'énergie mécanique est :

$$r = \frac{3,0}{8,5} = 35 \%$$

Au bout d'une période d'oscillation, 35 % de l'énergie mécanique initiale du pendule a été transférée vers l'extérieur par le travail des forces de frottements.

28. a. Lorsque la température augmente, la longueur du pendule augmente et sa période également.

b. Pendant une même durée, en été, le balancier de l'horloge fera moins d'oscillations qu'en hiver (puisque sa période est plus grande en été qu'en hiver). L'aiguille de l'horloge avancera donc moins vite en été qu'en hiver et l'horloge retardera.

29. a. L'énergie potentielle de pesanteur augmente lorsque la boule s'élève puis diminue lors de sa chute : la courbe (3) correspond donc à $\mathcal{E}_p(t)$.

L'énergie cinétique de la boule varie au cours du déplacement, elle diminue pendant la montée et augmente ensuite. La courbe (2) représente donc $\mathcal{E}_c(t)$.

La courbe (1) est celle de l'énergie mécanique $\mathcal{E}_m(t)$.

b. La valeur de $\mathcal{E}_m(t)$ reste constante au cours du temps : le système « boule de pétanque dans le champ de pesanteur » est conservatif. Le déplacement se fait donc sans frottement.

c. Par définition, $\mathcal{E}_{c_0} = \frac{1}{2}mv_0^2$ donc $v_0 = \sqrt{\frac{2\mathcal{E}_{c_0}}{m}}$.

Par lecture graphique, $\mathcal{E}_{c_0} = 32 \text{ J}$ donc $v_0 = \sqrt{\frac{2 \times 32}{0,75}} = 9,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

L'énergie potentielle de pesanteur est définie par :

$$\mathcal{E}_p = mgz \text{ avec la convention } \mathcal{E}_p = 0 \text{ quand } z = 0$$

À la date $t_0 = 0 \text{ s}$, on lit $\mathcal{E}_{p_0} = 2,0 \text{ J}$.

On en déduit :

$$z_0 = \frac{\mathcal{E}_{p_0}}{mg} = \frac{2}{0,75 \times 9,81} = 0,27 \text{ m} = 27 \text{ cm}$$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 11. Les oscillateurs et la mesure du temps

d. Quand la boule atteint l'altitude z_{\max} , alors \mathcal{E}_p est maximale.

Par lecture graphique, $\mathcal{E}_{p_{\max}} = 14,5 \text{ J}$ (pour $t = 0,5 \text{ s}$).

On en déduit :

$$z_{\max} = \frac{\mathcal{E}_{p_{\max}}}{mg} \text{ soit } z_{\max} = 2,0 \text{ m}$$

La valeur lue sur le graphique de l'énergie cinétique à $t = 0,5 \text{ s}$ est $\mathcal{E}_{c_{\min}} = 19,5 \text{ J}$.

On en déduit la valeur de la vitesse :

$$v = \sqrt{\frac{2\mathcal{E}_{c_{\min}}}{m}} = 7,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

30. a. Lorsque deux nageurs réalisent leur épreuve dans des « temps » avec un écart inférieur à $1/100 \text{ s}$, l'affichage les crédite du même temps : ils apparaissent alors ex-æquo sur l'affichage alors qu'en réalité, ils ne sont pas ex-æquo.

b. L'écart en distance ΔL (en supposant la vitesse des nageurs égale à leur vitesse moyenne) en $\Delta t = 1 \text{ ms}$ serait de :

$$\Delta L = v_{\text{moy}} \Delta t \text{ avec } v_{\text{moy}} = \frac{100}{52,76} = 1,895 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

On obtient $\Delta L = 1,9 \times 10^{-3} \text{ m}$ soit $1,9 \text{ mm}$.

c. La précision est de $1/100\text{s}$ sur $52,76 \text{ s}$ soit une précision de 2×10^{-4} .

d. L'écart de temps τ dû à un couloir plus court de $1,0 \text{ cm}$ représente la durée pour parcourir deux fois cette distance (deux longueurs de piscine) à la vitesse de $1,895 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ soit :

$$\tau = \frac{2 \times 10^{-2}}{1,895} = 11 \text{ ms}$$

On peut remarquer qu'un écart maximal de 1 cm est pris en compte par la règlementation et ceci permet de noter la grande précision avec laquelle doit être construite une piscine olympique !

31. a. Pour que la vitesse de la particule augmente pendant la traversée de A vers B , le vecteur accélération \vec{a} de la particule doit être orienté de la plaque A vers la plaque B comme la force électrique $\vec{F}_E = m\vec{a}$.

Étant donné que la charge de cette particule est négative, les caractéristiques du champ électrique \vec{E} sont :

- sa direction : perpendiculaire aux plaques,
- son sens : vers la plaque A ,
- sa valeur : $E = \frac{U}{d}$.

Le sens du champ \vec{E} va de la plaque positive vers la plaque négative : on en déduit que la plaque A est chargée négativement et la plaque B positivement. On a donc $U = U_{BA}$.

b. ${}^oW_{AB}(\vec{f}_e) = qU_{BA} = -qU$.

c. Dans un condensateur plan, la force électrique est conservative. Comme pour le poids dans un champ de pesanteur uniforme, la relation entre le travail de la force et l'énergie potentielle électrique est :

$${}^oW_{AB}(\vec{f}_e) = -qU = \mathcal{E}_{pA} - \mathcal{E}_{pB}$$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 11. Les oscillateurs et la mesure du temps

En choisissant l'origine des potentiels en A : $\mathcal{E}_{pA} = 0$, on trouve que $\mathcal{E}_{pB} = qU$.

d. et e. L'énergie mécanique de la particule se conserve.

On en déduit :

$$\mathcal{E}_{pA} + \mathcal{E}_{cA} = \mathcal{E}_{pB} + \mathcal{E}_{cB}$$

Comme $\mathcal{E}_{pA} = 0$ et $\mathcal{E}_{pB} = qU$, on trouve que :

$$\mathcal{E}_{cA} = qU + \mathcal{E}_{cB}$$

d'où :

$$\mathcal{E}_{cB} = \mathcal{E}_{cA} - qU$$

ainsi :

$$\frac{1}{2}mv_B^2 = \frac{1}{2}mv_0^2 - qU$$

$$v_B = \sqrt{v_0^2 - \frac{2qU}{m}} \quad \text{si } v_0 = 0$$

on obtient :

$$v_B = \sqrt{-\frac{2qU}{m}}$$

soit :

$$v_B = \sqrt{\frac{2 \times 1,6 \times 10^{-19} \times 700}{9,1 \times 10^{-31}}} = 1,6 \times 10^7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

32. a. On établit que $OH = h = L(1 - \cos \theta)$.

b. Au départ à la date t_1 , l'amplitude est $\theta_1 = 6^\circ$ et devient $\theta_2 = 5^\circ$ après 15 périodes.

Quand θ est maximal, la vitesse du point matériel S est nulle. L'énergie mécanique du pendule est alors égale à son énergie potentielle soit :

$$\mathcal{E}_m = \mathcal{E}_p = mgL(1 - \cos \theta_{\max})$$

Pour 15 oscillations, la variation est de :

$$\mathcal{E}_{m_2} - \mathcal{E}_{m_1} = mgL(1 - \cos \theta_2) - mgL(1 - \cos \theta_1) = mgL(\cos \theta_1 - \cos \theta_2)$$

Soit une variation moyenne par oscillation :

$$\Delta \mathcal{E}_m = \frac{0,85 \times 9,81 \times 1,0 (\cos 6^\circ - \cos 5^\circ)}{15} = -9,3 \times 10^{-4} \text{ J}$$

L'énergie mécanique du pendule diminue de $9,3 \times 10^{-4} \text{ J}$ à chaque oscillation.

Cette énergie, dans le cas du pendule réel, est transférée à l'extérieur par le travail des forces de frottement.

c. La chute du « poids » transfère de l'énergie au pendule. À chaque oscillation, ce transfert est égal au travail du poids ${}^W_0 \vec{P}$. On a alors à chaque oscillation ${}^W_0 \vec{P} = 9,3 \times 10^{-4} \text{ J}$.

Pour la chute maximale de $H = 1,2 \text{ m}$ du « poids », l'énergie transférée au pendule est de :

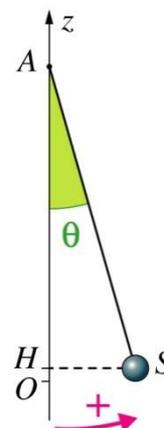
$${}^W \vec{P} = MgH$$

Le nombre d'oscillations correspondantes est :

$$n = \frac{{}^W \vec{P}}{{}^W_0 \vec{P}}$$

et la durée d'autonomie $\tau_{\text{autonomie}}$ de l'horloge est $\tau_{\text{autonomie}} = nT$:

$$\tau_{\text{autonomie}} = \frac{8,0 \times 9,81 \times 1,2}{9,3 \times 10^{-4}} \times 2 = 2,0 \times 10^5 \text{ s soit plus de 56 h}$$



33. Nous avons choisi de faire travailler les élèves sur le principe et les applications de la localisation par satellites, car ce sujet permet de faire le lien avec les horloges atomiques et il est omniprésent dans la vie quotidienne.

Les documents proposés permettent de trouver le principe de la géolocalisation par satellite (le GPS) et d'avoir des précisions sur les horloges atomiques embarquées (texte sur les applications du système Galileo).

Dans la synthèse sur le principe de la localisation par satellites, on doit retrouver que :

- quatre satellites sont nécessaires pour la localisation dans l'espace ;
- la mesure de la distance entre le point à localiser et chaque satellite est liée à la mesure d'une durée ;
- la mesure de la durée doit avoir une précision atomique (horloges atomiques embarquées sur les satellites et synchronisation des horloges à quartz des utilisateurs).

Le développement de ces deux derniers points permet ainsi de traiter le rôle des horloges embarquées sur les satellites.

Remarque : bien que la question des applications ne soit pas à traiter dans le cadre de cet exercice de synthèse, elle peut être l'objet d'une discussion en classe.

La vidéo en anglais « Galileo, time and space », très intéressante, est disponible sur le site Internet de l'ESA.

Chapitre 12 – Relativité du temps

Manuel pages 243 à 258

Choix pédagogiques

Après une analyse de la mesure du temps d'un point de vue classique, ce chapitre reconsidère la notion de temps et constitue une ouverture vers la physique contemporaine. Le projet est modeste mais présente cependant des difficultés incontournables quand il s'agit de remettre en cause des notions fortement ancrées dans les esprits.

On sait que l'invention de la théorie de la relativité repose sur l'invariance de la vitesse de la lumière (et des ondes électromagnétiques en général) dans le vide. À partir de cette constatation, il est apparu que la notion de temps, en tant que réalité commune à tout l'Univers, devait être reconsidérée. On doit à Einstein la finalisation d'une nouvelle théorie cohérente mais l'enseignant ne devrait pas oublier, sans faire d'ombre au génie de ce savant, que la théorie de la relativité est aussi le fruit des travaux d'autres physiciens ou mathématiciens, en particulier Poincaré et Lorentz.

Après avoir énoncé le principe de l'invariance de la célérité de la lumière dans le vide et les postulats d'Einstein, le cours donne, en s'appuyant sur un calcul présenté en activité, la relation entre durée propre et durée mesurée. Nous avons choisi d'introduire la notion de référentiel propre qui n'est pas mentionnée dans le programme mais qui, à l'usage, nous a paru commode pour traiter la notion de durée propre avec un vocabulaire rigoureux.

Dans un dernier paragraphe, nous mentionnons les preuves expérimentales en même temps que les situations où la relativité du temps doit être prise en compte. Pour cela, nous avons opté pour un classement des situations suivant les vitesses concernées : vitesses proches de c (autrement dit, vitesses relativistes) ce qui concerne en fait la physique des particules ; vitesses petites devant c .

Alors que ce manuel était en préparation, la presse a diffusé le compte rendu d'un résultat d'expérience selon laquelle la vitesse c aurait été franchie par des neutrinos. La confirmation du résultat n'était pas connue lors de l'impression du manuel. Nous traitons cette information sous forme d'un exercice de synthèse de document. Si le fait était confirmé, la théorie de la relativité aurait simplement trouvé la limite de validité mais ne serait certainement pas invalidée, de même que la physique de Newton n'a pas été rendue caduque par la physique d'Einstein.

Des animations, des simulations et des vidéos documentaires illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi.

Page d'ouverture

La situation illustrée correspond à un type de question que, selon la littérature de vulgarisation scientifique, Einstein a pu se poser dans sa jeunesse. On doit imaginer ici que le miroir et la jeune femme se déplacent tous deux, ensemble, par rapport à la Terre, à une vitesse très proche de celle de la lumière dans le vide, dans une direction perpendiculaire au miroir.

Un raisonnement sain devrait laisser penser que la lumière venant de la personne mettrait beaucoup de temps pour rattraper le miroir et que l'image réfléchie devrait être vue avec beaucoup de retard. En fait, par rapport au vaisseau, la lumière se propage à la vitesse c et le résultat serait le même que si la scène se produisait sur Terre. À la question « que se passerait-il si la vitesse du vaisseau était égale à c ? » ou encore « était plus grande que c ? », il faudrait répondre que cette situation n'a pas de sens physique car la vitesse c , vitesse indépassable, est inaccessible à un objet de masse non nulle.

Activités

Activité documentaire 1. La célérité de la lumière, un défi au sens commun

Commentaires

Il nous a paru important d'introduire la relativité du temps en montrant que les faits expérimentaux ont joué un rôle essentiel dans l'invention de cette théorie pourtant hautement abstraite. Les expériences de Michelson et Morley n'ont certainement pas été le déclencheur de la démarche d'Einstein mais elles présentent toutefois un intérêt historique et pédagogique tel qu'il est difficile de les ignorer dans une introduction à la relativité restreinte.

Il faut signaler aux élèves qu'il existe bien d'autres expériences que celles de Michelson et Morley pour vérifier directement l'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide, mais il nous semble peu pertinent de multiplier les exemples auprès des élèves. Les commentaires du programme signalent les expériences d'Arago (1810), Alväger (1964), Hall et Brillet (1979) ainsi que l'observation des étoiles doubles :

- Arago, s'appuyant sur une théorie corpusculaire de la lumière, pense pouvoir mettre en évidence la vitesse de la lumière des étoiles par rapport à la Terre en étudiant sa réfraction par un prisme. En effet, il admet que la déviation de la lumière, qui dépend de sa vitesse dans les milieux traversés, doit être influencée par sa vitesse initiale, à l'entrée du prisme.
- L'expérience de Hall et Brillet consiste à détecter d'éventuelles variations de la fréquence de résonance d'une cavité Fabry-Perot en fonction de son orientation. Les deux autres expériences citées concernent l'indépendance du mouvement de la source sur la célérité de la lumière. À noter que cette indépendance est inhérente aux phénomènes ondulatoires, ce n'est pas une particularité de la lumière.
- L'observation des étoiles doubles devraient faire apparaître des irrégularités de trajectoires si la lumière de l'étoile, entraînée par sa source, se propageait plus vite lorsque celle-ci se rapproche de la Terre que lorsqu'elle s'en éloigne.
- L'expérience d'Alväger consiste à mesurer la vitesse des rayons γ produits par la désintégration de pions neutres se déplaçant à des vitesses proches de c .

Réponses

1. Analyser les documents

a. L'expérience de Michelson et Morley devait permettre de mesurer l'influence du mouvement de la Terre sur la vitesse de propagation de la lumière, mesurée dans le référentiel Terrestre.

Remarque pour le professeur : les expériences de Michelson et Morley n'étaient pas destinées à vérifier que la vitesse de la lumière est invariante mais bien à mesurer l'influence du déplacement de la Terre par rapport à l'éther dont l'existence n'était pas mise en cause à l'époque. Toutefois, nous n'avons évoqué à aucun moment la théorie de l'éther très intéressante du point de vue historique mais qui pourrait brouiller encore plus la réflexion de nos élèves déjà mise à rude épreuve par cette partie du programme.

b. Remarque : les valeurs de D , de l'ordre de celle qui est donnée dans l'énoncé, étaient obtenues en faisant effectuer par réflexion plusieurs allers et retours aux rayons avant leur interférence.

La relation de départ est :

$$\tau = \frac{Dv^2}{c^3}$$
$$\dim \tau = \frac{\dim(Dv^2)}{\dim(c)^3} = \frac{\dim D \times (\dim v)^2}{(\dim c)^3}$$

Comme v et c ont la même dimension, celle d'une vitesse soit LT^{-1} , on peut écrire :

$$\dim \tau = \frac{L}{LT^{-1}} = T$$

Différence de durées de parcours : $\Delta t = 3,3 \times 10^{-16}$ s.

Période de la radiation $T = \frac{\lambda}{c} = 1,7 \times 10^{-15}$ s ; $\Delta t = 0,20T$.

Un tel décalage temporel n'est pas directement mesurable. Par contre, il entraîne un décalage du système de franges de 1/5 interfrange, ce qui est facilement mesurable.

2. Conclure

a. La vitesse de la lumière mesurée sur la Terre ne dépend pas du mouvement de celle-ci.

b. Le vaisseau constitue un référentiel galiléen. Son mouvement ne devrait pas avoir d'influence sur la vitesse de la lumière : le signal se propage à la vitesse c pour le vaisseau.

Activité documentaire 2. À chacun son temps

Commentaires

Cette activité présente une démonstration devenue classique de la relation entre les temps mesurés dans deux référentiels, le référentiel propre et un référentiel en mouvement rectiligne uniforme par rapport au précédent.

On peut compléter l'activité en abordant deux autres problèmes :

- En imaginant un deuxième miroir placé au niveau de A , le dispositif constitue l'oscillateur d'une « horloge de lumière ». Sur le quai de la gare, un observateur pourrait comparer la durée d'une oscillation de cette horloge avec celle d'une horloge parfaitement identique immobile par rapport au quai. Comme il mesure une durée plus longue pour la période de l'horloge du train, il en conclura que celle-ci va retarder par rapport à celle du quai, comme si son mécanisme était ralenti.
- Si on se place du point de vue d'un observateur immobile dans le wagon, c'est la gare qui se déplace à la vitesse v et les conclusions sont identiques. Il y a réciprocity de la dilatation des durées.

Réponses

1. Analyser les documents

a. Dans le référentiel de la gare, le miroir et les récepteurs se déplacent à la vitesse v . Lorsque l'éclair atteint le miroir, celui-ci a parcouru la distance $v \times \frac{\Delta t}{2}$. Le récepteur parcourt encore la distance $v \times \frac{\Delta t}{2}$ pendant que l'éclair se propage du miroir au récepteur.

b. Dans le référentiel de la gare, le trajet de l'éclair est plus grand que dans le référentiel du wagon. Or il est parcouru à la même vitesse c . Donc la durée du parcours mesuré par l'horloge de la gare est plus grande.

2. Exploiter les documents

a. $h = \frac{c\Delta t_{\text{wagon}}}{2}$.

b. $AA' = v \times \Delta t_{\text{gare}}$; $AM = A'M = c \times \frac{\Delta t_{\text{gare}}}{2}$.

En appliquant le théorème de Pythagore : $AM = A'M = \sqrt{h^2 + \left(\frac{AA'}{2}\right)^2}$.

c. En remplaçant AM , h et AA' par leurs expressions trouvées en **a.** et **b.** :

$$c \times \frac{\Delta t_{\text{gare}}}{2} = \sqrt{\left(c \times \frac{\Delta t_{\text{wagon}}}{2}\right)^2 + \left(v \times \frac{\Delta t_{\text{gare}}}{2}\right)^2}$$

d'où :

$$c^2 \Delta t_{\text{gare}}^2 = (c \Delta t_{\text{wagon}})^2 + (v \Delta t_{\text{gare}})^2$$

$$\Delta t_{\text{gare}}^2 (c^2 - v^2) = \Delta t_{\text{wagon}}^2 c^2 ;$$

$$\Delta t_{\text{gare}}^2 = \frac{\Delta t_{\text{wagon}}^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} ; \text{ d'où le résultat annoncé.}$$

3. Conclure

Pour un observateur immobile sur le quai de la gare, le wagon et le dispositif émetteur-récepteur sont en mouvement. Pour le phénomène constitué par l'aller-retour de l'éclair, cet observateur mesure une durée plus grande que s'il était dans le wagon. Il constate donc une dilatation de la durée du phénomène qui se produit dans le wagon en mouvement.

Contrairement à la notion classique du temps, le résultat de la durée d'un phénomène dépend du référentiel dans lequel s'effectue cette mesure. Le temps a donc un caractère relatif vis-à-vis du référentiel de mesure.

Activité documentaire 3. Relativité du temps à l'épreuve de l'expérience

Commentaires

On étudie ici l'expérience classique des muons cosmiques qui fut la première confirmation expérimentale de la théorie d'Einstein.

Réponses

1. Analyser les documents

- Les résultats expérimentaux sont donnés ici avec leur incertitude.
- Les durées, concernant les phénomènes liés à un muon, mesurées par un expérimentateur (dans le référentiel terrestre) sont plus grandes que les mêmes durées mesurées dans le référentiel lié à la particule.

2. Interpréter les documents

a. La durée du trajet dans le référentiel terrestre est à peu près 4 fois supérieure à la durée de demi-vie propre de la particule. Sachant que le nombre de particules restantes est divisé par deux chaque fois qu'il s'écoule une durée de demi-vie, on obtient le résultat indiqué.

Si l'on ne tient pas compte de la dilatation des durées, on attend une trentaine de particules alors que l'on en détecte en fait environ 410 soit 14 fois plus.

b. La durée Δt_p du parcours dans le référentiel de la particule est liée à la durée mesurée par :

$$\Delta t_p = \Delta t_m \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

soit :

$$\Delta t_p = 6,40 \times \sqrt{1 - \frac{0,995^2}{c^2}} = 0,64 \mu\text{s}$$

c. Les domaines d'incertitude de la valeur mesurée, 408 ± 9 , et de la valeur calculée, 421 ± 8 , ont une intersection commune, ce qui veut dire qu'à la précision des mesures les résultats théorique et expérimental sont en accord.

3. Conclure

Les muons atmosphériques ont, selon la conception classique d'un temps universel, une durée de demi-vie telle que la plupart de ces particules devraient être désintégrées avant d'arriver au niveau de la mer. La relativité donne une explication cohérente : la durée du déplacement d'un muon dans le référentiel de la particule est plus petite que la durée mesurée dans le référentiel terrestre ; cette durée est assez courte pour qu'une faible partie des particules se désintègrent pendant le parcours. Le résultat de l'expérience est donc compatible avec la théorie de la dilatation des durées.

Activité documentaire 4. Importance des effets relativistes

Commentaires

On se propose ici de trouver les critères permettant de distinguer les situations où la relativité du temps doit être prise en compte.

Réponses

1. Analyser le document

On a voulu faire apparaître l'écart très faible entre Δ_m et Δ_p . Si l'on avait utilisé une écriture décimale, il faudrait écrire ces valeurs avec un nombre de chiffres significatifs déraisonnable.

2. Interpréter les informations

a.

	$\frac{\Delta t_m - \Delta t_p}{\Delta t_m}$ (en %)
Marcheur	$5,6 \times 10^{-16}$
TGV	$3,3 \times 10^{-12}$
Avion de ligne	$3,5 \times 10^{-11}$
Satellite système GPS	$8,9 \times 10^{-9}$
Sonde solaire Helios 2	$2,7 \times 10^{-6}$
Particule α	$5,6 \times 10^{-6}$
Électron dans un microscope électronique	13
Proton dans l'accélérateur LHC (Europe)	100

b. La précision de la montre à quartz est insuffisante pour mesurer l'écart relativiste jusqu'aux vitesses concernant les engins les plus rapides construits par l'homme.

La précision est juste suffisante pour mettre en évidence un écart dans le cas de la particule α . L'écart est important, voire inacceptable, pour les deux derniers cas si l'on ne tient pas compte de la relativité du temps.

L'horloge atomique concernée ne permettrait pas de mesurer l'effet relativiste pour un TGV mais serait suffisamment précise pour le mesurer à la vitesse d'un avion de ligne et pour les engins ou particules plus rapides.

c. Pour chaque seconde écoulée sur l'horloge terrestre on accumule une différence de $8,9 \times 10^{-11}$ s, ce qui, au bout d'une heure de fonctionnement aboutit à un écart de $8,9 \times 10^{-11} \times 3600 = 3,2 \times 10^{-7}$ s.

Cet écart correspond à une distance de $3,2 \times 10^{-7} \times 3 \times 10^8 = 96$ m.

Ce n'est pas acceptable par un utilisateur.

3. Conclusion

L'importance de l'effet relativiste augmente avec la vitesse. La vitesse est un premier critère à prendre en compte.

Mais, comme dans toute mesure physique, il faut aussi prendre en compte la précision de l'appareil de mesure.

Remarque pour le professeur : en physique des particules, on utilise plutôt des critères énergétiques en comparant les énergies avec l'énergie au repos.

Exercices d'application

5 minutes chrono !

1. Mots manquants

- référentiels galiléens
- nulle ; photon
- référentiel
- propre

2. QCM

- Égale à c .
 - Les mêmes lois de l'électromagnétisme sont respectées. Les lois de la physique sont les mêmes dans tous les référentiels galiléens. Ceci ne signifie pas que les mouvements sont décrits de façons identiques.
 - Prend du retard.
 - Grande devant τ . Il y a en effet dilatation des durées pour la particule en mouvement.
 - Supérieure ou égale à sa durée propre. L'égalité est obtenue pour un référentiel immobile par rapport au référentiel de mesure.
 - Est vérifiable et peut avoir des conséquences pratiques. C'est un effet faible mais mesurable avec des horloges atomiques. Le GPS est un exemple où les effets relativistes ont des conséquences pratiques.
-

Compétences exigibles

3. La célérité de la lumière dans le vide est indépendante du mouvement de la source. Le résultat sera c (si la mesure est faite dans le vide), quelle que soit la vitesse de l'étoile.

4. D'après les postulats d'Einstein, on ne peut pas concevoir d'expérience entièrement réalisée dans un référentiel galiléen permettant de savoir si celui-ci est en mouvement par rapport à un autre référentiel galiléen.

On pourra rappeler que ceci résulte du postulat d'Einstein selon lequel les lois de la physique s'expriment de la même façon dans tous les référentiels galiléens.

5. Une durée propre concernant une particule est une durée mesurée dans un référentiel dans lequel cette particule est immobile.

6. La relativité du temps n'intervient que si on compare plusieurs référentiels. Si le vaisseau constitue un référentiel galiléen, pour le cosmonaute il n'y a aucun changement dans les phénomènes observés par rapport à ce qui se produirait sur Terre dans les mêmes conditions. Il faudrait la même durée de cuisson, mesurée sur sa montre.

7. Dans le référentiel R , seul C est en mouvement. Les horloges de A et de B donneront des indications identiques tandis que l'horloge de C sera en retard.

Correction effectuée dans le manuel de l'élève page C-11 : la fusée C est déplacée vers la droite, au même niveau que la fusée B , pour montrer que dans la deuxième situation la fusée C est à proximité de la fusée B .

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 12. Relativité du temps

8. La durée propre est $1,2 \times 10^{-8}$ s.

La durée propre d'un phénomène est la valeur minimum des durées mesurées car le coefficient de dilatation des durées (γ) est toujours supérieur à 1, ou égal à 1 si la particule est immobile.

9. La durée mesurée est nécessairement supérieure à la durée propre. La seule valeur possible est $2,6 \times 10^{-7}$ s.

10. a. La durée de vie mesurée est $\tau_m = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}}$, où τ désigne la durée de vie de la particule

dans son référentiel propre : $\tau_m = 6,6 \times 10^{-8}$ s.

b. Dans son référentiel propre, sa durée de vie est $\tau = \tau_m \times \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}} = 9,0 \times 10^{-11}$ s.

Cette dernière formule été corrigée dans le manuel de l'élève page C·11 : la racine carrée qui est au dénominateur dans le spécimen est remise à sa place au numérateur, à la place de la lettre τ .

11. Citer l'expérience des muons cosmiques (voir activité 3).

12. La synchronisation des horloges terrestres et embarquées sur les satellites des systèmes GPS prend en compte la relativité du temps.

Compétences générales

13. a. Incertitude : cet écart n'est pas prévisible ; on peut diminuer cette incertitude en faisant une moyenne avec plusieurs appareils identiques mais on ne peut pas l'éliminer.

b. Erreur : on peut calculer l'écart et on peut l'éliminer. On peut ajouter que, au cours du temps, les écarts sont cumulatifs car ils sont toujours dans le même sens, contrairement aux incertitudes.

14. Les particules des rayons cosmiques se déplacent à une vitesse si proche de celle de la lumière qu'elles peuvent traverser la galaxie avec une *durée propre* de quelques minutes seulement alors que, dans le référentiel terrestre, la *durée mesurée* de ce même trajet serait de plusieurs centaines de milliers d'années.

15. a. $\gamma_0 = 1$

b. L'erreur relative est de 10 % lorsque $\gamma = 1,1$.

On lit $\frac{v}{c} = 0,4$ sur la courbe (le calcul avec l'expression de γ donne 0,417 et confirme cette lecture).

16. On doit avoir $\gamma = 2$;

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma$$

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{1}{\gamma}$$

$$1 - \frac{v^2}{c^2} = \frac{1}{\gamma^2}$$

$$\frac{v^2}{c^2} = 1 - \frac{1}{\gamma^2}$$

$$\frac{v}{c} = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} = \sqrt{1 - \frac{1}{4}} = 0,866$$

17. a. On doit remplacer v_{2x} par $\pm c$.

Cas $v_{2x} = c$:

$$v_x = \frac{c - v_{1x}}{1 - \frac{v_{1x}c}{c^2}} = c \frac{c - v_{1x}}{c - v_{1x}} = c$$

Si $v_{2x} = -c$, un calcul identique aboutit à $v_x = -c$.

b. On retrouve l'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide car, quelle que soit v_{1x} par rapport à M_1 , l'éclair se propage avec la vitesse c .

Exercices de méthode

18. Exercice résolu.

19. 1. a. Les calculatrices usuelles donnent γ strictement égal à 1.

b. Ce résultat ne permet pas de rendre compte de l'influence de v parce que le nombre de chiffres affichés est trop petit.

c. En calculant $\gamma - 1$ comme indiqués dans les conseils, on obtient $\gamma - 1 = 5,6 \times 10^{-12}$.

On peut alors donner le résultat sous la forme $\gamma = 1 + 5,6 \times 10^{-12}$.

2. On pose $\varepsilon = \frac{-v^2}{c^2}$. On a : $\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \approx 1 + \frac{v^2}{2c^2}$.

On peut alors, sans problème, faire le calcul numérique qui donne le même résultat que précédemment.

20. a. D'après les postulats de la relativité restreinte, la célérité de la lumière dans le vide est invariante dans tous les référentiels galiléens.

Le vaisseau constitue un référentiel galiléen puis qu'il se déplace en mouvement de translation rectiligne uniforme par rapport à un référentiel lui-même galiléen. Donc, dans ce référentiel, la célérité de la lumière dans le vide est c .

b. Dans le référentiel du vaisseau, l'éclair doit parcourir à la vitesse c les mêmes distances pour atteindre D_1 ou D_2 . Les durées de propagation sont donc égales dans ce référentiel.

c. D'après le postulat énoncé à la question a., l'éclair se propage aussi à la vitesse c dans le référentiel géocentrique.

d. On raisonne maintenant dans le référentiel géocentrique. Soit S_0 le point où se trouve la source à l'instant de l'émission de l'éclair (bien noter que ce point est un point fixe dans le référentiel d'étude). Pendant la propagation de l'éclair, D_2 s'éloigne de S_0 et D_1 s'en rapproche. L'éclair doit parcourir une distance plus petite pour atteindre D_1 . Comme l'éclair se propage dans les deux sens avec la même vitesse c , la durée du trajet de S_0 à D_1 est plus courte que celle du trajet de S_0 à D_2 .

e. Dans le référentiel du vaisseau, l'éclair atteint simultanément les deux récepteurs tandis que, dans le référentiel géocentrique, les deux réceptions ne sont pas simultanées. Or, il s'agit du même phénomène analysé dans deux référentiels différents.

La simultanéité dépend donc du référentiel d'étude alors que selon notre conception usuelle du temps, si deux évènements sont simultanés, ceci est vrai pour tout observateur.

On pourra insister sur le fait que le résultat est une conséquence de l'invariance de la vitesse de la lumière. On peut signaler que, dans une situation analogue où on étudierait par exemple un signal sonore, les vitesses de cette onde seraient différentes dans les deux référentiels. En raisonnant avec les lois classiques de composition des vitesses, on aboutirait à la conclusion que la simultanéité des évènements ne dépend pas du référentiel.

Exercices d'entraînement

21. La dilatation des durées ne concerne qu'un phénomène analysé dans des référentiels différents. Aucune modification de l'écoulement du temps ne peut être ressentie dans un référentiel donné. L'argument du cosmonaute est faux.

22. a. La distance parcourue est $L = v\tau$. L'erreur relative commise est :

$$\frac{c\tau - v\tau}{v\tau} = \frac{c - v}{v} = \frac{c}{v} - 1 = \frac{1}{0,99995} - 1 = 5 \times 10^{-5} \text{ soit } 5 \times 10^{-3} \%$$

b. Si on fait la même approximation, on aboutit à un résultat aberrant car on trouve un coefficient γ infini.

23. a. L'hypothèse n'est pas scientifique dans le sens où aucun objet de masse non nulle ne peut atteindre la vitesse de la lumière (dans le vide).

b. L'internaute raisonne selon les lois classiques du mouvement. Il pense que la vitesse de la lumière par rapport au vaisseau est nulle comme c'est le cas pour la vitesse relative de deux véhicules qui se suivent à même vitesse.

c. « On ne peut pas envisager en respectant les lois de la physique que tu voyages exactement à la vitesse de la lumière (dans le vide). Mais tu peux imaginer que tu voyages *presque* à cette vitesse. D'après les postulats de la relativité, la vitesse de la lumière sera toujours égale à c par rapport à toi, quelque soit ta vitesse par rapport à la Terre. Tu pourras donc éclairer ton tableau de bord comme si ton vaisseau était immobile. »

Remarque : on pourrait objecter que, dans le vaisseau, la lumière ne se propagerait pas dans le vide mais se propagerait dans l'atmosphère de la cabine. Les lois de la physique n'interdisent pas que la vitesse du vaisseau soit supérieure à la vitesse de propagation de la lumière dans ce milieu gazeux. Mais ceci ne changerait pas le résultat : rien de ce qui se passe dans le référentiel du vaisseau n'est affecté par sa vitesse d'après le principe de relativité.

24. a. Les vitesses s'ajoutent ; par rapport à la voiture, le son se propage à la vitesse :

$$v + \frac{v}{4} \text{ soit } \frac{5}{4}v$$

b. La vitesse de la lumière par rapport à la fusée est c .

25. a. Dans le référentiel lié à S , les horloges des deux fusées retardent, avec un décalage identique puisqu'elles ont la même vitesse.

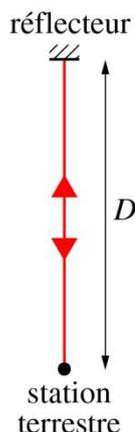
b. Les lois classiques de composition des vitesses ne s'appliquent pas mais on peut tout de même affirmer que F_2 s'éloigne de F_1 plus vite que S .

Dans le référentiel lié à F_1 , les horloges transportées par S et F_2 retardent mais le retard est plus grand pour F_2 .

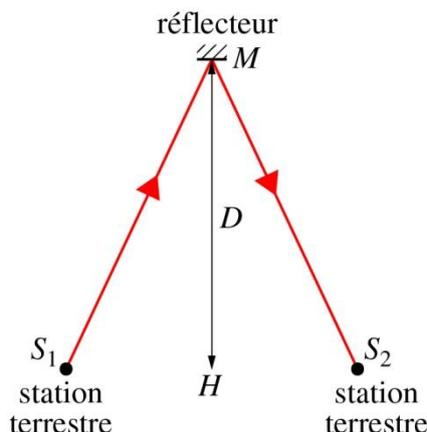
Remarque : dans un cas comme celui-ci, la contradiction entre les résultats de la physique classique et ceux de la physique relativiste est flagrante. Il faut bien insister sur le fait que les « observations » sont valables chacune uniquement dans un référentiel donné. D'autre part, les mots « observateur » ou « observation » laissent imaginer que l'on peut « voir » les horloges et leurs indications. Il faut bien comprendre que les observations dont il est question sont nécessairement (même dans des expériences de pensées) les résultats de mesures effectuées à partir d'informations transmises (à vitesses finies).

26. a.

Trajet du faisceau dans R



Trajet du faisceau dans R'



b. $\Delta t = 2 \frac{D}{c}$.

c. Le vaisseau, en mouvement rectiligne uniforme par rapport au référentiel galiléen Terre-Lune, est lui-même un référentiel galiléen. D'après le principe de l'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide, la vitesse de l'impulsion dans R' est aussi c .

d. D'après le schéma de la question a., le trajet de l'impulsion lumineuse est plus long dans le référentiel R' . Or sa vitesse de propagation est la même dans les deux cas donc la durée de propagation est plus grande dans R' .

e. Distance parcourue par la station terrestre dans le référentiel du vaisseau : $S_1S_2 = v \times \Delta t'$.

Longueur du trajet du faisceau dans R entre la Terre et la Lune : $D = c \frac{\Delta t}{2}$.

Longueur du trajet du faisceau dans R' entre la Terre et la Lune : $S_1M = S_2M = c \frac{\Delta t'}{2}$.

f. En appliquant le théorème de Pythagore dans le triangle S_1MH :

$$S_1M^2 = D^2 + S_1H^2 ; \text{ soit } \left(c \frac{\Delta t'}{2} \right)^2 = \left(c \frac{\Delta t}{2} \right)^2 + \left(v \frac{\Delta t'}{2} \right)^2 \text{ d'où } \Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

27. a. Par lecture graphique, on trouve environ respectivement $1,5 \times 10^2$ MeV et $8,5 \times 10^2$ MeV ; soit une variation d'énergie presque 6 fois plus grande dans le deuxième cas pour une augmentation de vitesse 100 fois plus faible.

b. La différence de vitesse est extrêmement faible mais elle correspond à une grande différence d'énergie (elle est 7 fois plus grande).

c. À l'approche de la vitesse de la lumière, les vitesses des particules diffèrent peu les unes des autres mais les différences d'énergie sont importantes.

28. a.
$$T = \frac{T_P}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

b. $L_1 = c\tau_1$ et $L_2 = c\tau_2$.

c. $T_{app} = (\tau_2 + T) - \tau_1$: à la durée du parcours du deuxième signal, il faut ajouter son retard d'une période par rapport au premier. Ne pas oublier que toutes les durées intervenant ici doivent être celles mesurées dans le même référentiel R .

d. $L_2 - L_1 = c(\tau_2 - \tau_1) = c(T_{app} - T)$.

e. La variation $L_2 - L_1$ est la distance parcourue dans R par le pulsar pendant T :

$$L_2 - L_1 = vT$$

f. D'après d. et e. : $c(T_{app} - T) = vT$ et en remplaçant T par l'expression donnée en a. :

$$c \left(T_{app} - \frac{T_P}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) = v \frac{T_P}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$cT_{app} = v \frac{T_P}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + c \frac{T_P}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$T_{app} = T_P \frac{\frac{v}{c} + 1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

On réarrange en faisant apparaître au numérateur : $\sqrt{1 + \frac{v}{c}}$ et en développant le

dénominateur : $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \left(\sqrt{1 + \frac{v}{c}}\right) \left(\sqrt{1 - \frac{v}{c}}\right)$;

$$T_{app} = T_P \frac{\left(\sqrt{1 + \frac{v}{c}}\right) \left(\sqrt{1 + \frac{v}{c}}\right)}{\left(\sqrt{1 + \frac{v}{c}}\right) \left(\sqrt{1 - \frac{v}{c}}\right)}$$

$$T_{app} = T_P \frac{\sqrt{1 + \frac{v}{c}}}{\sqrt{1 - \frac{v}{c}}}$$

g. Il s'agit de l'effet Doppler.

29. a. La durée cherchée est la durée de demi-vie mais mesurée dans le référentiel du laboratoire soit :

$$t_{1/2 \text{ mes}} = t_{1/2} \times \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1,80 \times 10^{-8}}{\sqrt{1 - 0,9995^2}} = 5,69 \times 10^{-7} \text{ s}$$

La distance parcourue dans ce référentiel est :

$$D = v \times t_{1/2 \text{ mes}} = 0,9995 \times 3,0 \times 10^8 \times 5,69 \times 10^{-7} = 171 \text{ m.}$$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 12. Relativité du temps

b. Si on ne tenait pas compte de la dilatation du temps on annoncerait que la durée nécessaire est $t_{1/2} = 18 \times 10^{-8}$ s et $D = v \times t_{1/2} = 0,9995 \times 3,0 \times 10^8 \times 1,8 \times 10^{-8} = 5,40$ m.

c. Durée du parcours dans le référentiel du laboratoire :

$$\Delta t = \frac{L}{v} = \frac{100}{0,9995 \times 3,0 \times 10^8} = 3,34 \times 10^{-7} \text{ s}$$

Dans le référentiel lié au méson : $\Delta t_p = \frac{\Delta t}{\gamma} = \Delta t \times \sqrt{1 - 0,9995^2} = 1,06 \times 10^{-8}$ s.

d. $\frac{N}{N_0} = e^{\left(\frac{-1,06 \times 10^{-8} \times 0,693}{1,80 \times 10^{-8}} \right)} = 0,665.$

Remarque : peu importe que l'on utilise ici les durées propres ou les durées mesurées, pourvu que les deux durées correspondent au même référentiel.

e. Si on ne tenait pas compte de la dilatation des durées, on mesurerait une durée de parcours de $3,34 \times 10^{-7}$ s et on ne modifierait pas la valeur de la durée de demi-vie :

$$\frac{N}{N_0} = e^{\left(\frac{-3,34 \times 10^{-7} \times 0,693}{1,80 \times 10^{-8}} \right)} = 2,60 \times 10^{-6},$$
 ce qui voudrait dire en pratique que les particules

n'atteindraient pas la cible ; alors qu'en fait, plus de la moitié des particules y parviendraient.

Remarque : de tels résultats, vérifiés par l'expérience, sont des confirmations de la validité de la théorie de la relativité du temps.

Exercices de synthèse

30. *Il faudra préciser aux élèves que 1 a.l. = 9,46 × 10¹⁵.*

a. Pour un occupant de la Terre, la durée du voyage est :

$$\Delta t_m = \frac{D}{v}$$

b. Pour les occupants du vaisseau, la durée du voyage est sa durée propre :

$$\Delta t_p = \Delta t_m \times \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$\text{c. } \Delta t_p = \frac{D}{v} \times \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$\text{d. } \Delta t_p^2 = \frac{D^2}{v^2} \times \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)$$

$$v^2 \times \Delta t_p^2 = D^2 \times \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)$$

$$v^2 \left(\Delta t_p^2 + \frac{D^2}{c^2} \right) = D^2$$

$$v = \frac{D}{\sqrt{\Delta t_p^2 + \frac{D^2}{c^2}}}$$

Avec $D = 4,5 \times 9,46 \times 10^{15}$ mètres ; $\Delta t_p = 10 \times 365 \times 24 \times 3600$ secondes, on obtient :

$$v = 1,2 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

31. 1. a. La phrase fait référence à la dilatation des durées pour un objet en mouvement.

b. La dilatation des durées concerne la mesure des durées dans deux référentiels. Dans le référentiel propre du voyageur, il n'y a pas de changement perçu concernant l'écoulement du temps.

c. On peut raisonner du point de vue du voyageur, en choisissant son référentiel comme étant immobile et le référentiel terrestre en mouvement.

d. La relativité restreinte ne concerne que les référentiels galiléens.

e. Le vaisseau doit accélérer au départ et ralentir à l'arrivée et il faut aussi qu'il fasse demi-tour donc à nouveau un mouvement non uniforme (et/ou non rectiligne). Le référentiel du vaisseau n'a donc pas un mouvement rectiligne uniforme par rapport au référentiel terrestre supposé galiléen.

Le jumeau sédentaire est dans un référentiel galiléen et le voyageur dans un référentiel non galiléen. Le jumeau voyageur ressent les accélérations par rapport au référentiel terrestre alors que le jumeau sédentaire ne ressent pas les accélérations par rapport au vaisseau. Les situations ne sont pas symétriques.

f. La réciprocité des situations ne s'appliquant pas, il n'y a pas de contradiction dans le fait de trouver que les deux jumeaux ne se retrouvent pas au même stade de vieillissement.

Remarque : c'est l'application incorrecte de la réciprocité à la situation qui conduit à ce que l'on appelle « le paradoxe des jumeaux » de Langevin.

2. a. Il n'y a pas de relation de cause à effet : le cas est envisageable.

b. Cette situation est impossible puisque l'éruption est la cause de l'arrivée des particules.

32. Rédiger une synthèse de documents

Les parties du texte surlignées indiquent les notions qui doivent apparaître dans la rédaction du compte rendu.

Le compte rendu devra montrer que l'on sait qu'aucune particule ne peut dépasser la vitesse de la lumière (dans le vide) selon le postulat sur lequel s'appuie la théorie de la relativité restreinte. C'est cette impossibilité qui semble avoir été remise en cause selon la mesure effectuée dans cette expérience.

En faveur d'une erreur de mesure, il faudra faire apparaître la très faible différence mesurée entre la vitesse des neutrinos et la limite théorique (0,002 %). On devra relever :

- la haute sensibilité de la mesure aux retards introduits par l'électronique de la chaîne de mesure ;
- l'influence de plusieurs facteurs sur la distance à mesurer dont les effets de marées ou la dérive des continents (citer obligatoirement un exemple au moins) ;
- l'influence de plusieurs facteurs sur la mesure du temps : rotation de la Terre, gravitation terrestre (citer obligatoirement un exemple) ;
- il est important d'évoquer l'observation de neutrinos cosmiques qui aurait dû faire apparaître un écart de plusieurs années entre l'arrivée des neutrinos et celle du flash lumineux associé pour être compatible avec l'écart mesuré dans l'expérience du Cern. On fera apparaître aussi, dans le compte rendu, que cette critique a ses limites car on ne compare pas des neutrinos ayant des énergies de même ordre de grandeur ;
- la théorie de la relativité restreinte est vérifiée avec une précision considérable ce qui rend suspecte une expérience qui la remettrait en cause.

En défaveur d'une erreur de mesure :

- l'écart mesuré est compatible avec la précision des instruments disponibles et toutes les sources d'erreurs ont semblé-t-il été envisagées ;
- on ne connaît pas complètement la physique du neutrino et l'écart pourrait venir d'un comportement ignoré de cette particule et non pas d'une violation du postulat de l'impossibilité de dépassement de la vitesse de la lumière.

La présentation de pistes sur les conséquences d'une confirmation du résultat peut rester à un niveau modeste faute de développements d'ordre philosophique.

On attend essentiellement que l'élève comprenne que cette confirmation remettrait en cause la théorie de la relativité et ouvrirait la voie pour de nouvelles recherches théoriques. Le professeur pourra insister à cette occasion sur le fait que la science évolue par remises en cause permanentes de certitudes acquises sans pour autant que les théories précédentes soient abandonnées.

Quant aux conséquences pratiques, on appréciera que l'élève interprète correctement la conclusion du document en expliquant que les recherches les plus éloignées des préoccupations du quotidien finissent par déboucher, à plus ou moins long terme sur des applications pratiques, sans qu'on puisse prévoir lesquelles.

Chapitre 13 – Temps et évolution chimique. Cinétique et catalyse

Manuel pages 259 à 280

Choix pédagogiques

Cet unique chapitre portant sur la cinétique a été construit de manière à mettre l'accent sur le suivi temporel d'une transformation chimique, la définition et la mesure de sa durée, ainsi que les moyens disponibles pour la modifier (facteurs cinétiques et catalyseur). La notion de vitesse de réaction, qui ne figure plus au programme, n'est pas introduite.

La définition de la durée de la transformation proposée dans ce chapitre est celle de l'IUPAC. Son côté arbitraire est mis en évidence. Le choix d'un critère est souvent lié aux moyens mis en œuvre pour suivre la transformation. Plusieurs exemples de méthodes de suivi sont évoqués dans les activités, le cours et les exercices (spectrophotométrie, CCM, mesure de pression, observation de l'opacification d'une solution...). La notion de temps de demi-réaction est également introduite, comme une définition particulière de durée de transformation.

La possibilité de modifier la durée de la transformation en jouant sur la température, les concentrations en réactif ainsi que le solvant est évoquée, en remarquant que la modification des concentrations initiales en réactif limitant peut avoir des effets différents d'une transformation à l'autre. Enfin, les différents types de catalyse sont introduits et comparés en insistant sur leur importance dans le milieu industriel et dans la chimie du vivant. L'effet du pH sur l'efficacité d'un catalyseur enzymatique est étudié dans le chapitre 17.

Notons que le programme officiel utilise l'expression « durée de réaction » alors qu'on utiliserait plus volontiers le terme « durée de transformation », ces deux expressions sont utilisées dans le cours pour se conformer aux différents usages.

Des animations, des vidéos documentaires et d'expériences illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et, certaines d'entre elles, sur les sites Internet compagnon Sirius.

Page d'ouverture

Cristaux de zéolithe vus au microscope électronique

Les cristaux de zéolithe synthétique (alumino-silicates microporeuses) sont utilisés pour le craquage du pétrole : dégradation de gros hydrocarbures en molécules plus petites, qui sont ensuite séparées par distillation. Il s'agit d'un exemple d'utilisation industrielle de la catalyse hétérogène étudiée dans ce chapitre où l'état de surface du catalyseur a une importance cruciale. L'exemple choisi peut être utilisé pour montrer que la catalyse hétérogène est un exemple de nanotechnologie. La photographie montre la croissance de cristaux de zéolites sur la surface d'une céramique en alumine, son grossissement est $\times 5\,000$, la largeur de l'image est de $22,8\ \mu\text{m}$. La taille des pores peut atteindre de 4 à 50 nm, ils sont bien sûr invisibles sur la photographie.

Activités

Activité expérimentale 1. Estimer la durée d'une réaction chimique

Commentaires

Cette activité permet de suivre par CCM l'évolution d'une transformation chimique, l'oxydation de l'alcool benzylique en benzaldéhyde.

On peut faire remarquer aux élèves la transformation d'une fonction alcool en fonction aldéhyde. L'oxydant est l'ion hypochlorite dissous en phase aqueuse alors que l'alcool benzylique est dissous dans de l'acétate d'éthyle. L'ajout d'un catalyseur de transfert de phase (le bromure de tétrabutylammonium) ainsi qu'une agitation vigoureuse sont nécessaires, mais il n'est pas utile d'évoquer le rôle de ce catalyseur avec les élèves. L'observation de la plaque sous lampe UV montre la disparition progressive de l'alcool benzylique (tache inférieure) et la formation du benzaldéhyde de plus grand rapport frontal. La réaction est suffisamment lente pour que son évolution soit bien visible, mais une trentaine de minute suffit à voir la disparition totale de la tache correspondant à l'alcool benzylique. Cette activité permet d'introduire la notion de définition arbitraire d'une durée de réaction : ici, par exemple, la durée au bout de laquelle la tache de l'alcool benzylique n'est plus visible.

Réponses

1. Observer

- a. Il est nécessaire d'attacher tout récipient siège d'une agitation pour éviter qu'il ne se renverse.
- b. La CCM met en évidence la présence d'une seule espèce à $t = 0$ (une seule tache) puis de deux aux temps 10 et 20 min (2 taches) et enfin d'une seule à $t = 30$ min (une seule tache).

2. Interpréter

- a. L'allure de la CCM aux temps 0, 10, 20 et 30 min n'est pas la même : une réaction se produit entre ces instants ; la transformation n'est donc pas instantanée.
- b. La tache inférieure (la seule présente à $t = 0$) correspond au réactif : l'alcool benzylique. La seconde (la seule présente à 30 min) est celle du produit : le benzaldéhyde.

3. Conclure

- a. On peut considérer que la réaction est terminée lorsque la tache de l'alcool benzylique n'est plus visible.
- b. Cet événement se produit entre les temps 20 et 30 min ; la durée peut être évaluée à $25 \text{ min} \pm 5 \text{ min}$.

Activité expérimentale 2. Mise en évidence de facteurs cinétiques

Commentaires

Cette activité proposée sous la forme d'une démarche d'investigation est destinée à la mise en évidence de facteurs cinétiques définis comme étant des paramètres pouvant modifier la durée d'une transformation. Elle permet également de discuter du choix d'un critère arbitraire pour définir une durée de réaction. La réaction étudiée est la dismutation en milieu acide des ions thiosulfates en soufre colloïdal et en dioxyde de soufre. La formation de particules de soufre conduit à l'opacification de la solution comme le montre le document 4. Les élèves sont amenés à tenir compte de cette propriété pour définir une durée de transformation. On peut par exemple choisir de réaliser la transformation dans un bécher placé sur une feuille de papier blanc sur laquelle on aura dessiné une croix et choisir comme durée de réaction « le temps au bout duquel la croix disparaît ».

Les élèves sont ensuite amenés à discuter des paramètres à leur disposition pour modifier la durée de la transformation. Le matériel disponible doit les conduire à proposer de modifier la température et les concentrations. Le professeur veillera à ce que les conditions expérimentales retenues ne fassent bien varier qu'un seul paramètre à la fois. Ce sera l'occasion d'évoquer la notion de plan d'expérience, qui pourra être approfondie dans l'exercice 12 de la double page « Exercices Méthode ».

Réponses

1. Débattre

a. Comme évoqué dans les commentaires, l'idée d'utiliser l'opacification de la solution doit émerger de la discussion. Pour que le critère ne soit pas équivoque, il faut utiliser une épaisseur de solution constante (même taille de bécher, même volume total de la solution).

b. Un exemple de protocole :

- Introduire dans un bécher (toujours de même taille) placé sur une croix dessinée sur un papier blanc :
 - n mL d'eau ;
 - p mL de la solution de thiosulfate de sodium ;
 - q mL de la solution d'acide chlorhydrique.
- Déclencher le chronomètre.
- Se placer au dessus du bécher et mesurer la durée nécessaire à la disparition de la croix.

2. Expérimenter pour conclure

a. Exemple de plan d'expérience (à répartir entre différents binômes) :

Expérience	n	p	q	Température
1	10	20	20	ambiante
2	0	30	20	ambiante
3	0	20	30	ambiante
4	10	20	20	0°C (solutions placées dans un bain de glace avant d'être mélangées)
5	10	20	20	60°C (solutions placées dans l'eau chaude avant d'être mélangées)

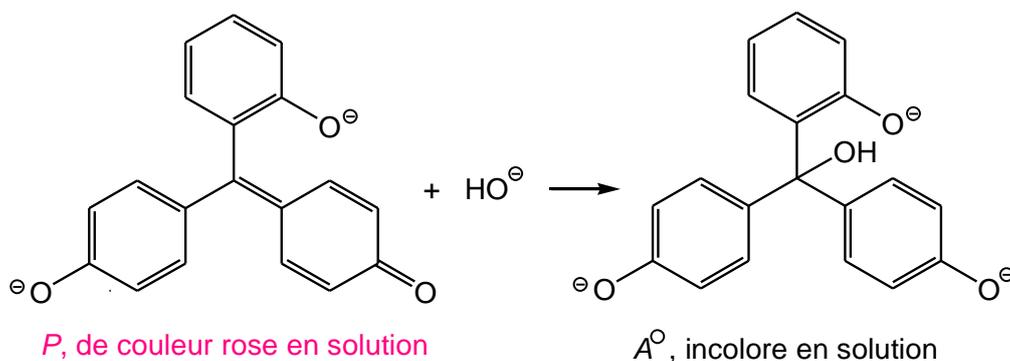
b. L'augmentation des concentrations en réactifs (ion thiosulfate et ion oxonium) et l'augmentation de la température diminue la durée de la transformation.

Activité expérimentale 3. Évolution temporelle d'une quantité de matière

Commentaires

Dans cette activité, il s'agit de suivre l'évolution temporelle d'une réaction par spectrophotométrie. La notion d'absorbance ainsi que la loi de Beer-Lambert sont les prérequis nécessaires de 1^{er} S.

La réaction étudiée est la suivante :

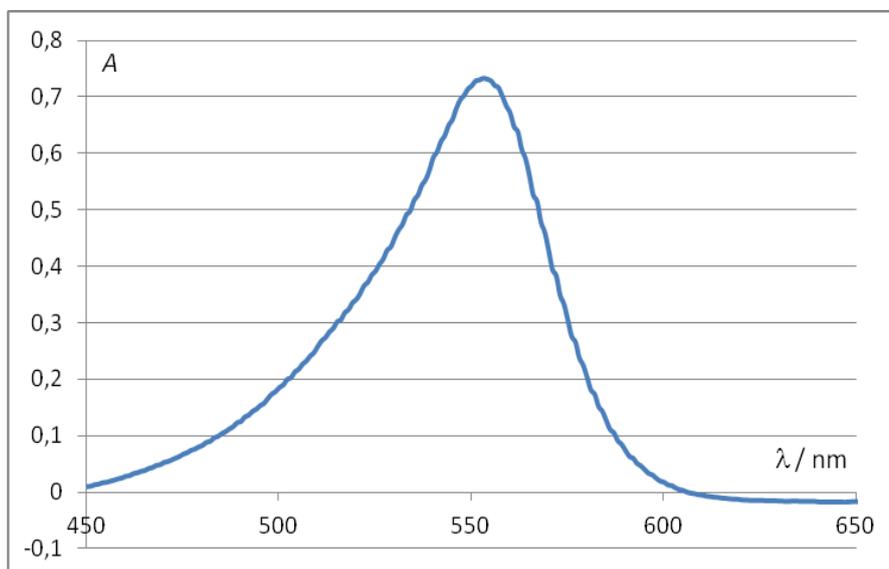


Elle est simplement notée $P + \text{HO}^- \rightarrow A^-$.

Les mesures de l'absorbance au cours du temps sont exploitées dans un tableur grapheur de manière à tracer la courbe représentant la quantité de *P* en fonction du temps.

L'activité permet l'introduction de la définition du temps de demi-réaction $t_{1/2}$ et permet d'étudier l'influence de la concentration initiale en ion hydroxyde sur la valeur de $t_{1/2}$.

Remarque : voici le spectre d'absorption de la phénolphthaléine en milieu légèrement basique.



Réponses

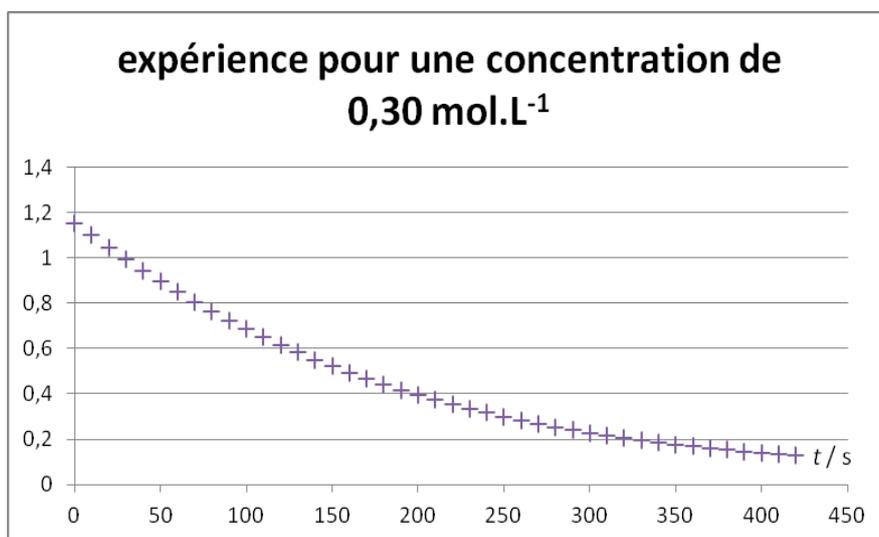
1. Observer

La couleur rose de la solution s'atténue au cours du temps. Au bout de 10 min environ, la solution est incolore.

2. Analyser

a. Le résultat d'une expérience est donné ici pour une concentration en ions hydroxyde de $0,30 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

Remarque : le volume d'une goutte n'étant pas le même d'un élève à l'autre, l'absorbance initiale ne sera pas la même pour tous les élèves. La réaction étant d'ordre 1 (en dégénérescence de l'ordre) cela n'a pas d'influence sur le temps de demi-réaction.

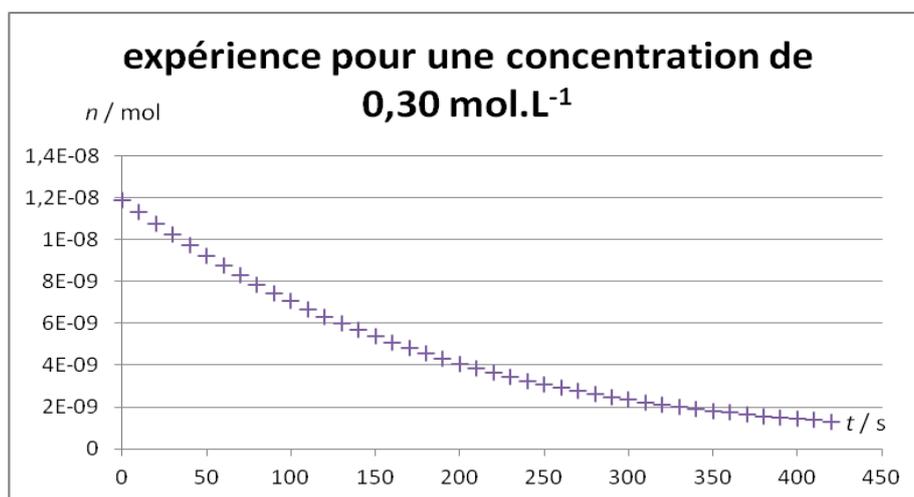


b. Dans le manuel élève a été corrigée la phrase : « largeur ℓ de la cuve » (au lieu de « longueur ℓ de la cuve »).

D'après la loi de Beer Lambert : $A_{553} = \epsilon_{553} \ell [P]$.

c. $[P] = \frac{n}{V}$ donc $n = [P] \times V = \frac{A_{553}}{\epsilon_{553} \ell} \times V$.

d. Numériquement, la relation précédente devient $n = (1,03 A_{553})$ mol. Le tracé de la quantité de matière en fonction du temps est donné ci-dessous.



e. À la date $t = 0$, on mesure $n = 1,2 \times 10^{-8}$ mol. Quand la moitié de la phénolphtaléine initialement présente a été consommée, on a donc $6,0 \times 10^{-9}$ mol de phénolphtaléine restante.

f. Sur le graphique on mesure donc $t_{1/2} = 130$ s.

3. Conclusion

Le groupe ayant travaillé avec la concentration en ion hydroxyde de $0,50 \text{ mol.L}^{-1}$ trouve un temps de demi-réaction de 80 secondes. Par conséquent la concentration initiale en ion hydroxyde a une influence sur le temps de demi-réaction.

Activité expérimentale 4. Étude des différents types de catalyse

Commentaires

Cette activité s'appuie sur la réaction de dismutation de l'eau oxygénée. Elle permet d'introduire la notion de catalyseur, espèce chimique qui permet de diminuer une durée de réaction sans apparaître dans l'équation. Sa consommation lorsque la réaction se produit puis sa régénération sont également mises en évidence. Les trois types de catalyse : homogène, hétérogène et enzymatique sont évoqués. L'activité peut être exploitée en travaux pratiques ou utilisée comme expérience de cours réalisée par le professeur. Il est alors préférable de la vidéo-projecter pour que les élèves observent l'effervescence dans les tubes due au dégagement de dioxygène.

Pour prolonger l'activité, on propose une expérience ludique qui peut être réalisée en classe ou simplement visionnée sur le site élève. Elle consiste à ajouter un peu de liquide vaisselle aux réactifs avant d'ajouter le catalyseur. Le dioxygène gazeux produit par la réaction permet la formation d'une mousse avec le liquide vaisselle.

La concentration de l'eau oxygénée à 10 volumes n'est pas très importante ; ainsi l'usage de gants n'est pas indispensable.

Réponses

1. Observer

a. Dans le tube témoin n°1, rien ne se produit. Dans les tubes 2 à 5, on observe une effervescence plus ou moins importante. Dans le tube n°2, les bulles se forment sur le fil de platine.

b. Lorsque l'on introduit la solution jaune de chlorure de fer III dans le tube contenant l'eau oxygénée, elle prend une teinte brun-orangé et on observe l'effervescence. Lorsque l'effervescence s'arrête, la solution retrouve une couleur jaune analogue à celle du tube n°6.

2. Interpréter

a. L'effervescence est due à la formation de dioxygène gazeux qui forme de petites bulles dans la solution aqueuse.

b. On peut définir la durée de la réaction comme « la durée au bout de laquelle on n'observe plus d'effervescence ».

c. Les espèces ajoutées ne figurent pas dans l'équation de la réaction : ce ne sont pas des réactifs.

d. Les ions Fe^{3+} responsables de la couleur jaune sont consommés par la réaction mais on les retrouve à la fin de la réaction. La couleur finale est identique à celle du tube n°6 dans lequel aucune réaction n'est observée. On peut supposer que la concentration finale des ions Fe^{3+} dans la solution est identique à leur concentration initiale.

3. Conclure

a. Les catalyseurs diminuent la durée d'une réaction (dans cet exemple ils permettent de réaliser une réaction tellement lente que l'on n'en observe pas les effets en absence de catalyseur). Ce ne sont pas des réactifs. Ils sont consommés puis régénérés lorsque la réaction est terminée.

b. La catalase est une enzyme. C'est une protéine, constituée d'un enchainement d'acides α -aminés. Elle catalyse de façon très efficace la dismutation du dioxygène.

- c.** - Catalyse homogène : catalyseur et réactifs sont dans la même phase.
- Catalyse hétérogène : catalyseurs et réactifs sont dans des phases différentes.
- Catalyse enzymatique : le catalyseur est une enzyme.

d.

Tube	2	3	4	5
Catalyseur	platine	catalase contenue dans le navet	dioxyde de manganèse	$\text{Fe}^{3+}(\text{aq}), \text{Cl}^{-}(\text{aq})$
Type	hétérogène	enzymatique	hétérogène	homogène

3. Prolonger l'activité

- a.** Le sang contient un catalyseur permettant la dismutation de l'eau oxygénée. C'est le dioxygène formé par la réaction qui la fait « mousser » au contact du sang.
(C'est l'hémoglobine du sang dont la structure présente des similitudes avec la catalase - présence de groupes « hème »- qui joue le rôle de catalyseur).
- b.** Le dioxygène produit est emprisonné par le liquide vaisselle et forme une mousse.

Activité documentaire 5. L'utilisation de catalyseur dans l'industrie

Commentaires

Les documents présentés proposent une définition du terme catalyseur et exposent l'intérêt de leur utilisation dans l'industrie en vue de réduire les coûts énergétiques. Les particularités de la catalyse enzymatiques sont présentées et leur spécificité mise en évidence sur un exemple.

La dernière question est une invitation à une recherche documentaire sur une application industrielle des catalyseurs dans l'industrie. Les fruits de cette recherche peuvent être exploités pour la réalisation d'un diaporama destiné à une présentation orale.

Notons que le document 7 mentionne la notion de « vitesse de réaction ». Il sera nécessaire d'expliquer qu'augmenter la vitesse signifie réduire la durée de la réaction.

Réponses

1. Analyser les documents

a. Avantages relevés dans les documents

Document 7 :

- La présence de catalyseur augmente la vitesse d'une réaction donc diminue sa durée, d'où un gain de temps.
- Une petite quantité de catalyseur est suffisante pour transformer une grande quantité de produit, d'où un faible coût.

Document 8 :

- Utiliser un catalyseur permet d'éviter un chauffage important et de réduire ainsi le coût énergétique de la transformation.

b. Un catalyseur est sélectif s'il ne catalyse qu'une réaction parmi les différentes réactions possibles entre les réactifs introduits. Dans le document 10, on observe que le catalyseur utilisé permet de ne transformer que l'une des deux fonctions acide carboxylique de l'acide glutamique, celle qui est proche de la fonction amine.

c. D'après le document 9, les enzymes sont efficaces dans des conditions douces (pH neutre, température peu élevées) qui sont celles que l'on retrouve dans les organismes vivants.

d. Un catalyseur est régénéré en fin de réaction. Le recycler consiste à le séparer du milieu réactionnel en fin de réaction pour pouvoir le réutiliser.

2. Faire une recherche

Quelques pistes pour orienter les recherches des élèves :

- Utilisation de la catalyse enzymatique dans l'industrie agroalimentaire (panification, laiterie).
- Polymérisation Ziegler Natta.
- Craquage des hydrocarbures.
- Synthèse de l'ammoniac.
- Synthèse de l'acide sulfurique.
- ...

Exercices d'application

5 minutes chrono !

1. Mots manquants

- durée d'une transformation chimique
- temps de demi-réaction
- facteurs cinétiques
- élevée
- catalyseur

2. QCM

- Du chlorométhane CH₃Cl.
- $t_d = 1,4$ min
- 0,4 min (*contrairement à « 0,5 min » sur le spécimen, cette erreur a été corrigée dans le manuel élève*).
- Hétérogène.

Compétences exigibles

3. Les deux premiers dépôts correspondent aux deux réactifs. La représentation de la plaque montre que seul le *para*aminophénol est visible après révélation. L'intensité de la tache correspondante diminue au cours du temps.

On peut définir la durée de la transformation comme étant la durée nécessaire pour que, dans les mêmes conditions de dépôt, cette tache ne soit plus visible, ce qui correspond au dépôt 5 et donc à une durée de 15 min.

(Une seconde tache apparaît au cours de la réaction, son intensité augmente. On en déduit qu'il s'agit du produit, le paracétamol).

4. La réaction libère du diazote gazeux qui gonfle l'airbag.

La réaction doit donc être très rapide pour que le passager soit protégé du choc.

5. a. Notons RCl le 2-chloro-2-méthylpropane et ROH le 2-méthylpropan-1-ol.

Le tableau d'évolution de la réaction est :

	Avancement	RCl	+ H ₂ O	→ ROH	+ H ⁺	+ Cl ⁻
EI	0	$n_0 = 2$ mol	excès	0	0	0
en cours	x	$n_0 - x$	excès	x	x	x

L'avancement maximal x_{\max} est égal à n_0 .

La durée de la transformation t_d correspond à la date où l'avancement vaut $0,9x_{\max}$ donc $0,9n_0$.

À cette date, la quantité de RCl restante est $n_0 - 0,9n_0 = 0,1n_0 = 0,2$ mol.

Pour mesurer t_d , on lit sur le graphique, pour chaque courbe, l'abscisse des points d'ordonnée 0,2 mol. On obtient :

Courbe	Propanone	Eau	t_d
rouge	50 %	50 %	4,5 min
bleue	25 %	75 %	3,4 min
verte	0	100	2,4 min

b. t_d dépend de la nature du solvant qui constitue donc un facteur cinétique.

6. En $t_{1/2} x = \frac{x_{\max}}{2}$. Or $x_{\max} = 2$ mol donc en $t_{1/2} x = 1$ mol.

Rouge : 1,4 min ; Bleu : 1,1 min ; vert : 0,7 min.

7. a. Homogène.

b. Hétérogène.

c. Homogène.

d. Enzymatique.

e. Hétérogène.

Compétences générales

8. Lors de cette expérience, on voit la couleur de la solution évoluer sur plusieurs minutes. Le suivi cinétique est donc réalisable par un spectrophotomètre : la réaction est lente. D'autre part, on constate une évolution des couleurs qui semble périodique dans le temps. Cette transformation est souvent qualifiée de transformation oscillante.

9. a. On peut choisir $x_d = 0,375$.

b. Bleu $t_d = 14$ min, rouge $t_d = 22$ min.

c. Plus la température θ est élevée, plus t_d est faible : donc la courbe bleue correspond à $\theta = 30^\circ\text{C}$ et la rouge à $\theta = 20^\circ\text{C}$.

10. a. Pour étudier l'influence de la concentration initiale c_1 en ion éthanolate, Félix doit la modifier sans modifier la concentration initiale c_2 en iodométhane. Il peut par exemple modifier le volume V_1 de l'échantillon de solution (S_1) d'ion éthanolate, mais conserver le volume V_2 de l'échantillon de l'autre solution (S_2) ainsi que le volume total V_{tot} en adaptant le volume V_e d'éthanol versé.

Il peut choisir, par exemple, de réaliser les expériences 2 ou 3 (ou les deux) décrites dans le tableau ci-dessous.

Expérience	V_1	V_2	V_e	V_{tot}	$c_1 = c \frac{V_1}{V_{\text{tot}}}$	$c_2 = c \frac{V_2}{V_{\text{tot}}}$
1	10 mL	10 mL	20 mL	40 mL	$0,50 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$	$0,50 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$
2	5,0 mL	10 mL	25 mL	40 mL	$0,25 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$	$0,50 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$
3	20 mL	10 mL	10 mL	40 mL	$1,0 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$	$0,50 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$

L'expérience 1 correspond à l'expérience décrite dans l'énoncé.

b. Il suffit d'échanger le rôle des solutions (S_1) et (S_2).

Exercices de méthode

11. Exercice résolu.

12. a. Les conditions initiales diffèrent par la concentration initiale en éthène qui est le paramètre étudié.

b. L'éthène est peu soluble dans l'eau donc même si augmenter sa concentration permet de diminuer la durée de la transformation, l'industriel sera limité par cette faible solubilité.

c. Il faut réaliser la réaction avec une concentration initiale en dioxygène dissous différentes, toutes autres choses égales par ailleurs. La concentration en dioxygène aqueux est proportionnelle à la pression de l'air qui surmonte la solution ; pour la modifier, il faut donc modifier la pression. On peut par exemple choisir les conditions de l'expérience 3 du tableau ci-dessous.

d. Il faut de nouveau répéter l'expérience en ne modifiant qu'un paramètre (expériences 5 et 6).

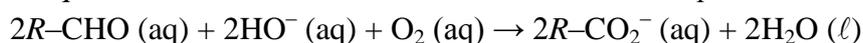
e. Il faut une expérience témoin (ici l'expérience 1), puis une expérience par paramètre à tester (pour chaque expérience, on ne fait varier qu'un seul paramètre par rapport à l'expérience témoin). Il faut donc $k + 1$ expériences.

Expérience	1	2	3	4	5
Pression	10 bar	10 bar	5 bar	10 bar	10 bar
Concentration initiale en éthène	1,0 mmol·L ⁻¹	0,1 mmol·L ⁻¹	1,0 mmol·L ⁻¹	1,0 mmol·L ⁻¹	1,0 mmol·L ⁻¹
Concentration en chlorure de palladium	2,0 mmol·L ⁻¹	2,0 mmol·L ⁻¹	2,0 mmol·L ⁻¹	5,0 mmol·L ⁻¹	2,0 mmol·L ⁻¹
Température	40°C	40°C	40°C	40°C	30°C
Paramètre étudié		concentration initiale en éthène	concentration initiale en O ₂	concentration en chlorure de palladium	température

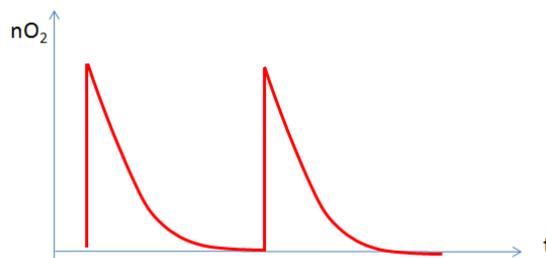
13. a. La dissolution du dioxygène dans l'eau, obtenue par agitation, colore la solution en bleu. Lorsqu'on agite, l'apparition de la couleur bleue est immédiate. La dissolution est donc très rapide.

b. Tant que la solution est bleue, il reste du dioxygène en solution. La disparition de la couleur est lente (on l'observe à l'œil), donc cette réaction est lente. Il faut 20 s pour observer la disparition de la couleur, durée que l'on peut définir comme étant la durée de la transformation.

c. Noter qu'au début de la vidéo, la solution est incolore, la quantité de dioxygène aqueux est donc nulle. Après une agitation, la solution est bleue, donc la quantité de dioxygène aqueux prend une valeur non nulle. On observe ensuite la disparition de la couleur bleue, donc celle du dioxygène, ce qui traduit sa consommation selon la réaction d'équation :



Par conséquent, la concentration en dioxygène aqueux est décroissante et tend vers zéro. Le phénomène est répétitif : à chaque agitation, du dioxygène se dissous rapidement, il est ensuite lentement consommé.



d. L'équation de la réaction montre qu'une mole de dioxygène est consommée lorsque 2 moles de glucose le sont. On dispose de 1 mol de glucose. Pour le consommer entièrement, il faut 0,5 mol de dioxygène. Or initialement, la quantité de O_2 est $n_0 = 2 \text{ mmol} < 0,5 \text{ mol}$. Le dioxygène est donc le réactif limitant. À chaque agitation, on introduit une quantité n_a de dioxygène. On peut réaliser cette opération jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de dioxygène disponible, soit :

$$\frac{n_0}{n_a} = \frac{2}{0,15} = 13,3$$

On peut donc le faire 14 fois (la dernière agitation dissoudra une quantité de dioxygène inférieure à 0,15 mmol).

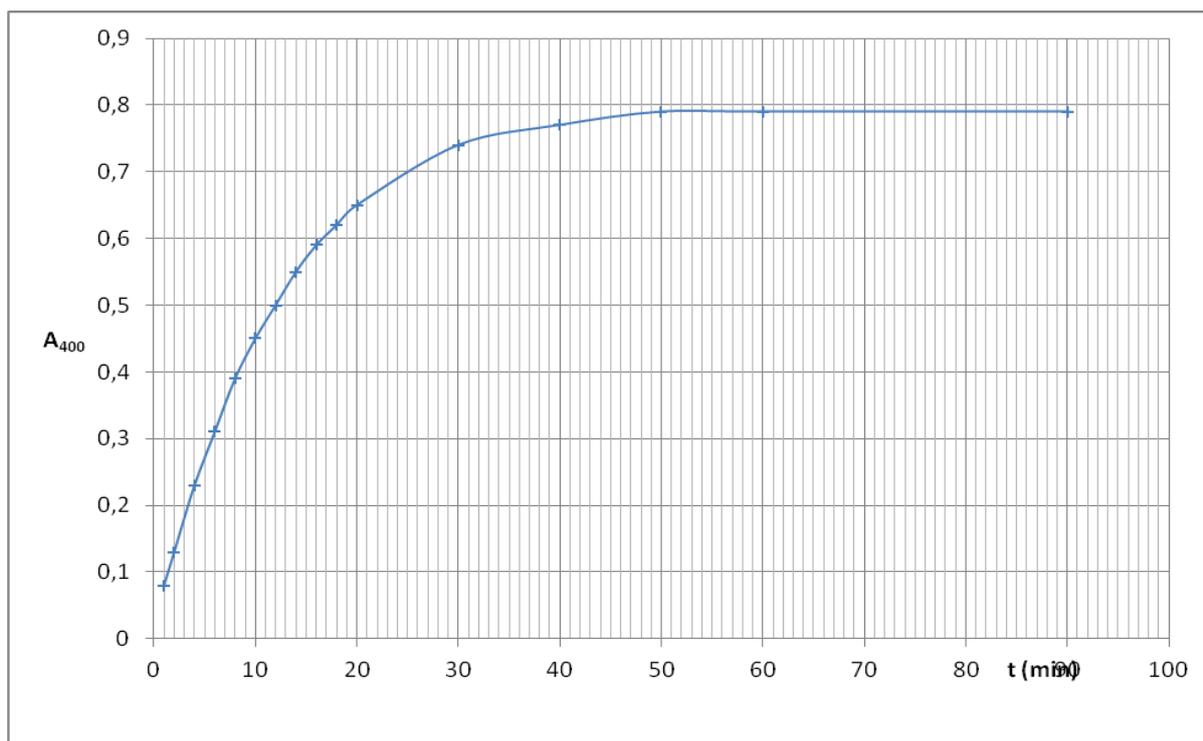
Exercices d'entraînement

14. a. Le tableau d'évolution de la réaction est :

	$2\text{I}^-(\text{aq}) + \text{S}_2\text{O}_8^{2-}(\text{aq}) \rightarrow \text{I}_2(\text{aq}) + 2\text{SO}_4^{2-}(\text{aq})$			
EI	excès	n_0	0	0
en cours	excès	$n_0 - x$	x	$2x$

L'avancement de la réaction est égal à la quantité x de diiode formée. La seule espèce colorée est le diiode. D'après la loi de Beer-Lambert, l'absorbance mesurée est donc proportionnelle à la concentration $\frac{x}{V}$ en diiode et donc également à l'avancement x de la réaction puisque le volume V est constant. L'avancement maximal de la réaction est n_0 . Le temps de demi-réaction est la durée au bout de laquelle l'avancement sera égale à $\frac{n_0}{2}$, ce qui correspondra à une valeur d'absorbance égale à la moitié de sa valeur maximale, qui est également sa valeur finale.

Sur le graphe $A(t)$ tracé ci-dessous on mesure $A_{\text{max}} = 0,8$ et $t_{1/2} = 8$ min pour $A = 0,4$.



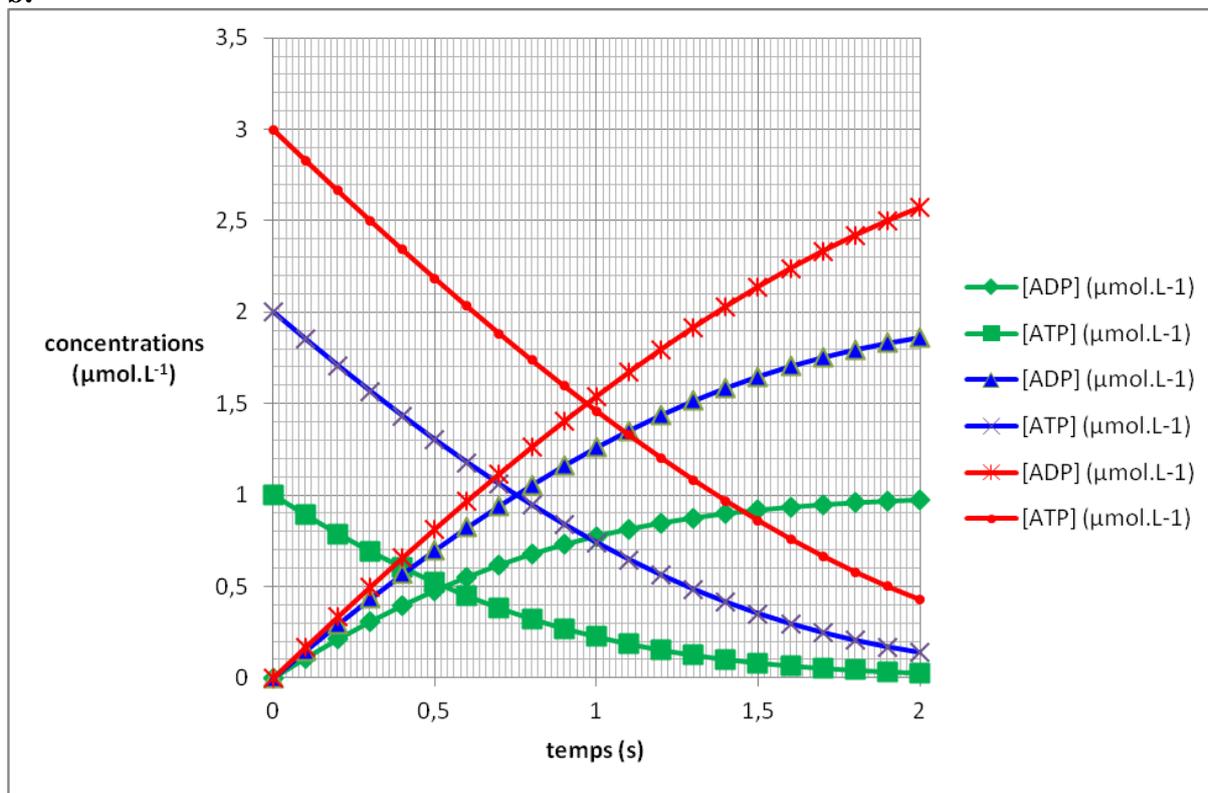
b. Pour réduire $t_{1/2}$, on peut augmenter la température. On peut également modifier les concentrations initiales en réactif mais on ne peut prévoir l'effet de ces modifications sur $t_{1/2}$.

15. a. À $t = 15$ h, Les pics mettent en évidence la présence des produits B et C recherchés mais également celle du réactif A qui n'a pas été consommé. Thomas décide de rajouter le second réactif (BAIB) pour consommer tout le réactif A restant. À $t = 18$ h, il n'y a plus de A , la réaction est donc terminée.

b. La molécule donc le temps de rétention est 2,4 min est présente à tout instant de la transformation : il peut s'agit du catalyseur TEMPO, qui est consommé mais régénéré.

16. a. Les données du tableau permettent de calculer à chaque instant la concentration en ATP restante : $[ATP] = [ATP]_0 - [ADP]$ où $[ATP]_0$ est la concentration initiale en ATP.

b.



Pour cette réaction, le temps de demi-réaction est la durée nécessaire à la consommation de la moitié de l'ATP. Expérience 1 : 0,5 s ; expérience 2 : 0,75 s ; expérience 3 : 0,95 s.

c. La concentration initiale en ATP est un facteur cinétique : plus elle est grande, plus le temps de demi-réaction est grand.

17. a. Le temps de demi-réaction est la date à laquelle l'avancement est égal à la moitié de l'avancement maximal, ce qui correspond ici à la date où la concentration en S est égale à la moitié de sa concentration initiale.

Concentration initiale en enzyme	$2c$	c	$0,5c$
$t_{1/2}$ (s)	0,15	0,3	0,6

b. Plus la concentration initiale en enzyme est importante, plus le temps de demi-réaction est court.

c. Le rôle catalytique de l'enzyme est interprété par la formation d'une espèce intermédiaire appelée complexe enzyme-substrat qui s'établit par formation de liaisons faibles entre le substrat (ici le saccharose) et l'enzyme. La réaction est d'autant plus rapide que de nombreuses molécules d'enzyme sont présentes pour accueillir les molécules de substrat.

Exemples de liens Internet :

http://highered.mcgraw-hill.com/sites/0072507470/student_view0/chapter25/animation_enzyme_action_and_the_hydrolysis_of_sucrose.html,
http://chimie.scola.ac-paris.fr/sitedechimie/chi_orga/bioorga/enzymes.htm

18. a. Le temps de demi-réaction est la date à laquelle l'avancement est égal à la moitié de l'avancement maximal, ce qui correspond ici à la date où la concentration en H₂O₂ est égale à la moitié de sa concentration initiale.

Courbe	a	b	c	d(e)
t _{1/2} (s)	30	20	30	20

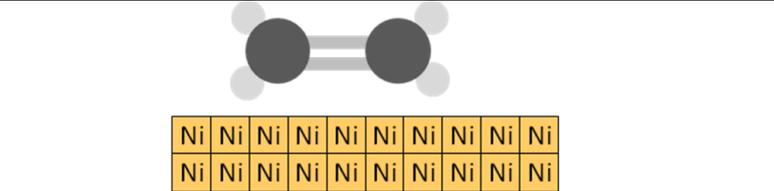
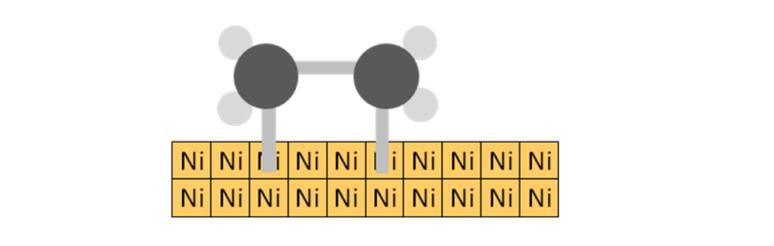
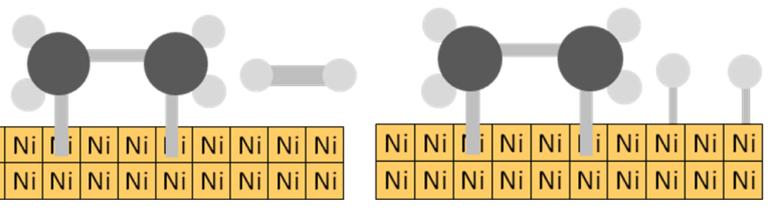
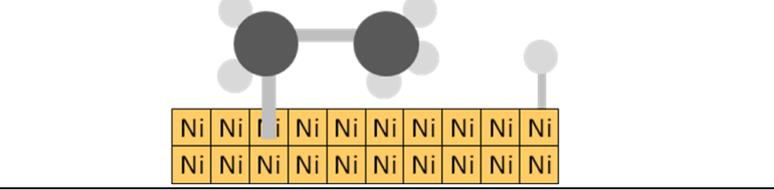
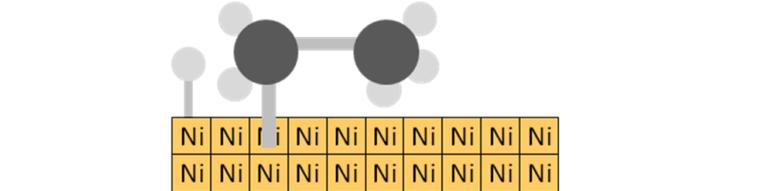
b. Pour attribuer les courbes aux expériences, on tient compte des concentrations initiales en H₂O₂ que l'on retrouve sur le graphique et de la température. Plus la température est élevée, plus le temps de demi-réaction est faible (la température est un facteur cinétique).

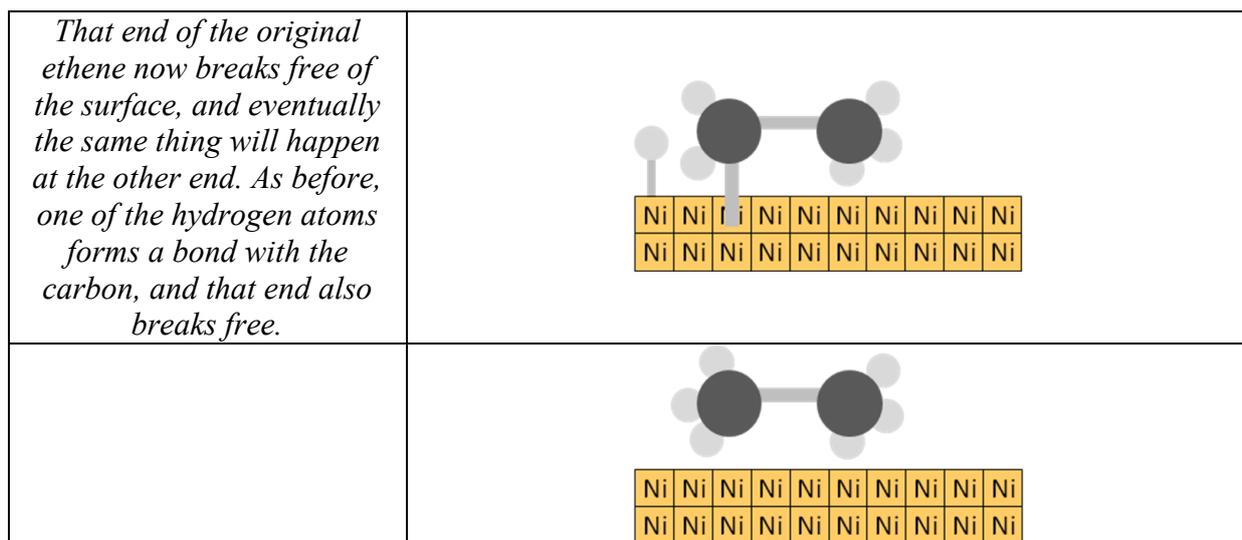
D'où :

Courbe	a	b	c	d(e)
Expérience	2	4	1	3

c. Pour deux concentrations initiales différentes et deux températures identiques (expériences 1 et 2 ou 3 et 4), le temps de demi-réaction est le même. La concentration initiale en H₂O₂ n'a donc pas d'influence sur le temps de demi-réaction.

19.

	
<i>Ethene molecules are adsorbed on the surface of the nickel. The double bond between the carbon atoms breaks and the electrons are used to bond it to the nickel surface.</i>	
<i>Hydrogen molecules are also adsorbed on to the surface of the nickel. When this happens, the hydrogen molecules are broken into atoms.</i>	
<i>These can move around on the surface of the nickel.</i>	
<i>If a hydrogen atom diffuses close to one of the bonded carbons, the bond between the carbon and the nickel is replaced by one between the carbon and hydrogen.</i>	



20. Deux grandeurs sont proportionnelles si leur quotient est constant. Deux grandeurs sont inversement proportionnelles si leur produit est constant.

Pour la réaction 1

$$\frac{52}{0,40} = 130$$

$$\frac{103}{0,80} = 128,8$$

$$\frac{155}{1,2} = 129$$

On peut considérer que ce quotient est constant, donc $t_{1/2}$ est proportionnel à c_0 .

La dernière valeur $t_{1/2}$ du tableau (en s) doit vérifier $\frac{t_{1/2}}{0,2} = 129$; d'où $t_{1/2} = 26$ s.

Pour la réaction 2

$$10 \times 8,4 = 84$$

$$20 \times 4,2 = 84$$

$$50 \times 1,7 = 85$$

On peut considérer que ce produit est constant, donc $t_{1/2}$ est inversement proportionnel à c_0 .

La dernière valeur $t_{1/2}$ du tableau (en s) doit vérifier $t_{1/2} \times 0,2 = 84$ d'où $t_{1/2} = 420$ s.

21. a. Pour un patient de 70 kg, la quantité d'antibiotique dans le corps (en le supposant uniformément réparti) doit être de $70 \times 2 = 140$ mg.

S'il prend un comprimé de 400 mg (ce qui correspond à une concentration c_0), l'antibiotique n'est plus efficace lorsque sa concentration correspond à une masse de 140 mg d'antibiotique

réparti dans le corps, ce qui correspond à une concentration c vérifiant $\frac{c}{c_0} = \frac{140}{400} = 0,35$.

Sur le graphique, déterminons la durée t_d pour laquelle $\frac{c}{c_0} = 0,35$.

On lit 9,6 h, ce qui correspond à l'instant où le patient doit reprendre de l'antibiotique.

Le patient doit donc prendre un comprimé de 400 mg toutes les 9 à 10 h.

b. La lecture de t_d sur la courbe à 39°C conduit à $t_d = 7,5$ h. Cet intervalle de temps est plus court parce qu'à une température plus élevée, les réactions de dégradation de l'antibiotique par l'organisme sont plus rapides.

22. a. On observe qu'une solution d'ions permanganate est colorée, c'est la seule espèce qui le soit. On pourra donc suivre l'évolution de la concentration en ions MnO_4^- en mesurant l'absorbance de la solution.

Étude préliminaire

- Réaliser le spectre d'une solution de permanganate de potassium pour déterminer la longueur d'onde à laquelle seront effectuées les mesures. Cette mesure permet aussi de déterminer la concentration de la solution de MnO_4^- qui permettent d'obtenir une mesure d'absorbance convenable (autour d'une valeur de 1 par exemple) (il est possible que la concentration c_1 soit trop élevée).
- Évaluer la durée de la réaction en introduisant dans un tube à essai des volumes égaux des solutions S_1 et S_2 (ceci permet d'avoir une idée de la durée pendant laquelle il faudra faire les mesures d'absorbance).

Plan d'expérience (cf. exercice 12 page 275)

Expérience	1	2	3	4
Volume de S_1^* (mL)	2	1	1,5	0,5
Volume de S_2 (mL)	1	1	1	1
Volume d'eau (mL)	0	1	0,5	1,5

*éventuellement diluée si les mesures préliminaires ont montré qu'elle était trop concentrée.

Remarques

- Seules deux expériences (1 et 2) sont nécessaires si l'on veut effectuer une étude qualitative de l'influence de la concentration des ions permanganate ; pour une étude quantitative, il en faut davantage.
- Le volume total est toujours le même, le volume de S_2 versé également. Ainsi, seule la concentration initiale en ion permanganate varie d'une expérience à l'autre.
- La concentration de S_2 est très supérieure à celle de S_1 , quelles que soient les expériences, le réactif limitant sera toujours l'ion MnO_4^- .
- On suppose que la solution S_1 est suffisamment acidifiée pour fournir les ions H^+ nécessaires à la transformation.

Protocole

- Préparer le spectrophotomètre.
- Dans une cuve de spectrophotomètre introduire la solution de permanganate et l'eau comme indiqué dans le plan d'expérience.
- Ajouter l'acide oxalique. Boucher avec un parafilm, retourner la cuve pour homogénéiser puis la placer dans le spectrophotomètre et déclencher une mesure de l'absorbance à des intervalles de temps définis pendant la préparation.
- Tracer la courbe $A(t)$ et mesurer le temps $t_{1/2}$ pour lequel l'absorbance est égale à la moitié de l'absorbance initiale.
- Recommencer avec les autres expériences planifiées.

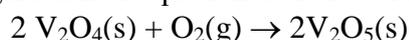
b. Matériel

- Spectrophotomètre + cuve.
- 3 pipettes graduées de 2 mL pour prélever les solutions et l'eau (ou 3 burettes).
- 1 propipette.
- Quelques petits béchers et tubes à essais.
- Du papier parafilm.

23. a. La température est un facteur cinétique. Plus elle est élevée, plus la durée de la transformation est courte. La synthèse industrielle n'est pas réalisée à température trop élevée parce que le coût énergétique est trop important et parce que, d'après le document, au-delà de 700 °C le rendement de la synthèse n'est pas suffisant.

b. Les réactifs sont gazeux et le catalyseur est solide, il est donc dans une phase différente des réactifs. Il s'agit de catalyse hétérogène.

c. L'équation de la première étape traduit la consommation d'une molécule de SO₂ et la formation d'une molécule de SO₃. La régénération du catalyseur doit s'accompagner de la consommation de O₂ qui figure dans l'équation de la réaction. On peut donc proposer :



L'équation de la réaction s'obtient en faisant deux fois la première étape et une fois la seconde

d. L'oxyde de vanadium est probablement moins coûteux que le platine.

Exercices de synthèse

24. Lorsque la réaction (1) se produit, elle produit du diiode qui devrait colorer la solution en bleu. Toutefois, le diiode produit est très rapidement consommé par la réaction (2) qui consomme également le thiosulfate introduit. Lorsque tout le thiosulfate a été consommé, le diiode formée par (1) colore la solution en bleu.

La durée de la réaction est donc définie comme l'instant où le diiode produit par (1) a permis la consommation totale de la quantité n_0 d'ions thiosulfate introduits.

D'après l'équation de la réaction (2), pour consommer tous les ions thiosulfate, il faut une quantité de I_2 égale à $\frac{n_0}{2}$.

Il est donc nécessaire que la quantité d'ions iodure introduite soit suffisante pour former cette quantité de diiode.

Or, la quantité maximale de diiode produite par la réaction (1) est égale à $\frac{c_1 V_1}{2}$.

Le protocole n'a donc de sens que si $\frac{c_1 V_1}{2} > \frac{n_0}{2}$, soit $n_0 < c_1 V_1$.

25. a. Une levure est un champignon unicellulaire.

b. Les levures sont observables au microscope optique (taille d'environ 10 μm).

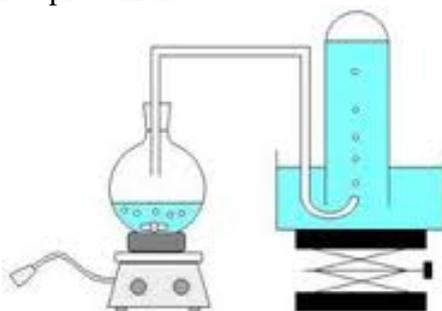
c. Le sucre est transformé en deux molécules : éthanol et dioxyde de carbone ; pour Pasteur, il se dédouble.

d. La levure produit une enzyme qui catalyse la réaction de dédoublement du sucre, ce qui correspond à l'hypothèse de Pasteur selon laquelle « la levure produit une matière telle que la pepsine qui agit sur le sucre ». Toutefois, elle ne disparaît pas aussitôt, elle est régénérée, mais sa quantité est tellement faible, qu'à l'époque de Pasteur on ne pouvait pas mettre en évidence sa présence.

e. Les fermentations utilisent des enzymes produites par des levures comme catalyseurs. Toutefois, seules les enzymes sont nécessaires, la présence des levures qui les produit n'est pas nécessaire. La fermentation peut donc s'opérer sans phénomène physiologique.

f. Une démarche scientifique consiste en l'observation de processus, la proposition de modèles pour les expliquer et la validation de ces modèles par la réalisation d'expérience. C'est bien la démarche de Pasteur, qui propose plusieurs modèles pour justifier ce qu'il observe, et n'en réfute aucun a priori, tant que des expériences ne viennent les confirmer ou les invalider.

26. a. On peut recueillir le gaz par déplacement d'eau :



Un tube à essai gradué rempli d'eau est renversé sur une cuve remplie d'eau. Un tube soudé relie le ballon fermé dans laquelle la réaction a lieu et conduit le gaz formé dans le tube. Le gaz déplace l'eau qui descend dans la cuve. Si le tube est gradué en volume, le volume de dioxygène formé peut être mesuré.

b.

	avancement	2H ₂ O ₂ (aq) → O ₂ (g) + 2H ₂ O (ℓ)		
état initial	0	$n_0 = c_0V_0$	0	excès
en cours	x	$n_0 - 2x$	x	excès
état final	x_{\max}	$n_0 - 2x_{\max} = 0$	x_{\max}	excès

c. L'avancement maximal vérifie $x_{\max} = \frac{n_0}{2} = \frac{c_0V_0}{2} = 0,48 \text{ mmol}$, ce qui correspond à un volume de dioxygène formé $V_{\max} = \frac{x_{\max}RT}{P} = 11,7 \text{ mL}$.

d. Le temps de demi-réaction est la durée nécessaire pour que l'avancement soit égal à la moitié de son avancement maximal, soit $x = \frac{x_{\max}}{2}$ et $V = \frac{V_{\max}}{2} = 5,8 \text{ mL}$.

e. D'après le tableau, $t_{1/2}$ est voisin de 47 s.

f. L'enzyme est le catalyseur qui diminue la durée d'une transformation. Le temps de ½ réaction diminue lorsque l'on ajoute de l'enzyme. La température est un facteur cinétique, sa diminution entraîne l'augmentation de $t_{1/2}$.

27. 1. a. Le diiode donne une couleur jaune à la solution (en réalité le diiode est dissous dans une solution d'iodure de potassium afin d'augmenter sa solubilité, c'est l'ion triiodure I₃⁻ qui donne sa couleur jaune à la solution). On peut donc suivre l'évolution de la concentration en I₂ en mesurant l'absorbance, qui lui, est proportionnelle.

b. Il faut réaliser le spectre de la solution et déterminer la longueur d'onde pour laquelle l'absorbance est maximale. On se place ensuite à cette longueur d'onde pour réaliser les mesures.

2. a. Les échantillons de volume $V = 5,0 \text{ mL}$ seront prélevés à l'aide d'une pipette jaugée de 5,0 mL. L'échantillon de volume V_a sera mesuré à l'aide d'une burette (qui permet d'introduire facilement et précisément des échantillons de volume variable entre 2,0 et 10,0 mL). Enfin, le volume V_e d'eau distillée sera mesuré à l'aide d'une éprouvette graduée de 50 mL.

b. Matériel :

- spectrophotomètre
- cuves
- 2 pipettes jaugées de 5,0 mL
- 1 burette graduée et son support
- 1 éprouvette graduée de 50 mL
- 4 béchers de 100 mL
- 1 agitateur magnétique
- 1 barreau magnétique

3. a. Le volume d'eau est choisi de sorte que le volume total soit toujours égal à 50 mL pour toutes les expériences. Ainsi, les concentrations initiales en propanone et en diiode seront toujours égales, seule la concentration en acide chlorhydrique variera.

b. Soit V_t le volume total ($V_t = 2V + V_a + V_e$) :

- la concentration initiale en diiode $[I_2]_0$ est égale à $\frac{cV}{V_t}$;
- la concentration initiale en acide chlorhydrique $[H_3O^+]_0$ est égale à $\frac{c'V_a}{V_t}$;
- la concentration initiale en propanone $[C_3H_6O]_0$ est égale à $\frac{\rho V}{V_t}$ où $\frac{\rho V}{M}$ est la quantité de propanone dans un échantillon de volume V).

Concentration initiale	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
$[I_2]_0$ (mmol.L ⁻¹)	0,10	0,10	0,10	0,10
$[C_3H_6O]_0$ (mmol.L ⁻¹)	1,3	1,3	1,3	1,3
$[H_3O^+]_0$ (mol.L ⁻¹)	0,04	0,1	0,14	0,2

c. La concentration initiale en catalyseur est très supérieure à celle des réactifs, de sorte que, même si le catalyseur est consommé puis régénéré au cours de l'expérience, on peut supposer que les variations de sa concentration sont très faibles et considérer que sa concentration reste constante.

4. a. Le réactif limitant est le diiode (plus faible quantité introduite alors que les nombres stœchiométriques valent tous 1).

b. La réaction sera terminée lorsque l'absorbance sera nulle, ou prendra une valeur constante proche de 0.

c. Pour mesurer le temps de demi-réaction, il faut déterminer le temps au bout duquel l'avancement est égal à la moitié de l'avancement maximal. Or, le réactif limitant est I_2 . Le temps de demi-réaction est donc égal à la durée nécessaire pour que sa concentration soit divisée par 2 ou encore que l'absorbance initiale soit divisé par 2.

d. $t_{1/2}$ est proportionnel à $[H_3O^+]_0$ si le quotient de ces deux grandeurs est constant. Les élèves ont donc calculé ce quotient pour tous les essais et mis en évidence qu'il prenait toujours la même valeur.

28. 1. a. Un cube d'arête a a pour surface $S = 6a^2$, donc :

$$a = \sqrt{\frac{S}{6}} = \sqrt{\frac{400}{6}} = 8,1 \text{ m}$$

Son volume est a^3 et sa masse $m = \rho a^3 = 1,1 \times 10^3$ tonnes = $1,1 \times 10^9$ g.

b. Sa surface active est :

$$S_a = \frac{S}{m} = 3,8 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$$

Elle est très petite devant celle du catalyseur !

2. a. Un petit cube a une arête égale à $\frac{a}{2}$, une surface de $\left(\frac{a}{2}\right)^2$.

La surface de l'ensemble des 8 petits cubes est égale à :

$$8 \left(\frac{a}{2}\right)^2$$

ce qui conduit à une surface active :

$$S_{a,1} = \frac{8\left(\frac{a}{2}\right)^2}{m} = \frac{2a^2}{m} = 2S_a$$

b. Après 1 division, on dispose de 8 cubes d'arête $\frac{a}{2}$, après 2 divisions de 8×8 cubes d'arête $\frac{a}{4}$, après 3 divisions de $8 \times 8 \times 8$ cubes d'arête $\frac{a}{8}$... et après n divisions de 8^n cubes d'arête $\frac{a}{2^n}$ et de surface totale : $S_{a,n} = 8^n \times 6\left(\frac{a}{2^n}\right)^2 = \frac{2^{3n}}{2^{2n}} \times 6a^2 = 2^n S_a$.

3. a. $n = \frac{\ln\left(\frac{S_{a,n}}{S_a}\right)}{\ln 2} = 30$.

b. Les cubes ont alors une arête de $\frac{a}{2^{30}} = 7,5 \times 10^{-9}$ m.

4. La surface active est beaucoup plus grande pour un catalyseur en poudre. Pour une même masse de catalyseur, on dispose d'une surface de contact entre le catalyseur et la solution, ou la phase gazeuse, bien plus grande, ce qui permet d'augmenter l'efficacité du catalyseur.

29. Exemple de synthèse de documents

Ces documents rappellent à l'élève les grandes notions sur les catalyseurs qu'il a étudiées en classe.

Une introduction possible peut se faire en citant quelques polluants présents dans les gaz d'échappement (voir le document 1) et en donnant l'équation de la réaction de leur transformation en gaz non polluants (comme le diazote ou l'eau) et en gaz à effet de serre (le dioxyde de carbone).

Dans son développement, l'élève peut présenter quelques caractéristiques d'un catalyseur, développées dans le document 3 : le catalyseur permet d'accélérer les transformations chimiques. Il s'agit ici d'une catalyse hétérogène puisque les réactifs sont gazeux et que les catalyseurs sont solides. D'autre part, la catalyse est d'autant plus efficace que le catalyseur est dans un grand état de division ; ceci est réalisé dans le cas des pots catalytiques en déposant des métaux nobles sur des « oxydes ». Les élèves ayant connaissance de la notion de surface spécifique peuvent développer ce thème avec leurs propres connaissances.

En conclusion, l'élève peut développer une ouverture sur les problèmes de société : les pots catalytiques permettent d'épurer les gaz d'échappement des véhicules consommant des hydrocarbures, mais ils n'empêchent pas la formation du principal gaz à effet de serre qu'est le dioxyde de carbone.

Chapitre 14 – Stéréoisomérisation des molécules organiques

Manuel pages 281 à 302

Choix pédagogiques

Dans la partie du programme : « Structure et transformation de la matière », la représentation spatiale des molécules est indispensable pour interpréter certaines de leurs propriétés.

Il s'agit ici du troisième chapitre de chimie dans la progression du manuel :

- on s'appuiera sur les acquis du chapitre 6 (Molécules organiques : linéaires et ramifiées, groupes caractéristiques, classes fonctionnelles. Formule topologique – Nomenclature IUPAC) ;

- l'introduction à la cinétique chimique présentée chapitre 13 n'est pas réinvestie dans ce chapitre 14, mais la présentation de la stéréospécificité de certaines réactions pourra éclairer sur le rôle et le choix des catalyseurs biologiques, les enzymes.

L'entrée dans le chapitre se fait par la présentation de la convention de Cram, choisie pour la représentation spatiale des molécules ; on abordera ensuite les stéréoisomérisations de conformation sur des exemples simples avant de présenter les stéréoisomérisations de configuration.

Conformément au programme, on propose une activité autour de l'approche historique de la découverte de ces structures tridimensionnelles et on prendra le plus souvent des exemples dans le domaine de la biologie, où les conformations et les configurations des molécules ont une grande importance.

Des animations, des simulations et des vidéos documentaires illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et, certaines d'entre elles, sur les sites Internet compagnon Sirius.

Le logiciel de simulation présent dans le manuel numérique Sirius Term S spécifique propose des outils pour l'étude stéréochimique des molécules. Ce logiciel est également téléchargeable à l'adresse suivante : <http://www.chimsoft.com/>

Page d'ouverture

Pour assurer sa fonction, la protéine (coloriée en vert) se replie autour du substrat (en bleu)

La description de la photographie doit permettre aux élèves d'évoquer la structure tridimensionnelle des molécules de protéine et de mettre en évidence le caractère dynamique de ces géométries. La nécessité d'une description précise et d'une représentation conventionnelle des molécules en trois dimensions doit émerger.

Le choix d'une protéine comme « vedette » de cet exemple permet d'ouvrir sur l'importance de la géométrie en trois dimensions dans le monde biologique.

Le mot « stéréochimie » est introduit (rappel : στερεο en grec désigne les « solides » en trois dimensions, par opposition aux « plans »).

Activités

Activité documentaire 1. Sur les traces de Pasteur

Commentaires

Cette activité répond à l'ouverture du thème par une approche historique, proposée dans le programme.

L'élève aura à exploiter des documents historiques pour comprendre comment le lien a été fait entre les propriétés des solutions et la symétrie des structures des espèces chimiques dissoutes. Une présentation de la lumière polarisée, à l'aide d'un document simple, est indispensable dans cette approche et pourra être réinvestie transdisciplinairement par l'élève en SVT dans le cadre des observations au microscope sous lumière polarisée.

L'activité sera complétée par l'observation des cristaux préparés à l'avance par le professeur (protocole donné dans la partie « manipulation » ; attention, quelques jours sont nécessaires), suivant la méthode pratiquée par Pasteur.

Réponses

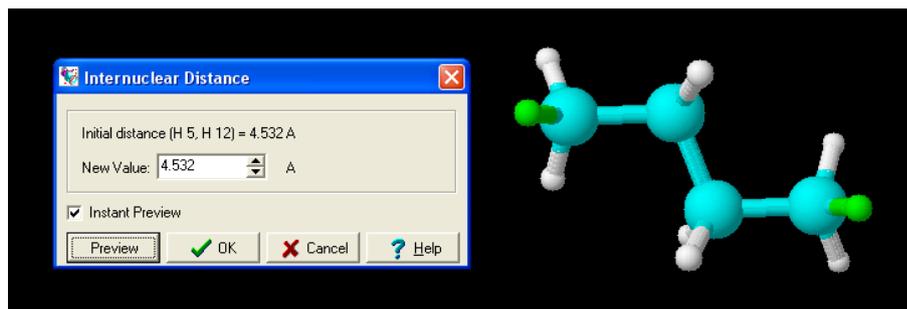
1. Analyser les documents

a. Les deux solides du document 2 ne sont pas superposables ; la forme de gauche peut-être vue comme l'image dans un miroir plan de la forme de droite.

b. $(C_4H_4O_6)(Na)(NH_4)(s) \rightarrow C_4H_4O_6^{2-}(aq) + Na^+(aq) + NH_4^+(aq)$

c. D'après la ligne 25 du document, les cristaux examinés par Pasteur sont de « dimensions millimétriques » d'où L_1 de l'ordre du millimètre.

d. On peut accéder à l'ordre de grandeur de la dimension d'une molécule de 4 atomes de carbone à l'aide d'un moteur de recherche répondant à la question « longueur de la molécule de butane ? » ou bien en construisant la molécule de butane à l'aide d'un logiciel (*Chemsketch* par exemple) en utilisant l'outil « distance ».



On trouve ainsi L_2 de l'ordre de quelques « Å » correspondant à 10^{-10} m.

Attention à l'unité, l'élève ne connaît pas l'angström mais le nanomètre.

e. Le rapport L_1/L_2 est de l'ordre de $10^{-3}/10^{-10} = 10^7$.

Les molécules sont 10 millions de fois plus petites que les petits cristaux, mais elles possèdent des propriétés de symétrie analogues.

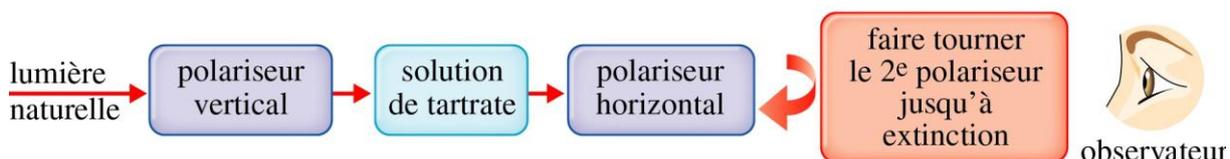
Remarque : la quantité de tartrate d'un cristal de masse de l'ordre du gramme est de l'ordre de la mmol.

f. Lignes 26 à 30 : « Après dissolution de chaque type de cristaux dans l'eau, il observa l'action de chacune des deux solutions sur la lumière polarisée : l'une dévia son plan de polarisation vers la droite, et l'autre vers la gauche ».

L'effet sur la lumière polarisée d'une solution du cristal de gauche (déviations dans un sens) est l'inverse de l'effet, sur une même lumière, du cristal de droite (déviations dans l'autre sens).

g. D'après le document 4 (qu'est-ce que la lumière polarisée ?) : on voit que, si l'on place un polariseur horizontal sur le trajet d'une lumière déjà polarisée verticalement, aucune lumière n'émergera du deuxième polariseur (on parle de polariseurs « croisés »).

h. Pour déterminer l'angle dont a tourné la polarisation d'une lumière polarisée verticalement, il faut placer un deuxième polariseur horizontal après le passage dans la solution et le faire tourner jusqu'à extinction du faisceau émergent.



L'angle dont on a fait tourner le deuxième polariseur est l'angle recherché.

2. Présenter une démarche scientifique

a. « J'ai eu l'idée de réorienter les cristaux de paratartrate face à moi. J'ai pu alors distinguer deux types de cristaux qui différaient par l'orientation d'une facette : inclinée vers la gauche chez les uns, vers la droite chez les autres. Il existe deux sortes de cristaux de paratartrate. »

b. Exercice de communication : si l'enseignant a prévu de réaliser la manipulation « Pour aller plus loin » décrite ci-dessous, il serait intéressant que l'élève insère dans son diaporama les photographies des cristaux observés en classe.

Manipulation « Pour aller plus loin »

Préparation à l'avance au laboratoire de cristaux de tartrate double ammonium-sodium

Biblio-sitographie :

- Article « L'observation d'un chimiste nommé Pasteur » Jean Jacques La Recherche N°282 de décembre 1998
- Thierry Ruchon : <http://iramis.cea.fr/Pisp/thierry.ruchon/>

Produits : acide tartrique racémique, pastilles de soude, solution d'ammoniac concentrée (l'acide tartrique est disponible en pharmacie, il est par ailleurs utilisé par les confiseurs comme conservateur dans leurs préparations).

1. Dans un bécher en pyrex de 500 mL, dissoudre 75 g d'acide tartrique dans 200 mL d'eau.
2. Ajouter, lentement et progressivement, 20 g de soude en pastilles (0,5 moles) : on observe une précipitation et un fort échauffement au moment de la prise en masse.
3. Ajouter progressivement 100 mL d'ammoniac concentrée ($d = 0,92$) : le précipité se redissout.
4. Verser dans un cristalliseur ou grand bécher et concentrer la solution au bain-marie (évaporer une cinquantaine de mL).
5. Laisser cristalliser lentement, à l'abri de l'air et des poussières pendant plusieurs dizaines d'heures. Les cristaux qui se forment peuvent être de plusieurs formes suivant les conditions de température : les cristaux qui nous intéressent se forment entre 20°C et 25°C, il faut les retirer des eaux-mères à l'aide d'une pince et les sécher sur papier absorbant.
6. À une température entre 25 et 35°C, on peut obtenir de très gros cristaux (10 à 15 g) apparaissant comme des conglomérats de plusieurs fibres cristallines.
7. Attention, ces cristaux « s'effleurissent » à l'air sec : ils deviennent blanchâtres en perdant par évaporation une partie de leur eau de cristallisation.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 14. Stéréoisométrie des molécules organiques

8. Si la cristallisation n'est pas satisfaisante, redissoudre les cristaux ou amas de cristaux dans l'eau distillée, filtrer et recommencer les phases concentration/cristallisation.



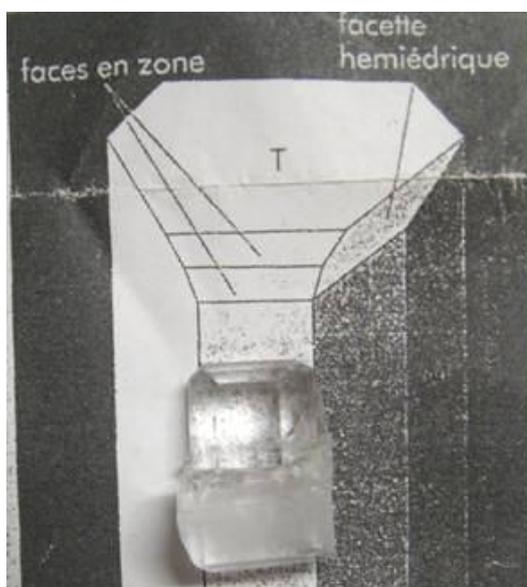
Séchage de petits cristaux sur papier absorbant.



Un gros cristal prêt à être repêché.



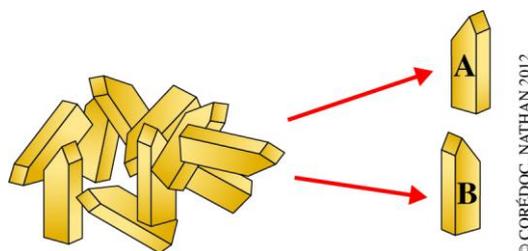
Très beau spécimen où les différentes facettes sont visibles.



- La facette hémédrique est caractéristique du caractère « droit » ou « gauche » de la dissymétrie.

9. Dans cette « manipulation », les élèves sont amenés à observer à l'œil nu, à la loupe ou à la lunette binoculaire les cristaux préparés à l'avance. Si le matériel le permet, ils pourront effectuer des photographies intéressantes qu'ils pourront insérer dans leur diaporama pour la question 2.b.
10. Si l'établissement dispose d'un polarimètre il sera intéressant de le mettre en œuvre :
- pour mettre en évidence que la solution de l'acide tartrique racémique dont on s'est servi pour préparer le tartrate est sans effet sur une lumière polarisée ;
 - pour mettre en évidence les effets des solutions du cristal droit ou du cristal gauche.

Dans l'animation proposée sur le site, l'élève est, dans un premier temps, amené à trier des formes cristallines « droite » et « gauche ».



Activité expérimentale 2. Construire des stéréoisomères de conformation

Commentaires

Cette activité répond à la demande du programme : « Visualiser, à partir d'un modèle moléculaire ou d'un logiciel de simulation, les différentes conformations d'une molécule ». L'élève se familiarisera d'abord avec les modèles moléculaires grâce auxquels il mettra en évidence les différentes conformations liées à la libre rotation autour de la simple liaison carbone-carbone.

Réponses

Manipulation 1

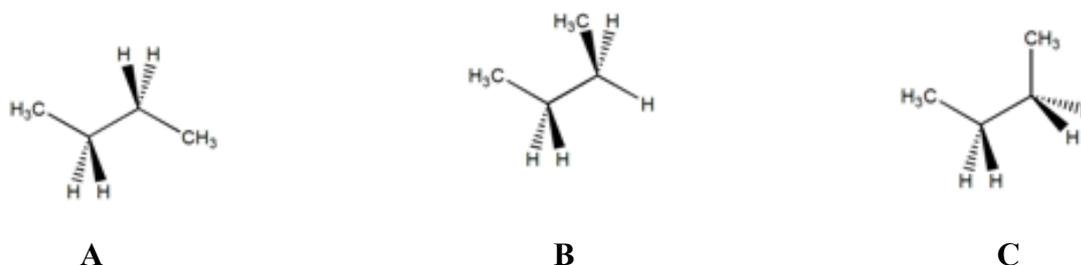
1. Observer

a. Deux conformations (Cram) de la molécule d'éthane :



b. Le passage d'une forme à l'autre se fait sans casser de liaison : il suffit de tourner librement autour de la liaison C-C.

c. Conformations du butane (Cram) ; le passage de l'une à l'autre se fait sans casser de liaison :



2. Interpréter

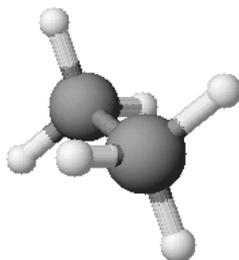
Les conformations les plus « repliées » (conformation (C) par exemple) du butane semblent les moins favorables, les groupes CH₃ sont trop proches les uns des autres et l'énergie potentielle sera maximale du fait des interactions entre ces deux groupes.

Dans la conformation (A), les groupes CH₃ sont les plus éloignés, l'énergie potentielle sera minimale et cela correspond à la conformation la plus stable.

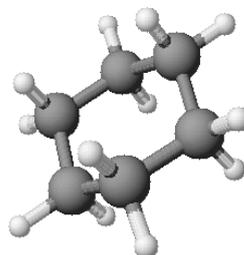
Manipulation 2

3. Observer

a. Molécule d'éthane



b. Molécule de cyclohexane

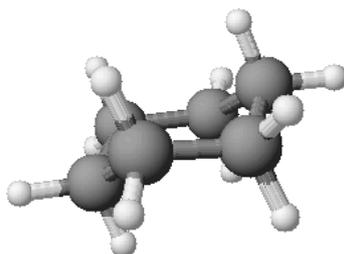


On voit que dans chacune des deux molécules, les liaisons C–H de deux carbones voisins ne se placent pas en parallèle.

4. Interpréter

a. Le terme « décalé » pour désigner cette particularité des liaisons C–H de deux atomes de carbone voisins est particulièrement adapté : le 2^e atome de carbone semble avoir tourné ou s'être « décalé » de $1/6^e$ de tour (ou 60° d'angle) par rapport au précédent.

b. Vue sous un certain angle (schéma ci-dessous), la molécule de cyclohexane de conformation « décalée » ressemble à un petit fauteuil... d'où le nom de « conformation chaise ».



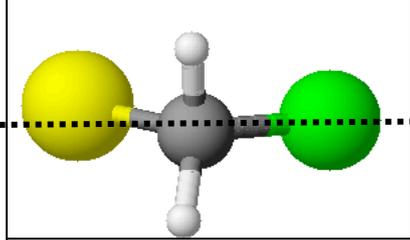
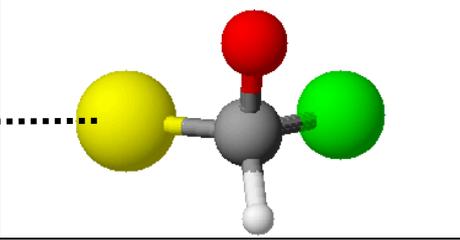
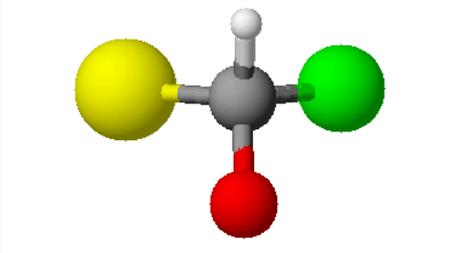
Activité expérimentale 3. Construire des stéréoisomères de configuration

Commentaires

L'objectif de cette activité est de mettre en évidence la notion de « carbone asymétrique » et de chiralité pour une molécule.

Réponses

1. Observer

	Molécule (A) : CH ₂ BrCl	Molécule (B) : CHClFBr
		
		
Sont-ils tous superposables ?	tous superposables	on met en évidence deux structures non superposables
Analyser la différence		l'une peut être vue comme une image dans un miroir plan de l'autre
Peut-on passer d'une forme modélisée à l'autre sans casser de liaison ?		il faut casser deux liaisons (par exemple C-H et C-F) puis les rétablir en interchangeant les « partenaires »
Élément de symétrie	possède un plan de symétrie	ne possède pas de plan de symétrie

2. Interpréter

Dans les deux molécules, l'atome de carbone est tétraédrique (lié à 4 atomes).

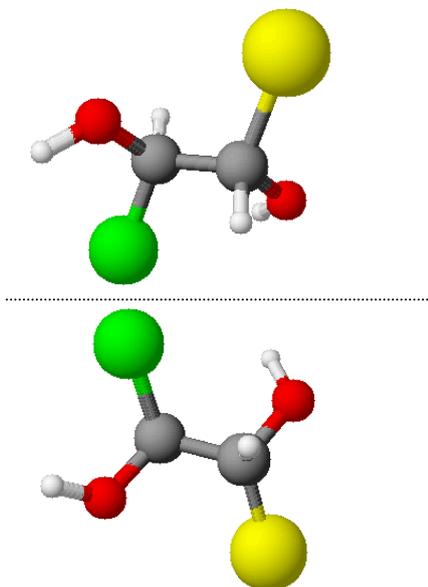
Dans la molécule (A), l'atome C central est lié à deux atomes d'hydrogène, un atome de chlore et un atome de brome : les 4 atomes ne sont pas différents.

Dans la molécule (B), l'atome C central est lié à un atome d'hydrogène, un atome de chlore, un atome de brome et un atome de fluor : les 4 atomes sont différents.

L'atome de carbone de la molécule (B), dit asymétrique, est au centre d'un tétraèdre et lié à 4 atomes différents.

3. Dessiner des énantiomères

À l'aide de *Chemsketch*, et en suivant les consignes du texte, on construit d'abord un des énantiomères.



Conseils

- Avant de copier la représentation 3D dans un document texte, choisir les couleurs les plus adaptées « options-colors » :
 - éviter les fonds noirs si on a l'intention d'imprimer le document ;
 - par défaut, l'atome de brome et l'atome de chlore sont tous verts : modifier la couleur de l'un des deux pour les différencier.
- Importer les structures « miroir » l'une après l'autre.

4. Observer

- Ces deux molécules ne sont pas superposables.
- Pour passer de l'une à l'autre il faut casser et recréer une liaison.

Activité expérimentale 4. Différentes propriétés des diastéréoisomères

Commentaires

Il s'agit ici, conformément au programme, de pratiquer une démarche expérimentale pour mettre en évidence des propriétés différentes de diastéréoisomères.

L'interprétation de la différence des températures de fusion fera appel aux notions vues en 1^o S sur les interactions inter et intramoléculaires et sur les liaisons hydrogène.

Correction effectuée dans le livre élève : les valeurs des solubilités des acides fumarique et maléique du tableau 8 page 286 ont été inversées.

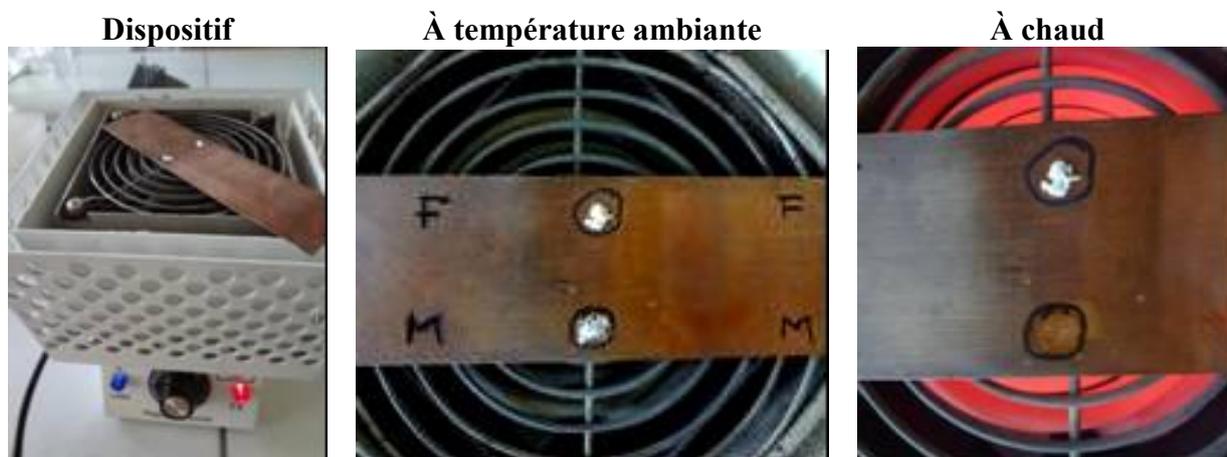
Fumarique → 6,3 Maléique → 780

Expérience si l'on ne dispose pas de banc Köffler

Comparaison des températures de fusion de l'acide fumarique et de l'acide maléique.

D'après Alain Rabier, BUP n° 777, octobre 1995.

Matériel : une plaque de cuivre, un « bec électrique ».



Si on admet que les deux échantillons sont à la même température, on voit que lors de la fusion de l'acide maléique, l'acide fumarique (F) est encore solide.

Réponses

1. Observer

a. À l'aide des modèles moléculaires, on voit que, comme leur nom l'indique, il s'agit d'isomères (Z) et (E), donc de diastéréoisomères : il faut casser et recréer une liaison pour passer d'une forme à l'autre, et ils ne sont pas image l'un de l'autre dans un miroir.

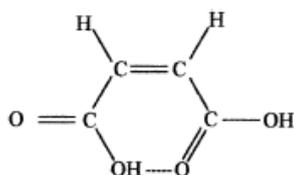
b. Les valeurs des températures de fusion données par les tables sont :

	acide fumarique (E)	acide maléique (Z)
T _f (°C)	286	130

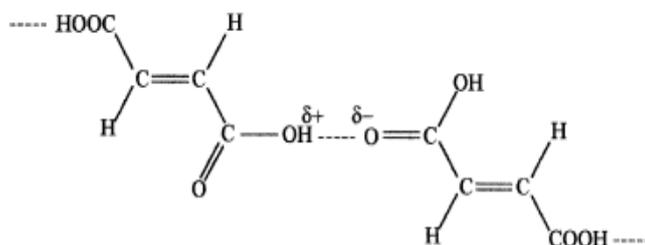
2. Interpréter

Prérequis : interactions, liaisons hydrogène et changement d'état (1^e S).

Acide maléique : les liaisons hydrogène sont principalement intramoléculaires.



Acide fumarique : les liaisons hydrogène sont entre les molécules et donnent une grande cohésion au solide, la température de fusion sera plus élevée que dans le cas précédent.



Démarche d'investigation

3. Formuler des hypothèses

La solubilité dans l'eau est une propriété distinctive entre les deux isomères : à 25°C, l'acide maléique est très soluble (780 g·L⁻¹) alors que l'acide fumarique ne l'est presque pas (6 g·L⁻¹).

Protocole proposé :

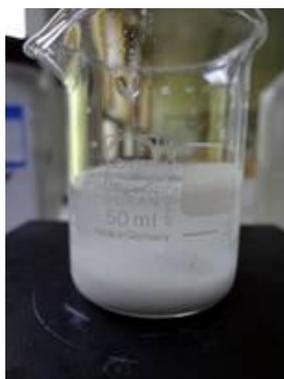
1. Introduire le mélange en poudre dans un petit becher.
2. Ajouter un petit volume d'eau distillée, une vingtaine de mL, pas beaucoup plus car, pour une solubilité de 6 g·L⁻¹ pour l'acide fumarique, il peut s'en dissoudre 120 mg dans 20 mL.
3. Installer le bécher sur un dispositif d'agitation et laisser dissoudre pendant quelques minutes.
4. Filtrer le mélange : on devrait retrouver l'acide fumarique non dissout dans le filtre et le filtrat (F) devrait être très riche en acide maléique soluble, avec des traces d'acide fumarique.
5. Sécher le résidu restant dans le filtre : c'est l'acide fumarique.
6. Évaporer l'eau du filtrat : le solide restant est principalement l'acide maléique avec quelques traces d'acide fumarique.

4. Expérimenter pour conclure

a. Manipulations :



Le mélange de départ



Agitation



Filtration

b. Vérification à l'aide d'une chromatographie sur plaque.

- Préparer les solutions à déposer ; dissoudre les solides dans un peu d'acétone ;
- Déposer une mini-goutte de chaque solution sur une plaque CCM de gel de silice ;
- Éluer en utilisant un mélange éthanol/eau/ammoniaque 80 : 16 : 4 ;
- Regarder les taches sous lumière ultraviolette.

N° dépôt	
1	solution de référence : acide maléique (quelques cristaux dans 2 mL d'acétone)
2	solution de référence : acide fumarique (quelques cristaux dans 2 mL d'acétone)
3	quelques grains du résidu solide du filtrat (F) dans l'acétone.
4	solution de quelques cristaux du résidu solide dans le filtre dissous dans l'acétone.

Commentaire : on trouve les deux isomères dans le filtrat ; par contre, le dépôt 4 ne présente qu'un seul constituant, l'acide fumarique.

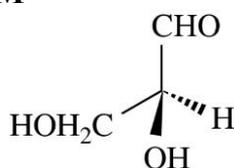
Exercices d'application

5 minutes chrono !

1. Mots manquants

- conformation
- chirale
- asymétrique
- énantiomères
- racémique
- configuration

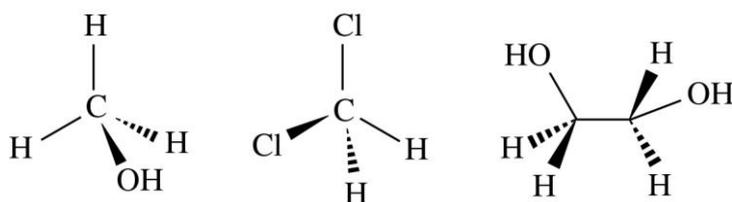
2. QCM



-
- La représentation de Cram.
- Stéréoisomères de conformation.
- Un clou.
- ClCH(OH)-CH_3 .
- Énantiomères.

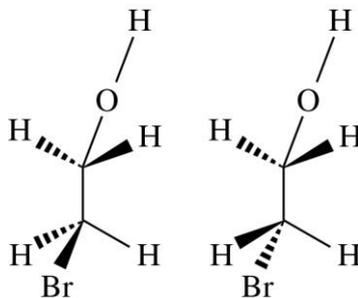
Compétences exigibles

3.



a. méthanol b. dichlorométhane c. éthan-1,2-diol

4. Conformères du 2-bromoéthane-1-ol :



Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 14. Stéréoisomérisie des molécules organiques

5. *Carbones asymétriques.

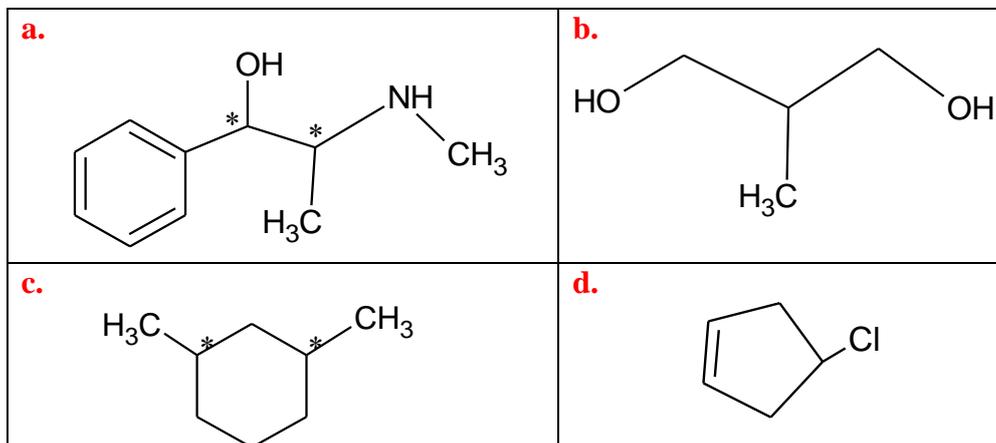
a. $\text{CH}_3 - \text{C}^*\text{HBr} - \text{CH}_2\text{Br}$.

b. $\text{CH}_2\text{Br} - \text{CHBr} - \text{CH}_2\text{Br}$: pas d'atome de carbone asymétrique.

c. $\text{CH}_3 - \text{C}^*\text{HBr} - \text{CH}(\text{OH}) - \text{CH}_3$.

d. $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{C}^*\text{HCl} - \text{CH}_3$.

6. Les C asymétriques sont notés *

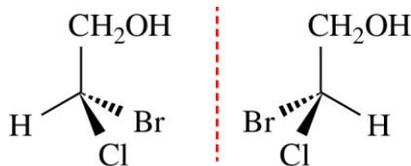


7. La première molécule est non chirale car elle n'a pas d'atome de carbone asymétrique.

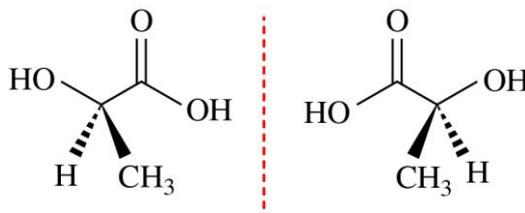
La seconde est chirale car elle possède un atome de carbone asymétrique.

La troisième est chirale car elle possède deux atomes de carbone asymétriques.

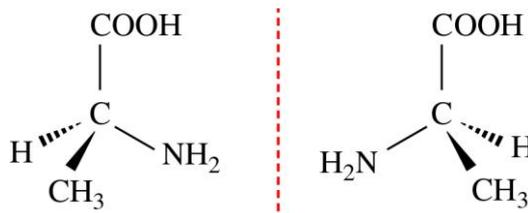
8. a. 1-bromo-1-chloroéthan-1-ol : $\text{ClCHBr-CH}_2(\text{OH})$



b. Acide 2-hydroxypropanoïque (ou acide lactique) : $\text{CH}_3\text{-CH}(\text{OH})\text{-CO}_2\text{H}$

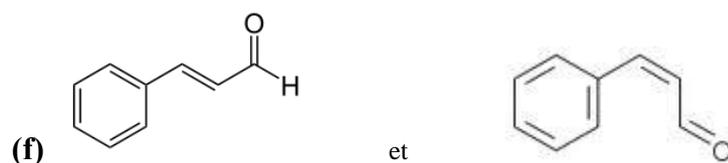
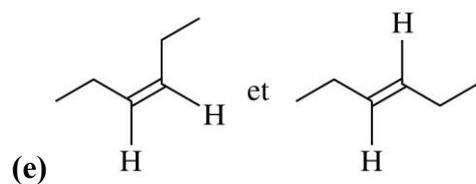
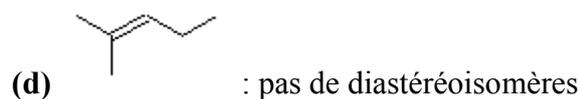
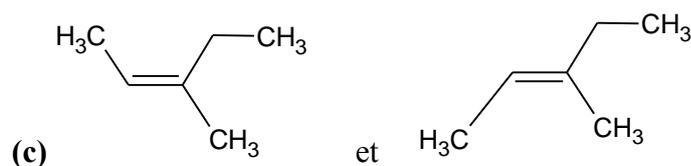
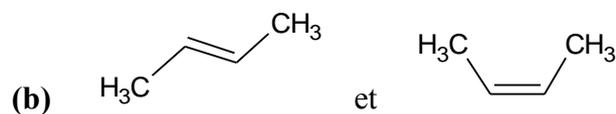
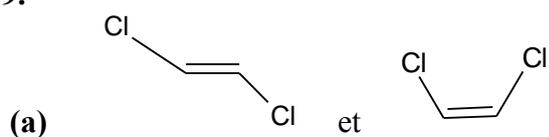


c. Acide 2-aminopropanoïque (ou alanine) : $\text{CH}_3\text{-CH}(\text{NH}_2)\text{-CO}_2\text{H}$



Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 14. Stéréoisomérisie des molécules organiques

9.



10. Exercice difficile : s'aider de modèles moléculaires.

a. Énantiomères car images l'une de l'autre.

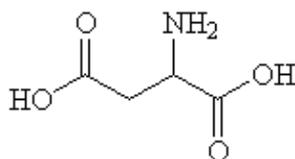
b. Diastéréoisomères.

c. Énantiomères.

d. Énantiomères.

11. a. Formule semi-développée : $\text{HOOC}-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{NH}_2)-\text{COOH}$

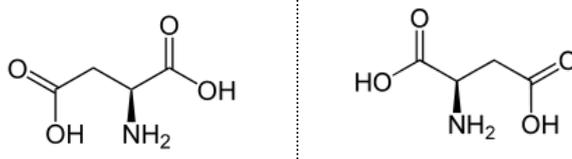
Formule topologique :



Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 14. Stéréoisomérisie des molécules organiques

b. Le carbone asymétrique est le carbone portant le groupe caractéristique amine (NH₂) car il est tétraédrique et lié à 4 groupes d'atomes différents.

Les deux énantiomères sont représentés ci-dessous :



Compétences générales

12. a. 1-chloroéthan-1-ol : possède un atome de carbone asymétrique, c'est une molécule chirale.

b. 2-chloroéthane-1-ol : ne possède pas d'atome de carbone asymétrique (il y a deux H sur chacun des deux C de la molécule), la molécule n'est pas chirale.

c. (Z)-2-méthoxybut-2-ène : ne possède pas d'atome de carbone asymétrique, la molécule n'est pas chirale.

13. a. Phrase 1 du document 1 : « *Les propriétés pharmacologiques de deux énantiomères peuvent être très différentes.* »

Informations du doc 2 : « *L'activation d'un récepteur ne peut se faire que par une molécule ayant des affinités pour lui et qui se fixera à lui.* »

On imagine bien que, si l'énantiomère (A) peut activer le récepteur (R_A), l'autre énantiomère (B) ne puisse pas activer ce même récepteur pour des raisons de géométrie dans l'espace et qu'il pourrait activer un autre récepteur (R_B) : les actions de (A) et (B) peuvent alors être très différentes.

b. Un composé « énantiopur » ne contient qu'un seul énantiomère d'une molécule chirale.

c. Si, comme dans le cas imaginé en **a.**, les énantiomères (A) et (B) d'une molécule chirale activent des récepteurs R_A et R_B différents et que la thérapie recherchée nécessite l'activation de R_A seul, il faut prescrire une préparation ne contenant que l'énantiomère A, donc une préparation énantiopure ; un racémique est un mélange de deux énantiomères d'une même molécule, ce qui est à proscrire ici.

Exercices de méthode

14. Exercice résolu.

15. a. La formule semi développée de l'isomère proposé est :



* La chaîne est formée de 5 atomes de carbone → **pentane**.

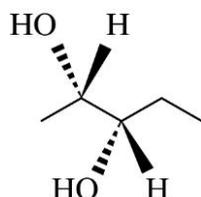
* Deux groupes caractéristiques OH sur les atomes de carbone 2 et 3 → 2,3-diol.

Le carbone 2 et le carbone 3 sont des carbones asymétriques : tétraédriques et liés à 4 groupes d'atomes différents.

Rappel : pour une molécule possédant 2 atomes de carbone asymétrique, il existe le plus souvent 4 stéréoisomères, certains sont énantiomères entre eux et certains diastéréoisomères.

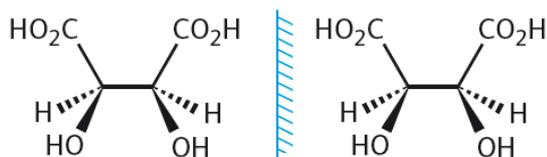
b. Si la molécule n'est pas superposable à son image dans un miroir, il s'agit d'**énantiomérisie**.

c. Représentation de la molécule B après rotation de 180° autour de Δ :



Elle n'est pas superposable à la molécule A : ce sont des énantiomères, les molécules sont chirales.

d. Cas de l'acide tartrique :



Cette molécule D est superposable à son image dans un miroir plan : elle n'est pas chirale

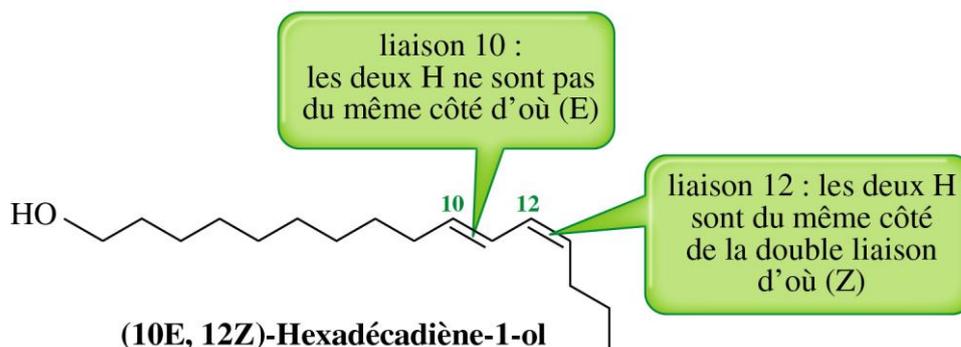
Dans ce cas, on parle de forme « méso » qui s'observe lorsque la molécule, à 2 atomes de carbone asymétrique, présente un plan de symétrie.

16. a. - On compte 16 atomes de carbone → **hexadéca** ;

- On remarque un groupe caractéristique OH, conférant la fonction alcool en première position d'où **-1-ol** ;

- On note deux doubles liaisons, l'une en 10° position (à partir du OH) et l'autre en 12° position d'où **10,12-dièn** ;

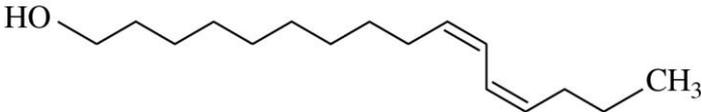
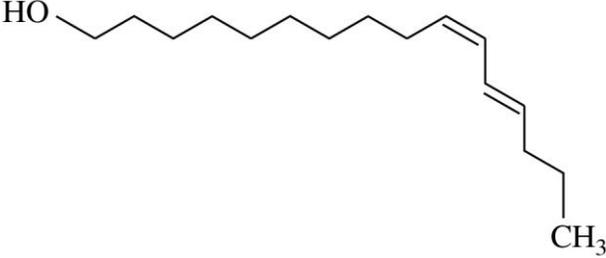
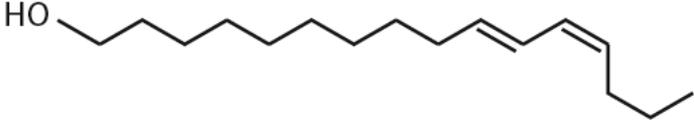
- Orientation de la chaîne de part et d'autre de chaque liaison double :



b. Cette molécule ne présente pas d'atome de carbone asymétrique, tétraédrique lié à 4 groupements différents, elle n'a pas d'énantiomères.

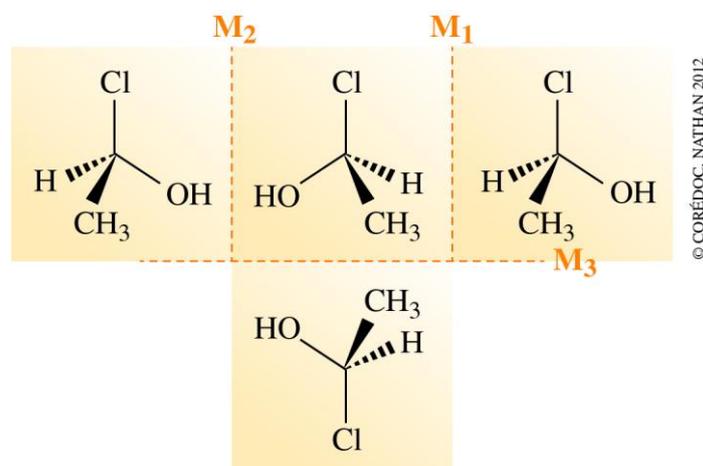
c. Chaque double liaison peut, si les groupements liés sont différents, être à l'origine de deux diastéréoisomères, le (Z) et le (E).

On voit qu'il y a 4 combinaisons possibles de 2 caractères (Z et E) sur deux positions (10 et 12).

Liaison 10	Liaison 12	Préfixe au nom	Représentation de l'isomère
Z	Z	(10Z, 12Z)	
Z	E	(10Z, 12E)	
E	E	(10E, 12E)	
E	Z	(10E, 12Z)	 Bombykol

Exercices d'entraînement

17. a. et b. On trace les symétriques de la structure d'origine par rapport aux axes (M₁), (M₂) et (M₃) représentant, en coupe, les plans des miroirs.



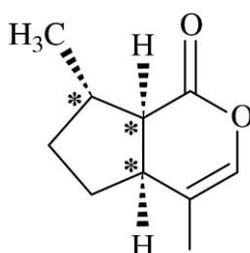
c. Chacune des structures est image de la structure initiale par un miroir : elles sont donc toutes les trois identiques entre elles et représentatives d'un même énantiomère ; on peut passer de l'une à l'autre sans casser de liaison.

18. a. La structure en trois dimensions de la partie entourée en jaune de la molécule de LSD est identique à la structure de la partie activante de la molécule de sérotonine (à droite sur le schéma de gauche)

b. Les perturbations de la vision sont dues à l'action du LSD sur les synapses à sérotonine du cerveau : la molécule de LSD, dans la partie entourée en jaune sur le schéma, a une structure tridimensionnelle est très proche de celle de la sérotonine, le neurotransmetteur normal de la vision. Elle va donc se lier aux récepteurs à sérotonine des neurones post-synaptiques, mais avoir une action à la fois plus importante et plus longue.

19. a. Seul l'isomère A de la nepetalactone a un effet sur le comportement des chats ; l'isomère B est inactif.

b. Les atomes de carbone asymétriques sont tétraédriques et liés à 4 groupes d'atomes différents. On les pointe par *. Il y a 3 atomes de C asymétriques.



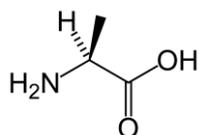
c. Les isomères A et B sont énantiomères car non superposables dans l'espace ; d'ailleurs, ils n'activent pas le même récepteur biologique du système nerveux du chat.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 14. Stéréoisomérisie des molécules organiques

20. a. *Correction dans le livre élève : il est demandé de représenter la molécule d'alanine avec trois atomes de carbone (et non quatre).*

La molécule d'alanine est : HO₂C-CH(NH₂)-CH₃.

Représentation d'un isomère :



b. Cette molécule est chirale car elle possède un atome de carbone asymétrique.

c. Lorsqu'une protéine se déroule, il n'y a pas de rupture de liaison covalente.

Les structures initiales et finales n'ont pas la même forme.

Il s'agit d'isomérisie de conformation, résultant de la libre rotation autour de liaisons simples entre atomes de carbone C-C.

d. - à une température supérieure à 100°C, les œufs deviennent vraiment « durs » (caoutchouteux) ;

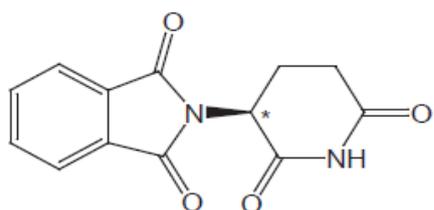
- à une température de l'ordre de 68°C, les œufs sont « mollets » : « le blanc est pris, mais délicat, et le jaune est resté liquide avec son goût de jaune frais ».



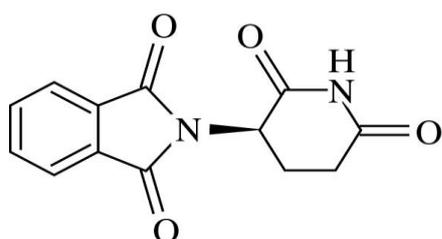
21. Si on utilise ici *Chemsketch 3D*, logiciel libre, le détail des étapes à suivre est décrit sur le tutoriel accessible à l'adresse suivante :

http://www.acdlabs.com/download/docs/chemsk_t12.pdf

22. a. L'atome de carbone asymétrique est noté sur la molécule avec une *.



Énantiomère toxique

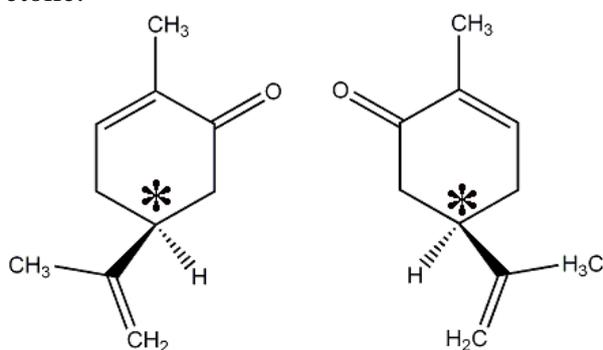


Énantiomère non toxique

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 14. Stéréoisomérisie des molécules organiques

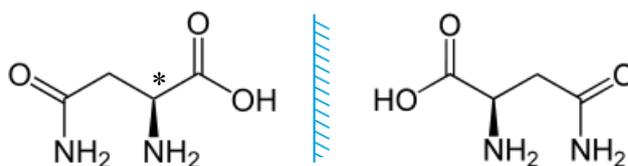
b. Dans un mélange racémique, les deux énantiomères sont présents, le toxique et le non toxique. Les patientes à qui le racémique a été administré ont donné naissance à des enfants malformés.

23. a. Les deux énantiomères de la carvone ; le carbone asymétrique est indiqué par une étoile.

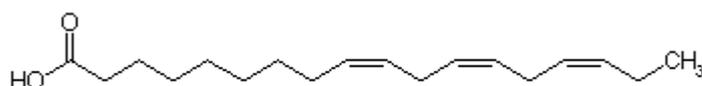


À gauche, l'isomère présent dans le cumin, à droite celui à odeur de menthe.

b. La molécule d'asparagine : le carbone asymétrique est repéré par une étoile. Les deux structures sont images l'une de l'autre dans un miroir plan : ce sont des énantiomères.



24. a. *Correction dans le livre élève : il est demandé d'écrire la formule topologique de l'acide (Z)- α -linoléique.*



b. À partir du CH₃, on trouve :

- Une double liaison en 3^o position d'où ω 3.
- Une double liaison en 6^o position d'où ω 6.
- Une double liaison en 9^o position d'où ω 9.

c. Dénombrons les isomères de configuration : il s'agit de diastéréoisomères.

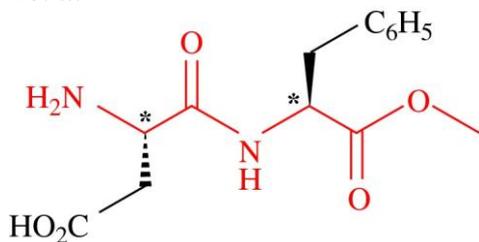
	ω 3	ω 6	ω 9
Géométrie autour des différents C = C	Z	Z	Z
	Z	Z	E
	Z	E	E
	Z	E	Z
	E	Z	Z
	E	Z	E
	E	E	E
	E	E	Z

On trouve 8 combinaisons possibles de 2 caractères (Z et E) sur 3 centres.

25. Énantiomérisie ; travail de communication à partir du cours et des exercices proposés.

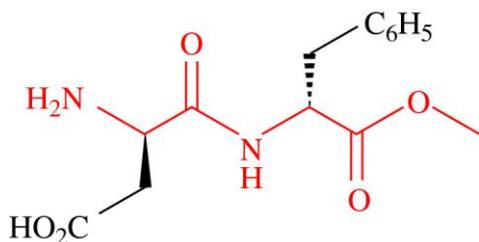
Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 14. Stéréoisomérisie des molécules organiques

26. a.



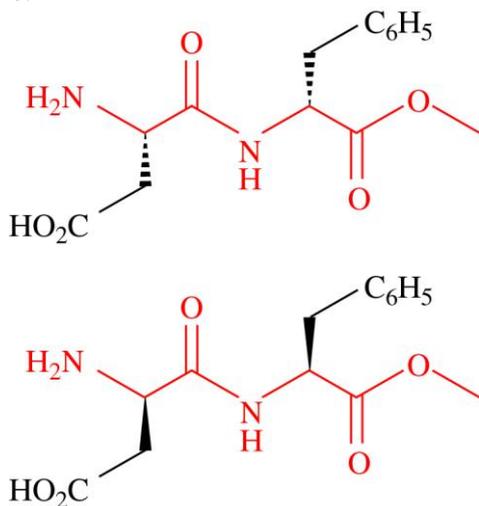
On met en évidence 2 atomes de carbone asymétriques dans cette molécule.

b.



Pour observer cet énantiomère sur un miroir, il faudrait placer le plan du miroir parallèlement au plan de la feuille de papier (au-dessus ou en dessous).

c.



Ces deux molécules sont des diastéréoisomères de l'aspartame ; elles sont énantiomères entre elles.

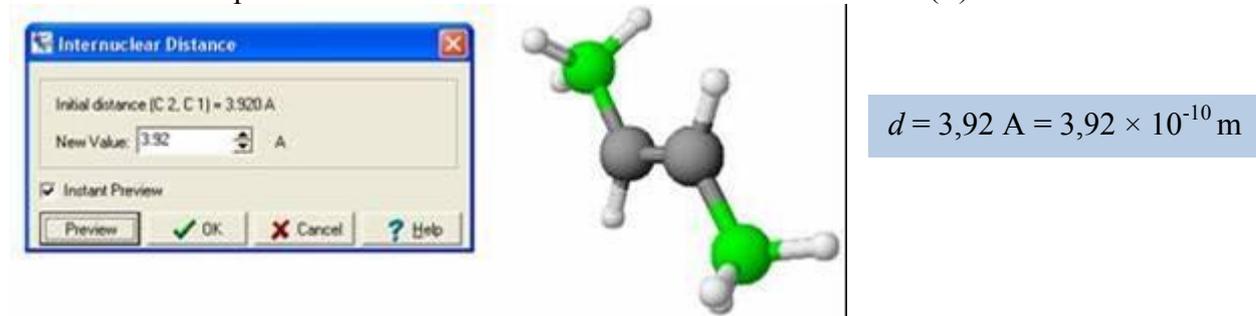
d. Les récepteurs du goût sont stéréospécifiques puisque des molécules de structure spatiale différente (stéréoisomères) n'agissent pas sur les mêmes récepteurs et provoquent une réponse sensorielle différente (sucrée ou amère).

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 14. Stéréoisomérisation des molécules organiques

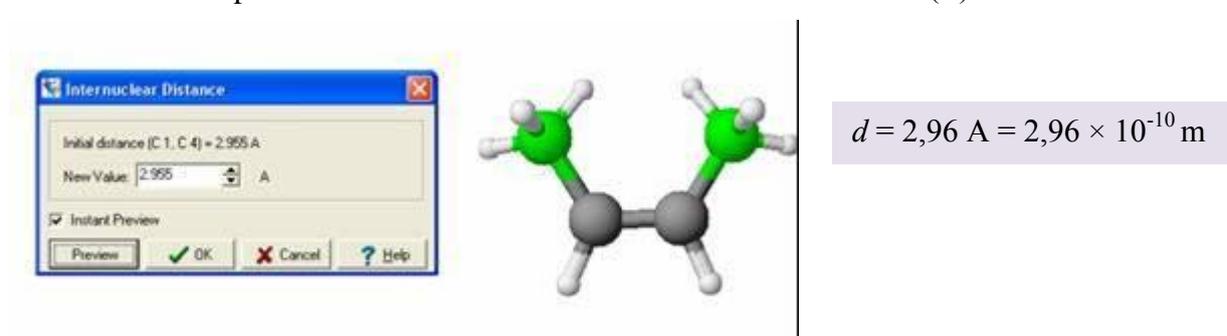
27. L'élève doit d'abord construire avec les modèles les deux diastéréoisomères du but-2-ène : l'isomère (E) et l'isomère (Z).

Ensuite, à l'aide de l'éditeur de molécules (ici *Chemsketch*), il effectuera les représentations demandées et les exploitera (outil « distance »). Attention aux unités !

Distance entre le premier et le dernier carbone dans le cas de l'isomère (E) :



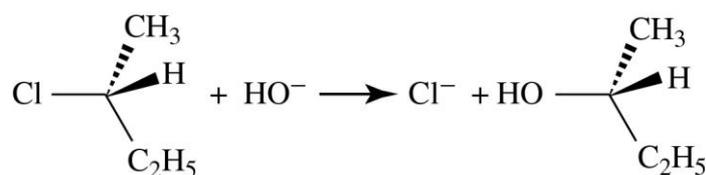
Distance entre le premier et le dernier carbone dans le cas de l'isomère (Z) :



28. a. Dans le 2-chlorobutane et dans le butan-2-ol, le carbone portant le groupe caractéristique (Cl ou OH) est un carbone tétraédrique lié à 4 groupements différents.

b. La molécule de 2-chlorobutane représentée est chirale puisqu'elle contient un atome de carbone asymétrique.

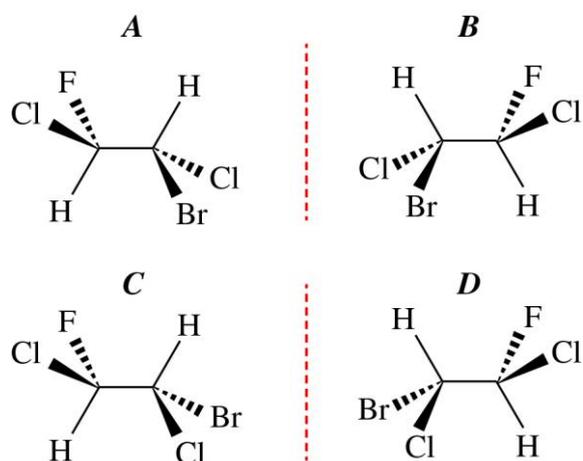
c.



d. On voit que le produit de l'action sur l'énantiomère du réactif de référence est l'énantiomère du produit de référence : la configuration du produit synthétisé dépend de la configuration du réactif, ce qui est la définition d'une réaction stéréospécifique.

Exercices de synthèse

29. Suivre la démarche proposée dans les pages d'aides en fin de manuel, page C-16.
 Pour la molécule FCICH-CHBrCl, on trouve :



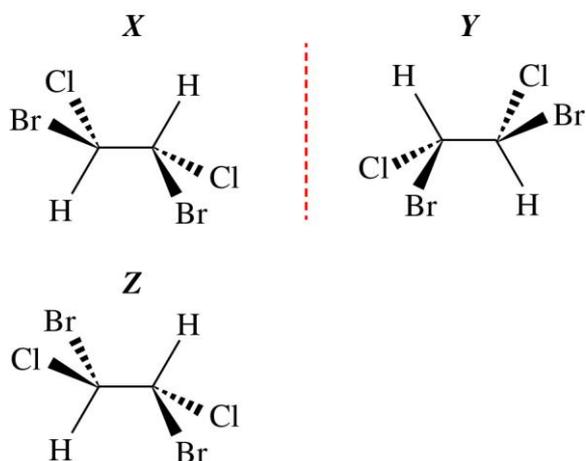
(A) et (B) sont images dans un miroir mais non superposables : énantiomères.

(C) est obtenu en échangeant les positions de Br et Cl sur le carbone 2 ; (A) et (C) ne sont pas identiques et ne sont pas images dans un miroir : ce sont des diastéréoisomères.

(D) est l'image de (C) dans un miroir et non superposable à (C) : (D) et (C) sont énantiomères.

D'où 4 stéréoisomères de configuration chiraux.

Pour la molécule BrClCH-BrClCH, on trouve :



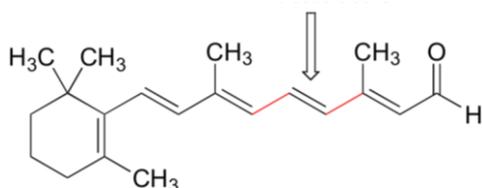
(Y) est l'image de (X) dans un miroir et ne sont pas superposables : ce sont des énantiomères.

(Z) diastéréoisomère de (X), est construite en échangeant Cl et Br sur le carbone 1 : (Z) possède un plan de symétrie, est identique à son image dans un miroir et n'est pas chirale. Cette molécule BrClCH-BrClCH a donc 3 stéréoisomères, deux chiraux et un achiral.

La différence mise en évidence entre les deux provient du fait que les atomes de carbone (1) et (2) de FCICH-CHBrCl sont liés à des atomes différents alors que les atomes de carbone (1) et (2) de BrClCH-BrClCH sont liés aux mêmes atomes H, Cl et Br ; ce qui donne un caractère symétrique à l'un des diastéréoisomères.

30. Dans le livre élève, la molécule du rétinol a été corrigée : deux liaisons ont été rajoutées sur le carbone en haut du cycle aromatique.

a. Le rétinol « tout E ».



Les atomes d'hydrogène liés aux atomes de carbone 4 et 5 se placent en position (E).

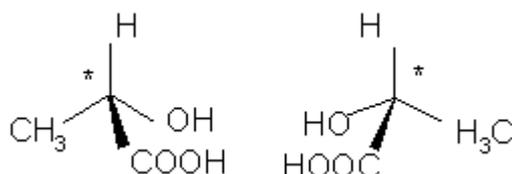
Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 14. Stéréoisomérisation des molécules organiques

b. La relation entre le rétinol Z et le rétinol « tout E » est une isomérisation de configuration : ce sont des diastéréoisomères. On peut parler de diastéréoisomérisation.

c. Le passage de la forme Z à la forme « tout E » nécessite une rupture de liaisons ; cette rupture nécessite de l'énergie qui est apportée par la lumière (énergie du photon vue en 1^{er} S)

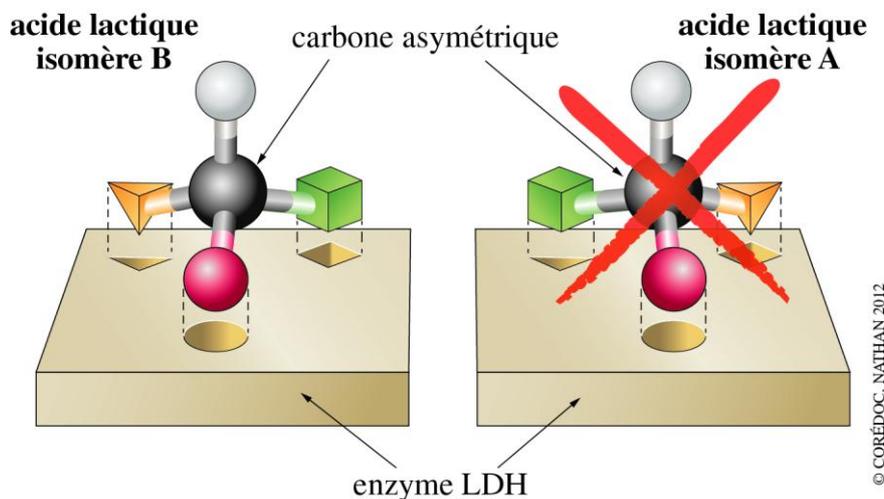
d. Si le rétinol « tout E » ne revenait pas en rétinol Z, la rétine ne pourrait plus être capable de percevoir de nouvelles lumières ; ce retour prend néanmoins un certain temps qui est comptabilisé dans le temps désigné comme « persistance rétinienne », de l'ordre de 1/10^e de seconde.

31. a. On voit que l'acide lactique contient un atome de carbone asymétrique : c'est une molécule chirale dont les deux isomères sont représentés ci-dessous avec la représentation de Cram :



b. L'isomère représenté dans le document 2, oxydé en présence de LDH, est le stéréoisomère B du document 1.

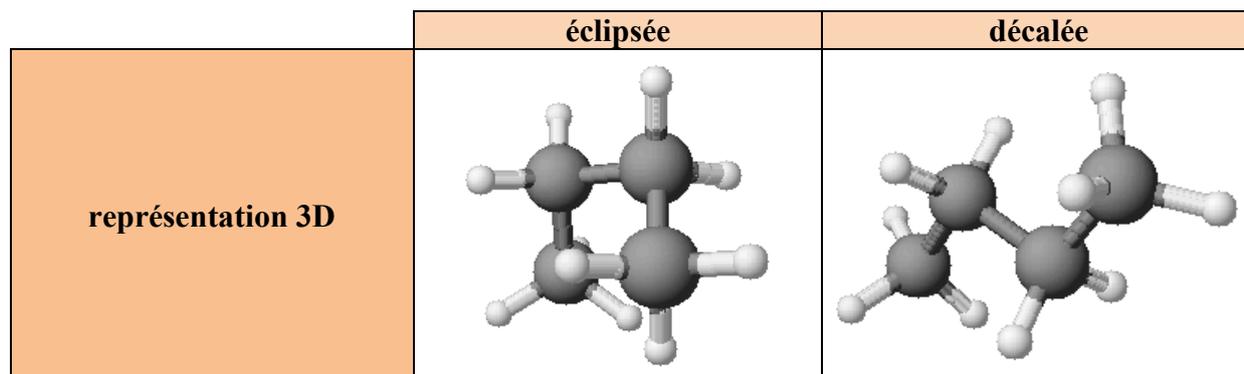
c. Les deux stéréoisomères de l'acide lactique sont chimiquement oxydables de façon identique ; mais leur oxydation est lente. On peut accélérer une transformation à l'aide d'un catalyseur (voir chapitre 13) enzymatique (ici la LDH) qui est un enchaînement d'acides aminés avec une stéréogéométrie particulière et qui n'agit que sur des stéréoisomères du fait de sites stéréospécifiques, propriété que l'on peut schématiser ainsi :



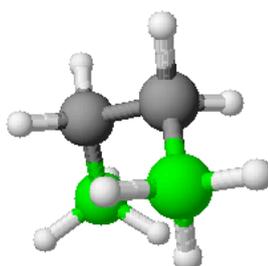
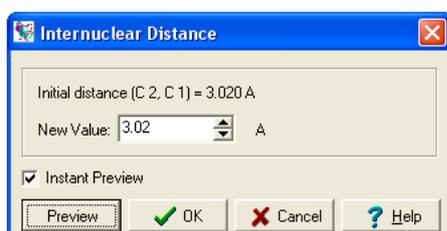
d. La main humaine est un objet chiral puisqu'elle n'est pas identique à son image dans un miroir ! Les deux énantiomères sont la main gauche et la main droite.

- Si une main interagit avec un objet achiral comme une balle sphérique, l'interaction est identique entre la main gauche et la balle ou entre la main droite et la balle.
- Si la main interagit avec un objet chiral, comme un gant : seule la main droite rentre dans le gant droit et la main gauche dans le gant gauche ; le gant, comme la LDH, se comporte comme un récepteur stéréospécifique.

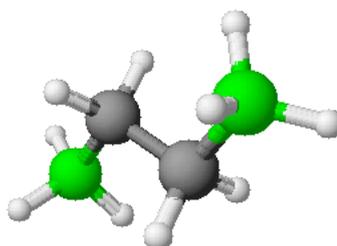
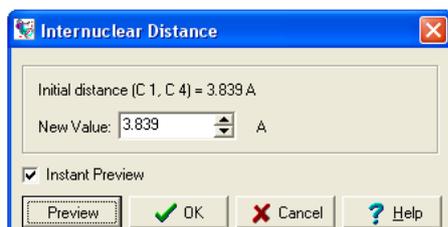
32. a. Résolution à l'aide de *Chemsketch*.



b.



$$D = 3,0 \times 10^{-10} \text{ m}$$



$$D = 3,8 \times 10^{-10} \text{ m}$$

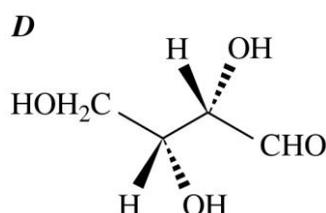
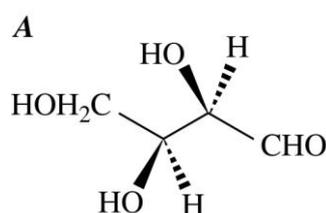
c. La distance est plus grande dans la conformation décalée. C'est donc la conformation décalée qui est la plus stable et la plus probable.

33. a. Formule développée du tétrose : HOCH₂-CH(OH)-CH(OH)-C $\overset{\text{H}}{\text{=O}}$

b. Le groupe caractéristique entouré en rouge est un groupe « aldéhyde » d'où le préfixe « aldo- ».

c. Les deux atomes de carbone asymétriques sont le 2° et le 3° (de la chaîne de 4 d'où « tétr »). Ils sont tétraédriques et sont liés à quatre groupes d'atomes différents.

d.

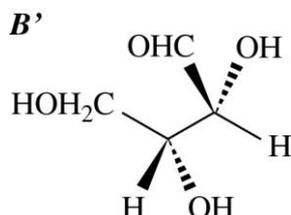


D est l'image de A par rapport à un miroir parallèle au plan de représentation : les liaisons en avant du plan dans A sont à l'arrière du plan dans D et réciproquement. Ces deux isomères sont des énantiomères.

e. Pour passer de l'isomère A à l'isomère B, on a échangé H et OH sur le carbone 2 de la chaîne, par contre le carbone 3 ne voit pas de changement : ces isomères ne sont pas image l'un de l'autre.

f. Les isomères A et B sont des diastéréoisomères car ils ne sont pas image l'un de l'autre dans un miroir.

g. Dans la molécule B', les groupements liés au carbone 3 vont se décaler du fait de la rotation (libre) autour de la liaison C-C.



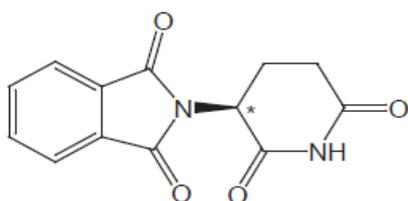
Type de stéréoisomérisie	Stéréoisomérisie
stéréoisomères de configuration	A, B, C et B'
énantiomères	C & B (et A & D)
diastéréoisomères	A & B ; A & C
stéréoisomères de conformation	B & B'

34. Proposition de synthèse de documents

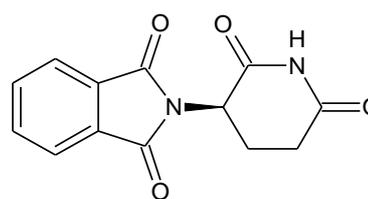
Les molécules présentées dans ces documents sont chirales, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas superposables à leur image dans un miroir plan ; ces molécules chirales possèdent un atome de carbone asymétrique, lié à quatre atomes ou groupes d'atomes différents.

Une molécule chirale et son image dans un miroir plan forment un couple d'énantiomères, et le mélange équimolaire de deux énantiomères est dit « mélange racémique ».

Le document 1 rapporte le drame de la thalidomide qui, administrée sous forme de racémique (les deux énantiomères en égale quantité), a été à l'origine de graves malformations fœtales ; sur les figures ci-dessous, on indique par * l'atome de carbone asymétrique et on représente les deux énantiomères :

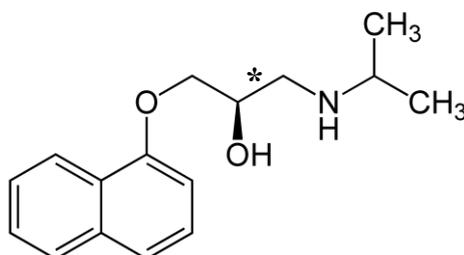


Énantiomère toxique S



Énantiomère non toxique R
antivomitif

La molécule de propranolol possède aussi un atome de carbone asymétrique* :

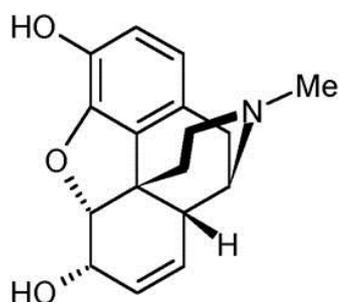


Les molécules de quinine et de morphine ont, quant à elles, plusieurs atomes de carbone asymétrique.

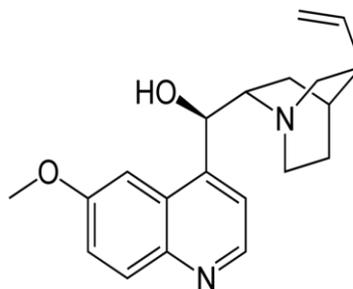
En quoi les propriétés de deux énantiomères sont-elles différentes au point d'être à l'origine de si graves conséquences ?

- Au niveau chimique, les énantiomères qui possèdent sur une même chaîne carbonée des groupes caractéristiques identiques, ont les mêmes propriétés (les vitesses de transformations peuvent éventuellement être différentes en cas de catalyse enzymatique) ;

- Par contre, d'après le document 1, on sait que l'action d'un médicament fait intervenir des processus biologiques impliquant des protéines dont les structures présentent des cavités chirales. Or, l'association d'un racémique (deux énantiomères) avec une protéine chirale peut donner des complexes diastéréoisomères d'énergie différente : la probabilité de formation de l'un des deux sera donc prépondérante ; l'énantiomère non complexé avec une première protéine peut parfois aller se fixer sur une autre provoquant d'autres effets.



Morphine



Quinine

Chapitre 15 – Transformations en chimie organique

Manuel pages 303 à 320

Choix pédagogiques

Le cours de ce premier chapitre présente tout d'abord la nomenclature des espèces chimiques polyfonctionnelles (les espèces monofonctionnelles ont été traitées au chapitre 6 ainsi que dans la fiche méthode 7). Conformément au programme, nous ne cherchons pas à déterminer le nom d'une molécule à partir de sa structure mais les groupes caractéristiques et la chaîne carbonée d'une molécule à partir de son nom. Pour éviter l'aspect souvent considéré comme « rébarbatif » de ce domaine, nous nous sommes restreints au strict minimum : quelques approfondissements figurent dans la fiche méthode 7.

L'objectif de la deuxième partie du cours est de familiariser l'élève avec la lecture des formules (topologiques ou non) dans le but d'identifier les modifications opérées lors d'une transformation : c'est en effet le premier chapitre où la réactivité des molécules et donc leurs modifications est envisagée. Les grandes catégories de réaction sont introduites : addition, élimination et substitution. Le classement se fait sans aucune considération mécanistique mais uniquement par comparaison entre le réactif et le produit ; nous avons choisi d'introduire la notion de réactif d'intérêt parce que dans la grande majorité des transformations, les réactifs n'ont pas le même statut et implicitement les modifications considérées sont celles du réactif d'intérêt.

Enfin, la partie finale est consacrée à un point de vue microscopique des transformations. Conformément au programme, on modélise les ruptures hétérolytiques de liaison par un transfert de doublet d'électrons (des cas de rupture homolytiques sont aperçus dans l'exercice 35). La notion d'électronégativité introduite en 1^{re} S est ici succinctement rappelée (elle est réinvestie également dans les exercices 32 et 36). À partir d'une liaison polarisée, on introduit la notion de donneur et d'accepteur de doublet d'électrons, notion que nous avons ensuite aisément généralisée aux atomes possédant un doublet non liant, une lacune électronique ainsi qu'aux double liaisons C=C.

Des animations, des vidéos documentaires et d'expériences illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et, certaines d'entre elles, sur les sites Internet compagnon Sirius.

Page d'ouverture

Le funambule est dans une situation de stress, son organisme produit de l'adrénaline à partir de phénylalanine.

La transformation choisie concerne une molécule biologiquement active, dont chacun a pu ressentir les effets (accélération du rythme cardiaque plus particulièrement).

Elle permet aussi de voir que certains groupes d'atomes du réactif ne sont pas modifiés : on retrouve le noyau aromatique dans le produit, une chaîne de trois atomes de carbone et un atome d'azote.

Activités

Activité documentaire 1. Classer des transformations

Commentaires

Dans un premier temps, cette activité a pour objectif de familiariser les élèves avec la « lecture » d'une transformation chimique et de leur permettre d'identifier clairement ce qui est transformé et ce qui ne l'est pas. Les exemples choisis sont volontairement très simples et ne font intervenir que les classes fonctionnelles au programme.

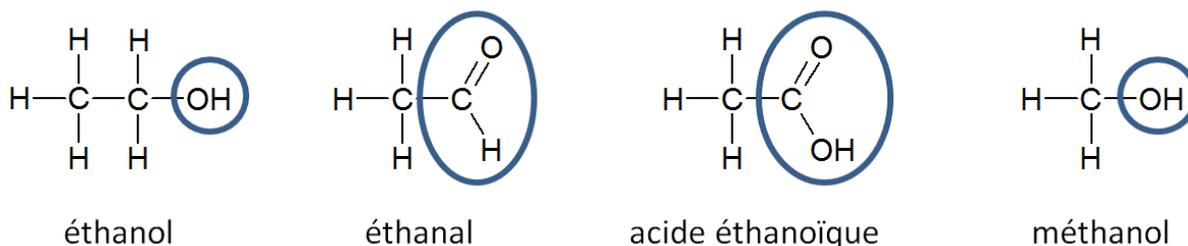
Dans un second temps, l'activité permet d'aborder la classification des transformations.

La troisième partie est facultative, elle permet de généraliser cet apprentissage de la « lecture » à des molécules plus complexes et biologiquement actives, conformément aux recommandations du programme ; on peut à cette occasion faire remarquer que des molécules de structure voisine (testostérone et œstradiol) ont des propriétés biologiques très différentes.

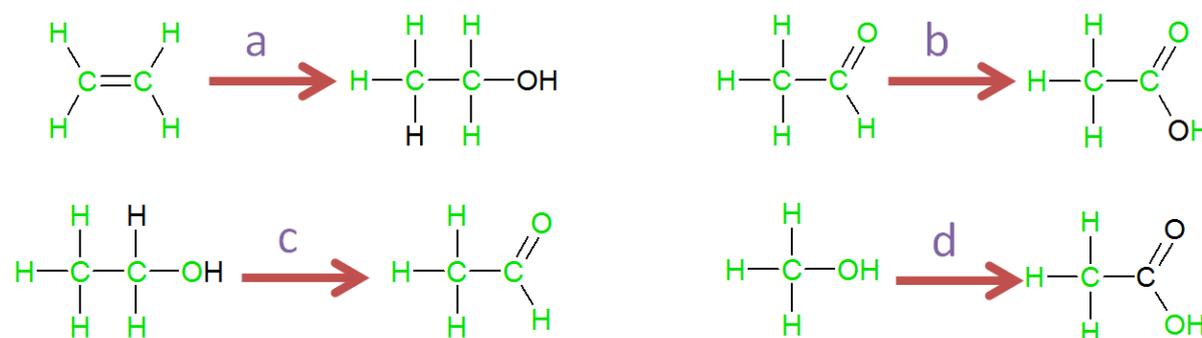
Réponses

1. Analyser le document

a.



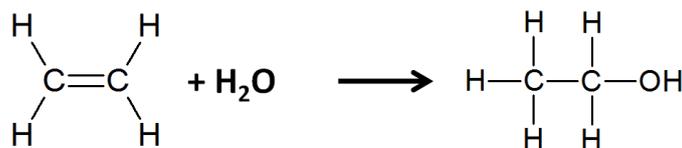
b.



2. Interpréter

Transformation (a)

a.



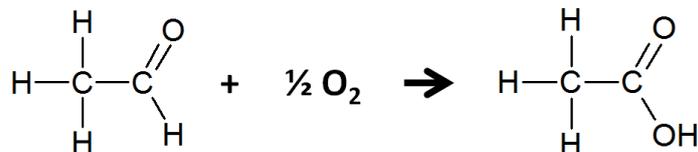
b. La chaîne carbonée a été modifiée.

c. Tous les atomes de la molécule d'eau se retrouvent dans l'éthanol : il s'agit d'une **addition**.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 15. Transformations en chimie organique

Transformation (b)

a.

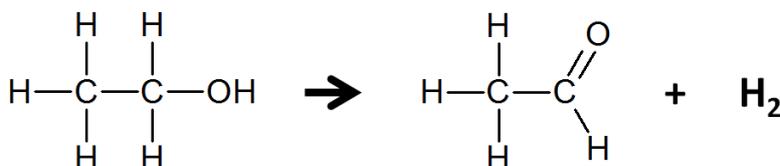


b. Le groupe caractéristique carbonyle a été modifié.

c. Aucun atome du réactif ne disparaît : il s'agit d'une **addition**.

Transformation (c)

a.

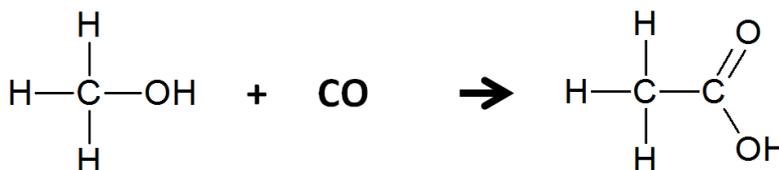


b. Le groupe caractéristique hydroxyle a été modifié.

c. Deux atomes du réactif ont été éliminés : il s'agit d'une **élimination**.

Transformation (d)

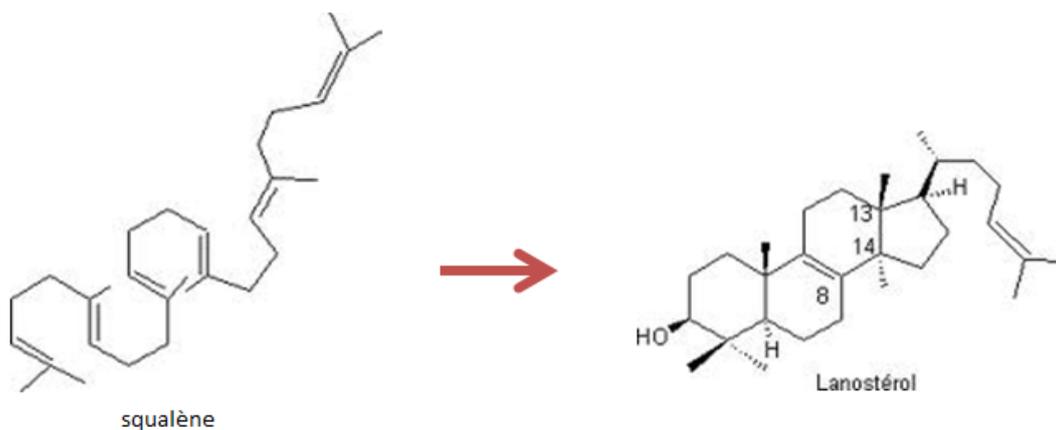
a.

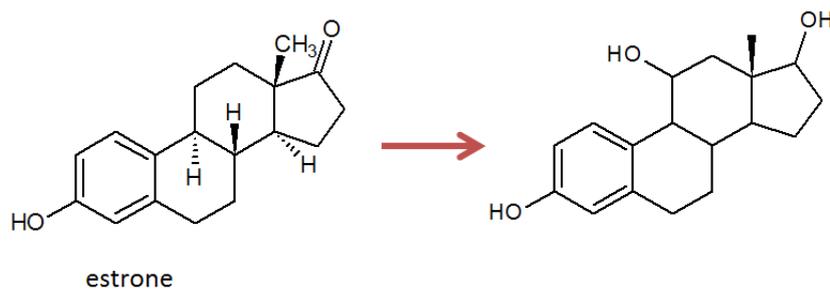
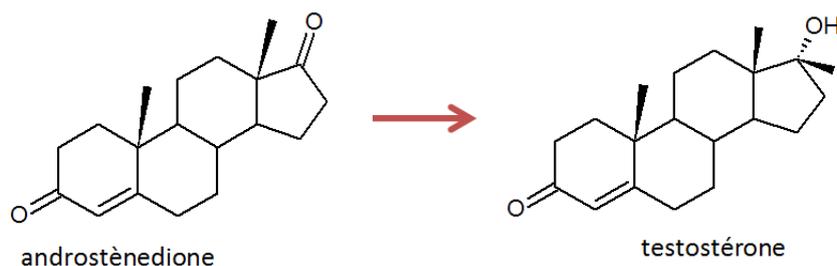


b. Le groupe caractéristique hydroxyle a été modifié et la chaîne carbonée a été allongée.

c. Deux atomes ont été ajoutés sur la molécule de réactif : il s'agit d'une **substitution**.

3. Application au milieu biologique





b. Squalène → lanostérol : il y a cyclisation donc modification de la chaîne carbonée et modification de groupe caractéristique (apparition d'un groupe hydroxyle).

La réaction est une **addition** : on ajoute un atome d'oxygène.

Androstènedione → testostérone : il y a modification de groupe caractéristique (aldéhyde → alcool) et aussi de chaîne carbonée (ramification du cycle de droite).

Il s'agit là aussi d'une **addition** de deux atomes d'hydrogène.

Estrone → estradiol : il y a modification de groupe caractéristique (aldéhyde → alcool).

Activité documentaire 2. Les réactifs de Grignard

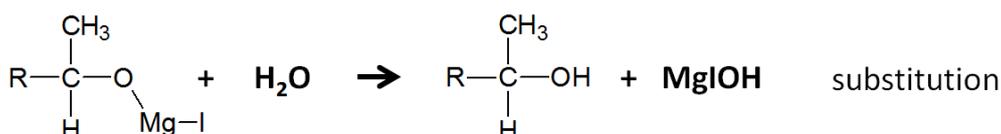
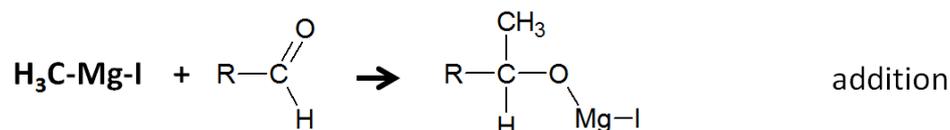
Commentaires

Cette activité est construite pour familiariser les élèves avec la synthèse de documents. Les questions de la partie « Analyser les documents » doivent les aider à extraire les principales informations du texte. Par ailleurs, elle permet de revoir la notion d'électronégativité abordée en 1^{re} S, et de faire émerger son rôle dans la formation de nouvelles liaisons.

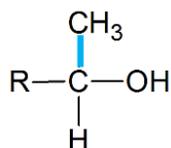
Réponses

1. Analyser les documents

- On remarque que la multiplicité des atomes que l'on note aujourd'hui en indice apparaissait alors en exposant.
- On appelle espèce chimique organométallique une espèce chimique dans laquelle existe une liaison covalente métal-carbone.
- Saytzeff a déjà utilisé des espèces chimiques organométalliques contenant le métal zinc ; Barbier, quant à lui, a utilisé des espèces contenant le magnésium.
- Grignard forme des alcools dont le groupe caractéristique est le groupe hydroxyle.
- La réaction de Grignard est rapide et se fait avec de bons rendements.
-



g.



2. Interpréter les documents

- L'électronégativité de O est plus grande que celle de C, la liaison C=O est donc polarisée et C porte la charge partielle positive.
- L'électronégativité de Mg est plus petite que celle de C, la liaison C-Mg est donc polarisée et C porte la charge partielle négative.
- L'atome qui porte une charge partielle négative possède un excès d'électrons, il peut donner un doublet d'électrons.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 15. Transformations en chimie organique

d. Dans CH_3I , l'atome de carbone possède une charge partielle positive (I plus électronégatif que C) : les deux atomes de carbone qui doivent former la nouvelle liaison C-C possèdent une charge partielle positive, aucun d'eux ne peut jouer le rôle de « donneur ».

L'utilisation de Mg permet « d'inverser » la polarité de l'atome de carbone et en fait un donneur de doublet d'électrons. On parle d'**umpolung** (du terme allemand signifiant inversion).

Exercices d'application

5 minutes chrono !

1. Mots manquants

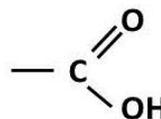
- tous les ; tous les
- deux
- remplacé
- électronégatif ; liaison
- moins
- donneur
- donneur ; accepteur
- donneur

2. QCM

- Addition.
 - De carbone porte une charge partielle positive.
 - Polarisée.
 - C'est un site donneur de doublet d'électrons.
 - D'oxygène n°2 vers l'atome de carbone.
-

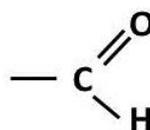
Compétences exigibles

3. a. Un groupe hydroxyle -OH et un groupe carboxyle :

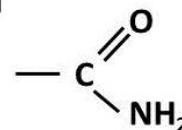


b. Un groupe amino -NH₂ et un groupe hydroxyle : -OH.

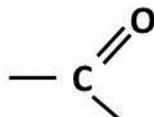
c. Un groupe hydroxyle -OH et un groupe carbonyle :



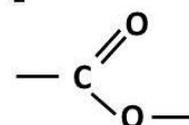
d. Un groupe amino -NH₂ et un groupe caractéristique des amides :



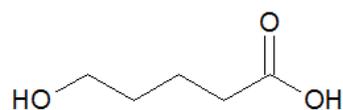
e. Un groupe carbonyle



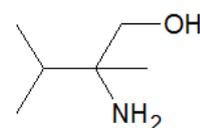
et un groupe caractéristique des esters :



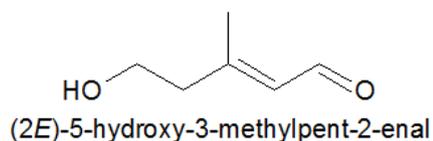
Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 15. Transformations en chimie organique



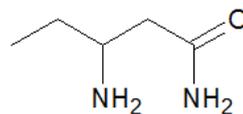
acide 5-hydroxypentanoïque



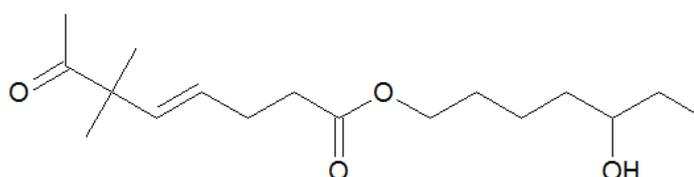
2-amino-2,3-diméthylbutan-1-ol



(2E)-5-hydroxy-3-méthylpent-2-enal



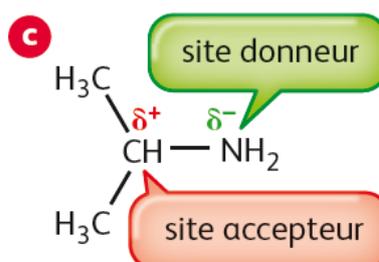
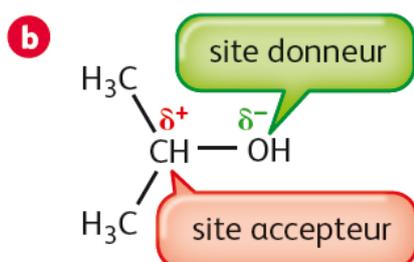
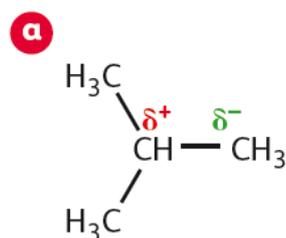
3-aminopentanamide

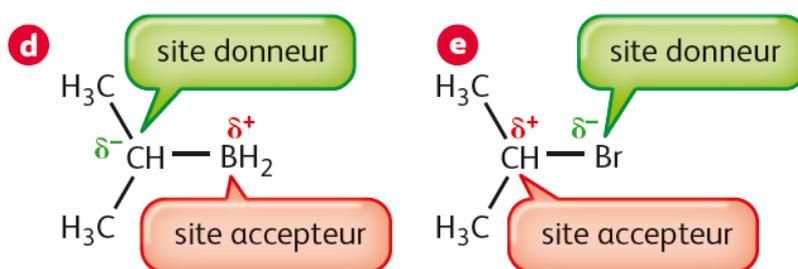


4. $A \rightarrow B$: chaîne et groupe ;
 $A \rightarrow C$: chaîne et groupe ;
 $A \rightarrow D$: chaîne ;
 $A \rightarrow E$: chaîne et groupe ;
 $A \rightarrow F$: chaîne ;
 $A \rightarrow G$: chaîne et groupe.

5. a. Addition : le produit contient tous les atomes de tous les réactifs.
b. Substitution : l'atome d'iode est remplacé par le groupe d'atomes NH_3 .
c. Élimination : deux groupes d'atomes, H et OH sont détachés du réactif.

6. a. b. et c.

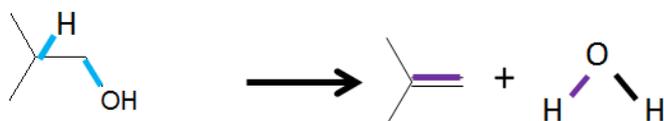
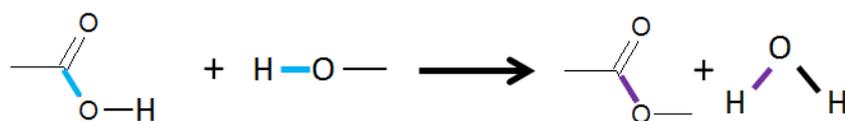
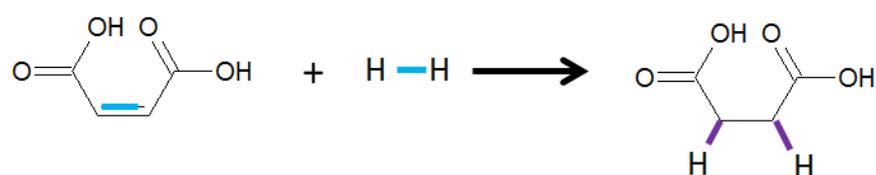




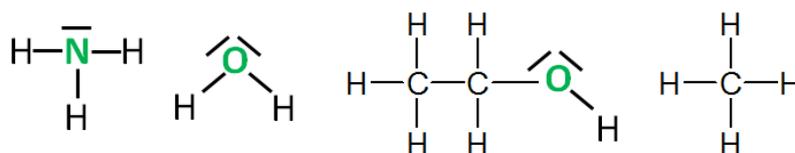
7.

— : liaison rompue

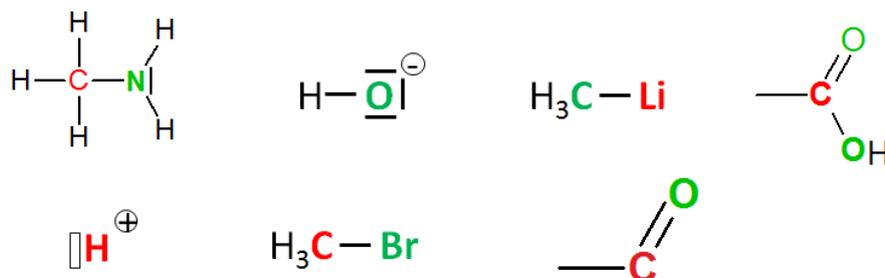
— : liaison créée



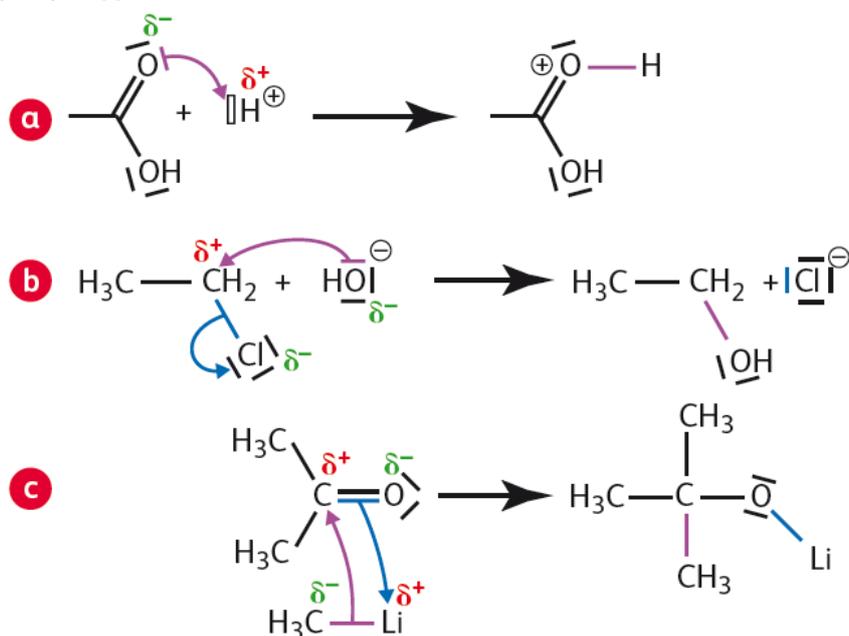
8. a.



b. en **rouge** : atomes accepteurs
 en **vert** : atomes donneurs



9. —: liaison formée



Compétences générales

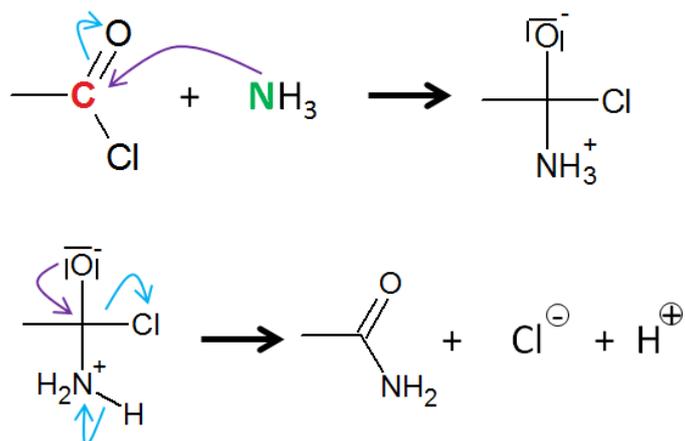
10. a. Réactif : C₄H₈O₂ ; produit : C₆H₁₀O₃.

b. Par différence, le second produit formé a pour formule brute : C₂H₆O.

c. Il s'agit de l'éthanol : H₃C-CH₂-OH.

d. Il s'agit d'une substitution : l'atome H sur le C en α de C=O est remplacé par H₃C-C=O.

11.



Exercices de méthode

12. Exercice résolu.

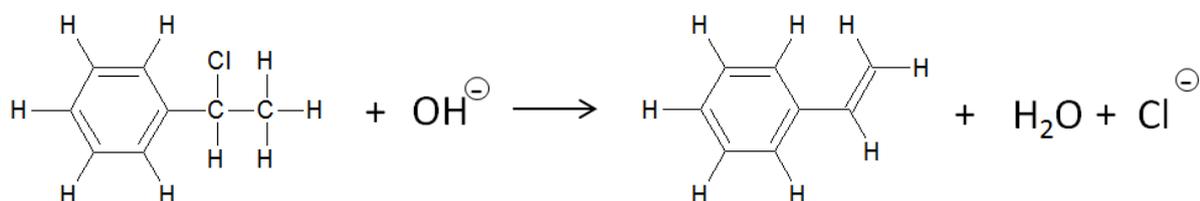
13. 1. a. La première représentation (formule brute) est celle qui donne le moins d'informations ; elle permet toutefois de vérifier la conservation de la matière.

b. Première représentation : un ion hydroxyde réagit avec une espèce chimique de formule brute C₄H₉Br pour former une espèce de formule brute C₄H₁₀O et un ion bromure.

Deuxième représentation : une nouvelle liaison se forme entre un atome d'oxygène, donneur de doublet d'électrons et un atome de carbone accepteur ; dans le même temps, la liaison C-Br se rompt, le doublet d'électrons de la liaison rompue est attiré par l'atome de Br.

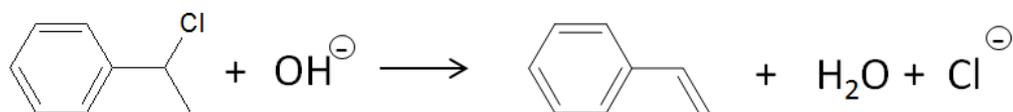
Troisième représentation : un ion hydroxyde réagit avec le 2-bromobutane pour donner du butan-2-ol et un ion bromure.

2. a.



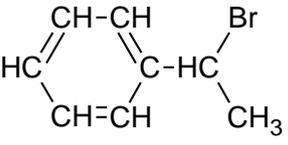
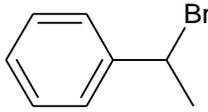
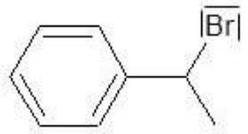
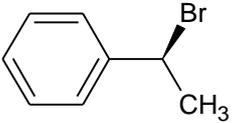
L'écriture des noyaux aromatiques est lourde.

b.

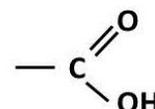


Cette écriture ne permet pas de visualiser la rupture d'une liaison C-H.

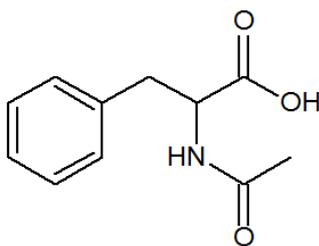
c. et d. Voir tableau page suivante.

Représentation	Exemple	Avantages	Inconvénients
Formule brute	C_8H_9Br	Écriture rapide. Permet d'équilibrer les équations-bilan. Permet de calculer la masse molaire.	Ne permet pas d'identifier la chaîne carbonée, et les groupes caractéristiques.
Formule semi-développée		Permet d'identifier la chaîne carbonée, et les groupes caractéristiques de la molécule.	Longue à écrire. Ne permet pas de visualiser la configuration d'une molécule chirale.
Formule topologique		Écriture rapide. Permet d'identifier la chaîne carbonée et les groupes caractéristiques.	Ne permet pas de visualiser la configuration d'une molécule chirale.
Formule de Lewis		Permet de visualiser les doublets d'électrons et les lacunes pour identifier atomes donneurs et atomes accepteurs.	Long à écrire. Ne permet pas de visualiser la configuration d'une molécule chirale.
Formule de Cram		Permet de visualiser la configuration d'une molécule chirale.	Ne permet pas de visualiser les doublets d'électrons et les lacunes pour identifier atomes donneurs et atomes accepteurs.

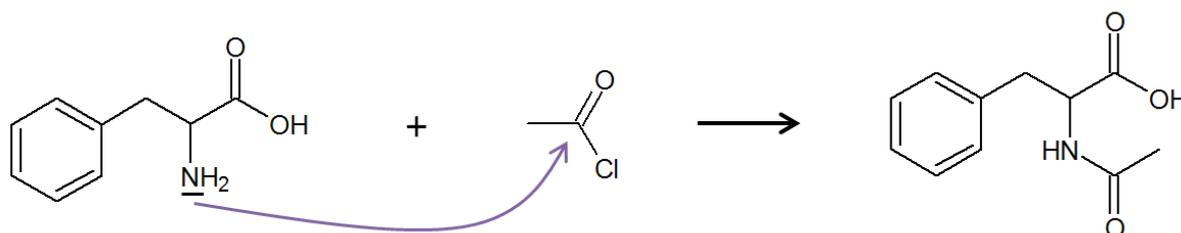
14. a. La phénylalanine possède les groupes caractéristiques amino $-NH_2$ et carboxyle



b.



c.



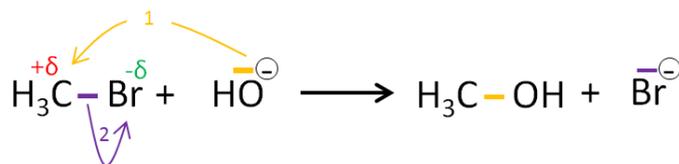
Exercices d'entraînement

15. a. Substitution : atome H du noyau aromatique remplacé par H₃C-C=O.
 b. Élimination : on détache C=O et O du réactif ; le mécanisme de la décarboxylation est un mécanisme circulaire à 6 centres.
 c. Substitution : un atome H de l'azote est substitué par H₃C-C=O.
 d. Élimination : un atome H du noyau aromatique et l'atome de Cl sont éliminés du réactif.

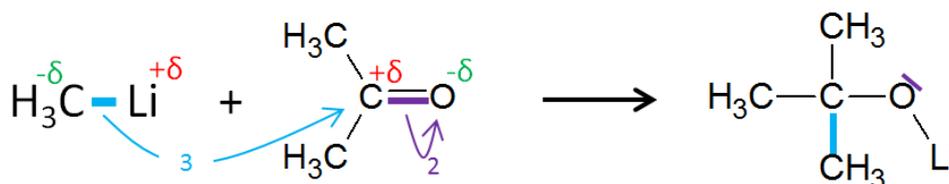
16. L'élève doit organiser clairement la biographie : il pourra par exemple faire apparaître les rubriques suivantes : formation - travaux de recherche - récompense.
 Cette biographie devrait replacer les travaux de Pauling dans leur contexte historique (état des connaissances) et expliquer leur importance majeure dans le domaine de la chimie.

17. Dans le spécimen, le lien Internet source ne fonctionnant plus, il a été remplacé dans le manuel élève par le lien Internet suivant : <http://www.umaine.edu/chemistry/>

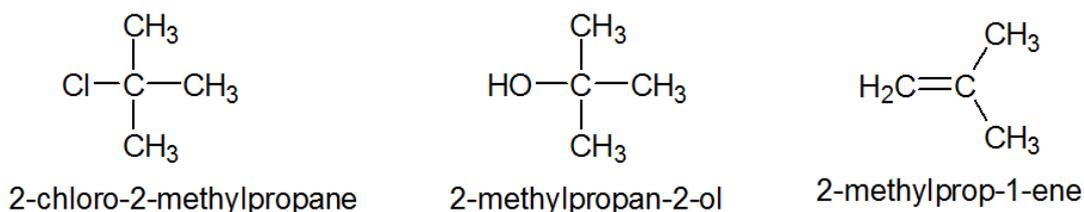
- a. $\chi(\text{Br}) > \chi(\text{C})$



- b.

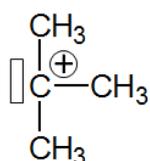


18. a.



- b. Dans les deux cas, c'est la liaison C^{+δ}-Cl^{-δ} qui est rompue.

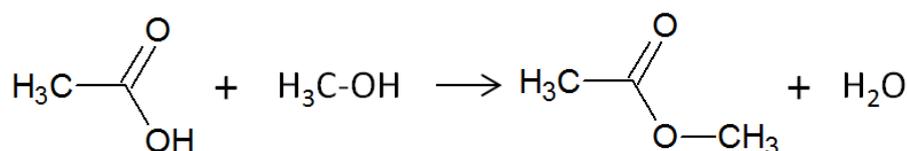
- c.



d.

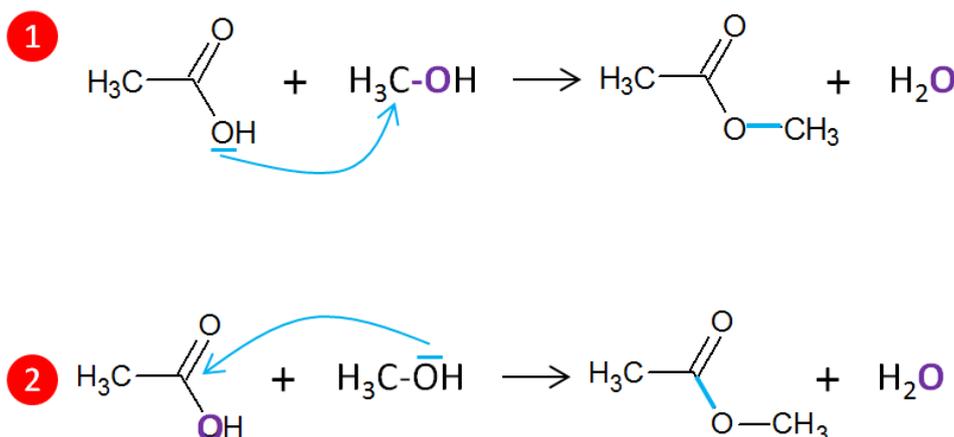


19. a.



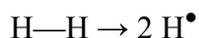
Il se forme une molécule d'eau.

b. Les deux liaisons susceptibles d'avoir été formées sont les deux liaisons C-O simples.

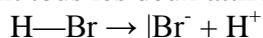


d. Le marquage isotopique indique que l'atome d'oxygène du méthanol se retrouve dans l'ester ; c'est donc l'hypothèse 2 ci-dessus qui est en accord avec les résultats expérimentaux.

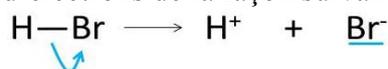
20. Dans la molécule H_2 , les deux électrons de la liaison covalente entre les atomes H sont distribués équitablement entre les deux atomes. En cas de rupture de la liaison, chaque atome conserve un électron, de façon parfaitement symétrique, et on forme des espèces hautement réactives :



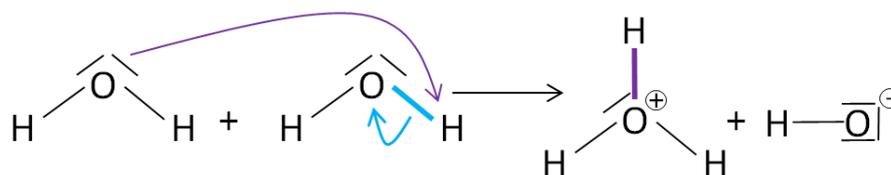
En revanche, dans le cas de la molécule $\text{H}-\text{Br}$, les deux électrons de la liaison covalente sont davantage attirés par Br que par H. On dit que Br est plus électronégatif que H. En cas de rupture de la liaison, les électrons sont tous les deux attirés par Br, de façon dissymétrique :



On peut représenter le transfert d'électrons de la façon suivante :



21. a. c. et d.



b. $\chi(\text{H}) < \chi(\text{O})$ donc H possède une charge partielle $+\delta$ et O une charge partielle $-\delta$.

22. a. En sciences, le symbole Δ représente une différence. L'abscisse $\Delta\chi$ correspond à une différence d'électronégativité (en valeur absolue), entre les éléments A et B de la liaison étudiée.

Pour une liaison covalente non polarisée, $\Delta\chi = 0$; ceci correspond à la partie gauche du graphique.

b. et c. $\Delta\chi(\text{H}_2) = 0 \Rightarrow$ le pourcentage ionique de la liaison est nul.

$\Delta\chi(\text{HCl}) = 3,16 - 2,20 = 0,96 \Rightarrow$ le pourcentage ionique de la liaison est de 8 % ; H est un site accepteur et Cl un site donneur de doublet d'électrons.

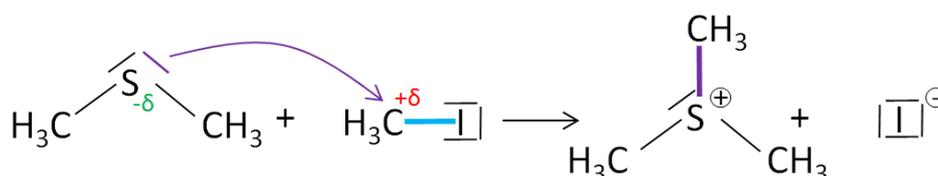
$\Delta\chi(\text{NaCl}) = 3,16 - 0,93 = 2,23 \Rightarrow$ le pourcentage ionique de la liaison est de 90 % environ ; la liaison ne peut pas être modélisée par une liaison covalente.

$\Delta\chi(\text{MgO}) = 3,44 - 1,31 = 2,13 \Rightarrow$ le pourcentage ionique de la liaison est de 85 % environ ; la liaison ne peut pas être modélisée par une liaison covalente.

$\Delta\chi(\text{CsF}) = 3,98 - 0,79 = 3,19 \Rightarrow$ le pourcentage ionique de la liaison est supérieur à 90 % environ ; la liaison ne peut pas être modélisée par une liaison covalente.

La valeur $\chi(\text{Cs}) = 0,79$ ne se trouve pas dans la table d'électronégativité du manuel.

23. a. b. et d.



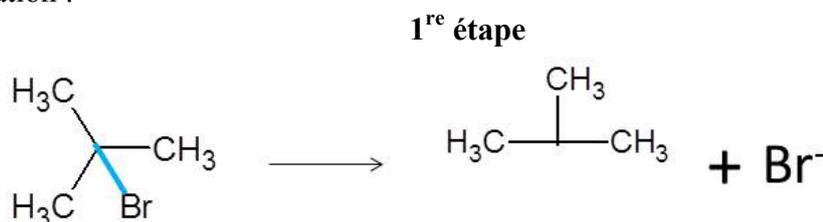
c. $\chi(\text{S}) > \chi(\text{C})$ donc S est l'atome donneur de doublet d'électrons et C l'atome accepteur, ainsi la flèche qui modélise le transfert est issue de S et pointe vers C.

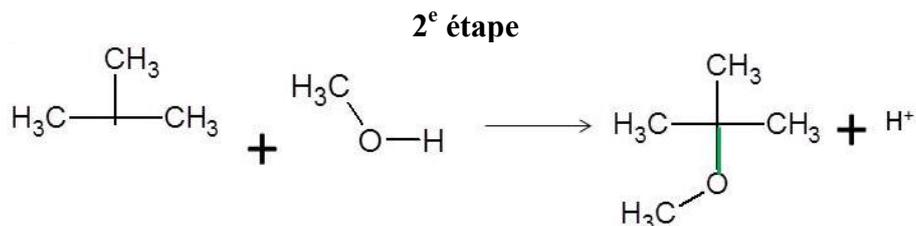
24. a. Carbone, noir ; hydrogène, rouge ; oxygène, bleu et brome violet.

b. Animation 1 : les réactifs sont $(\text{CH}_3)_3\text{C}-\text{Br}$ et CH_3OH .

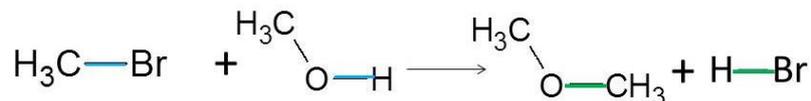
Animation 2 : CH_3-Br et CH_3O^- .

c. 1^{re} modélisation :

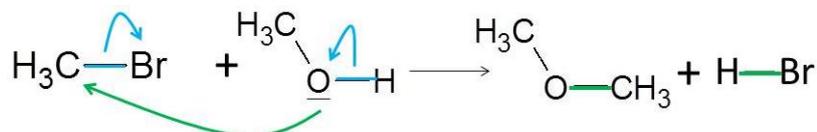




2^e modélisation :

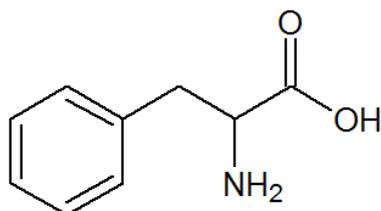


d.

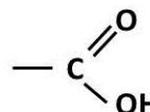


25. a. La phénylalanine possède le groupe amino $-\text{NH}_2$ et carboxyle :

b.



phénylalanine

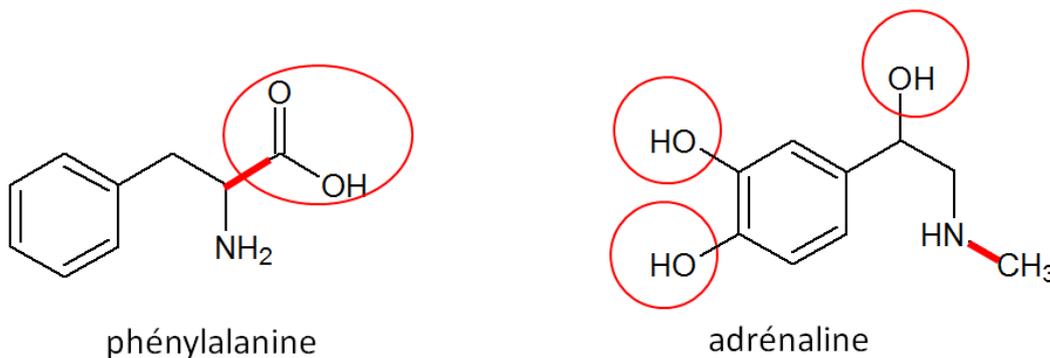


c. L'atome de carbone qui porte le groupe amino possède quatre substituants différents, c'est un carbone asymétrique. C'est le seul atome de carbone asymétrique, donc la molécule est chirale.

De même, l'atome de carbone qui porte le groupe hydroxyle est le seul atome de carbone asymétrique de la molécule d'adrénaline, donc la molécule est chirale.

d. L'adrénaline possède les groupes caractéristiques suivants : hydroxyle $-\text{OH}$ et amino $-\text{NH}$

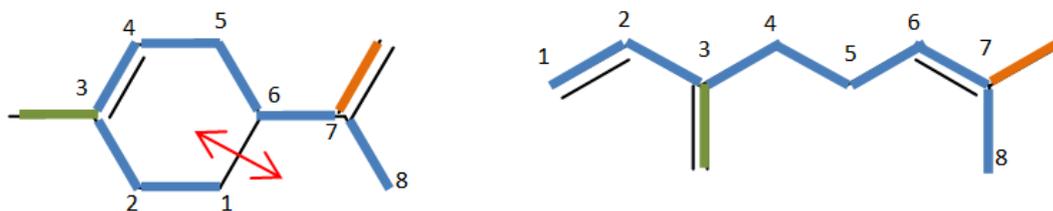
e.



Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 15. Transformations en chimie organique

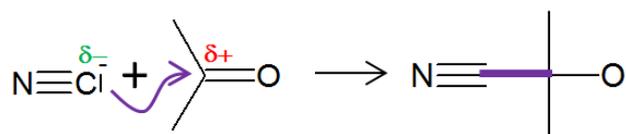
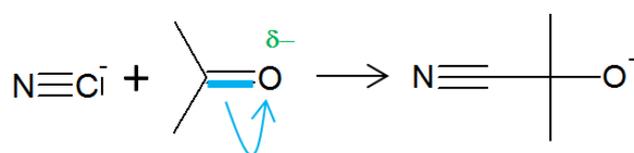
26. a. Limonène et myrcène ont même formule brute : $C_{10}H_{16}$; ce sont des isomères de constitution.

b.

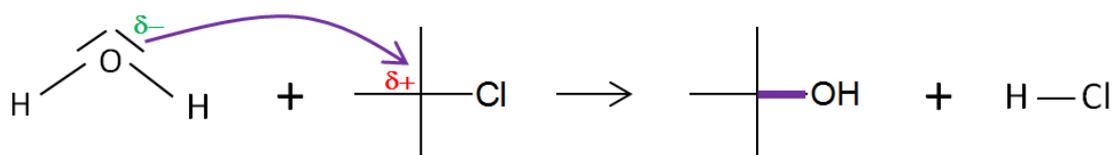
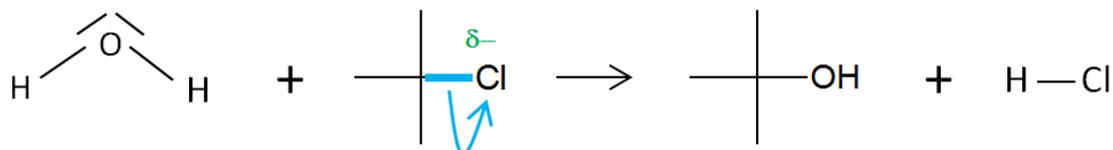


c. On a représenté par une double flèche rouge la liaison à créer à partir du myrcène pour obtenir le limonène ; il s'agit des atomes numérotés 1 et 6.

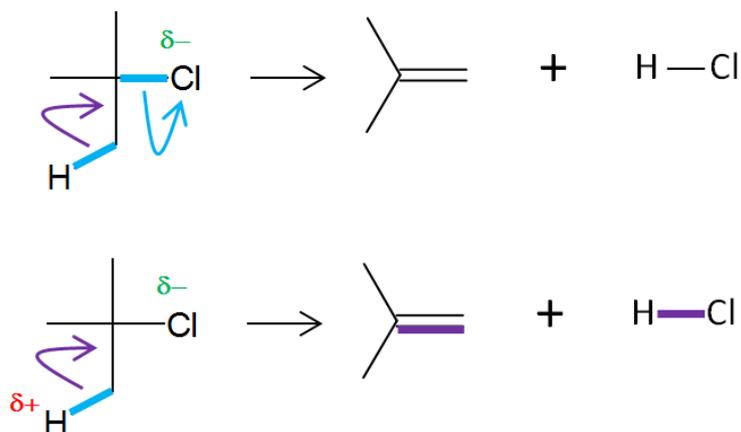
27. Transformation α : addition



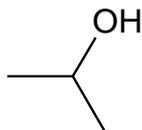
Transformation β : substitution



Transformation γ : élimination



28. a. Le composé présente la bande caractéristique des liaisons O-H ; cette hypothèse est confirmée par le pic à 5,2 ppm du spectre de RMN. D'autre part à 4ppm, le signal qui intègre pour 1H est un 7-uplets, on propose :



b. et c. $\text{CH}_3\text{-CHBr-CH}_3 + \text{HO}^- = \text{CH}_3\text{-CH(OH)-CH}_3 + \text{Br}^-$: il s'agit d'une substitution.
 $\text{CH}_3\text{-CHBr-CH}_3 + \text{HO}^- = \text{CH}_3\text{-CH=CH}_2 + \text{Br}^- + \text{H}_2\text{O}$: il s'agit d'une élimination.

d.

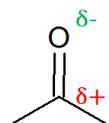


Exercices de synthèse

29. a. Lors de la transformation étudiée, une liaison C-C se forme.

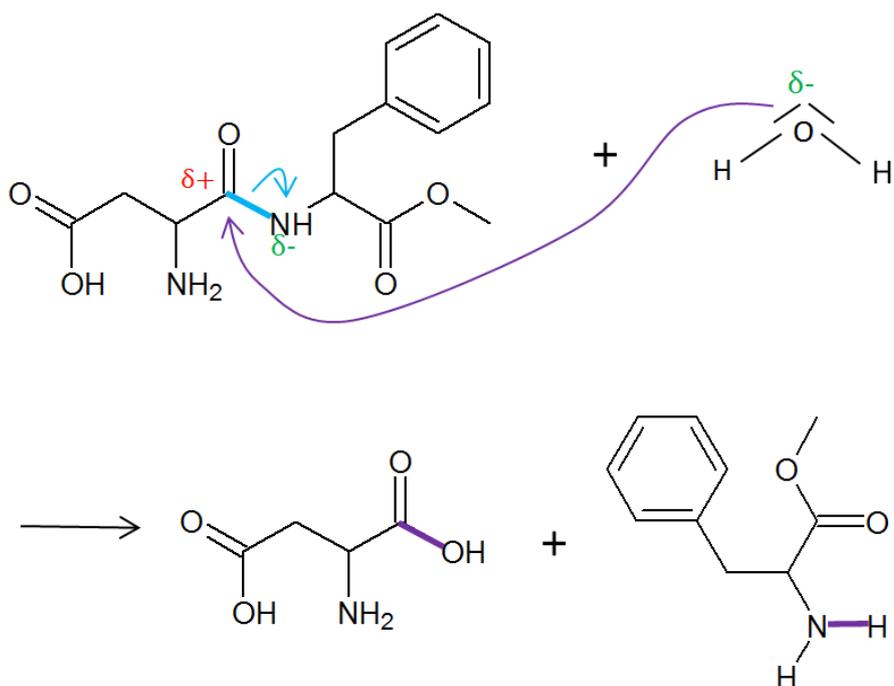
Il est donc nécessaire qu'un atome de carbone joue le rôle de donneur.

On voit ci-dessous que sans Mg, les deux atomes de carbone entre lesquels s'établit la liaison portent une charge partielle positive ; tandis qu'en présence de Mg, l'un des atomes porte une charge partielle négative et peut jouer le rôle de donneur :

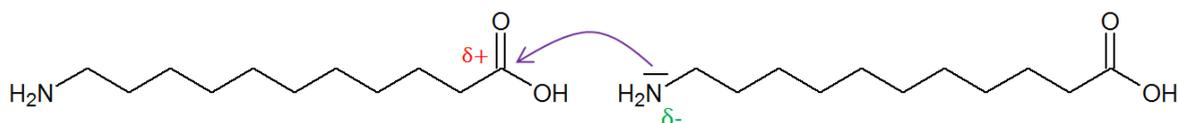


30. a. L'aspartame possède un groupe caractéristique des amides, un groupe caractéristique des esters, un groupe carboxyle et un groupe amino.

b. et c.



31. a. c. d. et e.



b. L'acide 11-aminoundécanoïque possède un groupe amino et un groupe carboxyle.

f. $2 \times \text{C}_{11}\text{H}_{23}\text{O}_2\text{N} = \text{C}_{22}\text{H}_{44}\text{N}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$

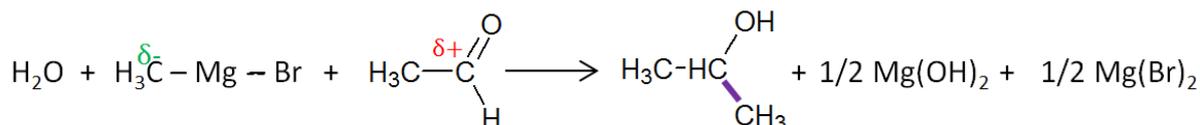
g. De l'eau se forme conjointement au rilsan.

h. Le rilsan appartient à la famille des polyamides.

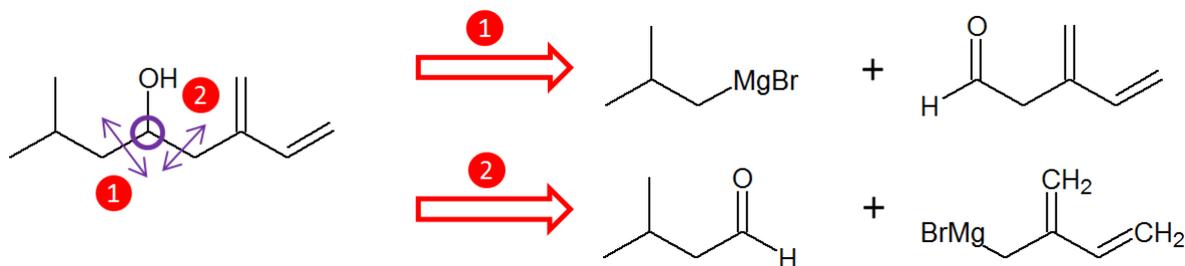
Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 15. Transformations en chimie organique

- 32. a.** En ordonnée : l'électronégativité noté χ ; en abscisse, le numéro atomique Z .
b. Les éléments $Z = 2$, $Z = 10$ c'est-à-dire les gaz nobles n'apparaissent pas dans l'échelle de Pauling.
c. L'évolution de χ en fonction de Z est globalement la même sur les quatre échelles.
d. L'élément le plus électronégatif pour ces trois échelles est le fluor $Z = 9$.
e. Sur une période, l'électronégativité augmente ; pour les périodes au-delà de 3, l'évolution n'est plus monotone.
f. χ diminue légèrement sur une colonne de la classification périodique.

33. a. et b.

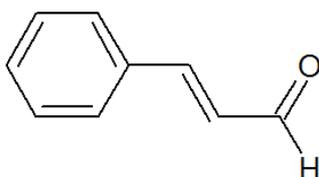


c. Il existe deux possibilités pour obtenir le produit attendu :



34. a. La molécule de benzaldéhyde possède le groupe caractéristique des aldéhydes ; le (E)-3-phénylprop-2-énal possède une double liaison C=C et le groupe caractéristique des aldéhydes.

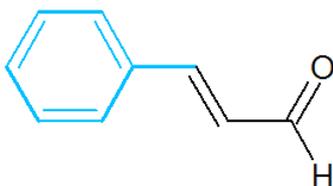
b. Formule du cinnamaldéhyde :



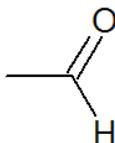
c. La molécule possède le diastéréoisomère (Z).

d. La molécule de cinnamaldéhyde possède 5 doubles liaisons conjuguées, le benzaldéhyde 4 ; donc la spectroscopie UV semble bien adaptée pour suivre l'évolution de la transformation.

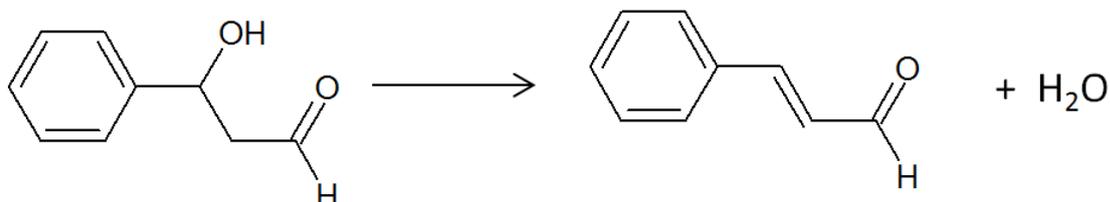
e.



f. Le cinnamaldéhyde possède deux atomes de C de plus que le benzaldéhyde, on propose donc comme aldéhyde :



g.



h. Il s'agit d'une élimination.

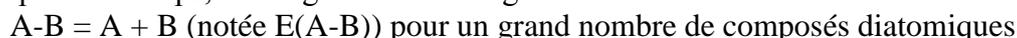
35. a. La première réaction est une addition : le produit de réaction contient tous les atomes de tous les réactifs ; la transformation (b) est une substitution.

b. Dans les deux cas, les liaisons sont non polarisées ou faiblement polarisées ; on ne peut pas mettre en évidence de donneurs et d'accepteurs de doublets.

c. On obtient des espèces radicalaires : H_2C^\cdot , H^\cdot et Cl^\cdot .

36. Proposition d'une synthèse de documents

Dans un premier temps, Pauling mesure l'énergie libérée lors de la transformation :



Il compare ses résultats expérimentaux à l'hypothèse suivante :

$$E(\text{A-B}) = \frac{1}{2} E(\text{A-A}) + \frac{1}{2} E(\text{B-B})$$

et observe que l'hypothèse n'est pas vérifiée pour des composés dont l'un des atomes attire à lui les électrons de la liaison : l'écart entre l'hypothèse et les résultats expérimentaux est d'autant plus grand que l'un des atomes de la molécule attire à lui le doublet d'électrons de la liaison.

Il a alors l'idée d'utiliser cet écart pour quantifier l'électronégativité des atomes. Ainsi, les valeurs obtenues sont bien en accord avec les classifications qualitatives antérieures.

Les gaz nobles sont des gaz inertes pour lesquels on n'obtient pas aisément de molécules hétéroatomiques, c'est pourquoi la méthode de Pauling ne permet pas d'obtenir de valeur d'électronégativité pour ces éléments.

Chapitre 16 – Théorie de Brönsted. Notion d'équilibre chimique

Manuel pages 321 à 342

Choix pédagogiques

Les compétences et connaissances relatives à la partie « Réaction chimique par échange de protons » du programme de Terminale S sont réparties dans les chapitres 16 et 17.

Le chapitre 16 débute par l'évocation des solutions acido-basiques, la notion de pH et les méthodes de mesure de pH. Le produit ionique de l'eau est défini comme une constante, dépendant de la température, reliant, en solution, les concentrations en ion H_3O^+ et HO^- . Les notions de couple acide/base au sens de Brönsted-Lowry et de réactions acido-basiques sont ensuite introduites. L'étude expérimentale de ces réactions montre que leur avancement final n'est pas toujours égal à leur avancement maximal et permet ainsi de classer les réactions en deux catégories : les réactions quasi-totales et les réactions équilibrées. Les acides et les bases sont alors classés en deux familles en fonction de leur réaction avec l'eau. Les acides et bases forts réagissent de façon quasi-totale avec l'eau quelles que soient leurs concentrations, alors que les réactions des acides et des bases faibles avec l'eau sont équilibrées. Le chapitre s'achève avec le calcul du pH de solution d'acides et de base forts.

Des animations et des vidéos documentaires illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et, certaines d'entre elles, sur les sites Internet compagnon Sirius.

Page d'ouverture

Vue des concrétions et des vasques créées par les sources chaudes du volcan Dallol

La légende de la photographie évoque l'acidité des sources, ce qui peut être l'occasion de réactiver les notions de solution acido-basique et de pH introduites en classe de 3^e.

Activités

Activité expérimentale 1. Mesurer le pH d'une solution aqueuse

Commentaires

Cette activité se décompose en deux parties : la première permet de familiariser les élèves avec l'utilisation du pH-mètre (étalonnage, mesure et incertitude), de classer des solutions courantes en fonction de leur acidité et d'introduire l'usage des fonctions $x \mapsto \log x$ et $x \mapsto 10^x$ afin d'exploiter la relation $\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+]$. Les solutions basiques utilisées (eau de javel, déboucheur) doivent être diluées, tant pour des raisons de sécurité que pour ménager les électrodes de verre.

La seconde partie est une démarche d'investigation construite autour de la question « comment modifier le pH de l'eau d'un aquarium ? ». Son objectif est l'identification des paramètres susceptibles de modifier le pH d'une solution :

- La dilution conduit à l'augmentation du pH d'une solution acide et à la diminution du pH d'une solution basique mais ne peut conduire à la formation d'une solution basique à partir d'une solution acide (et réciproquement).
- Le mélange de solutions acide et basique peut être acide ou basique en fonction des quantités de solution apportées et de leur pH.

Pour simuler une eau d'aquarium de pH 8, on peut préparer une solution d'hydrogénocarbonate de sodium de concentration $1,0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Le professeur peut choisir de mettre à disposition des solutions de même nature mais de concentrations et donc de pH différent (acide chlorhydrique et soude à différentes concentrations).

La démarche peut conduire à une exploitation plus complexe si des solutions différentes mais de même pH sont proposées :

- Tampon acétique de pH 4 à des concentrations différentes ($0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ou $0,01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) ; acide chlorhydrique de pH 4 ($1,0 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) ;
- Tampon ammoniacal de pH 9 à des concentrations différentes ($0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ou $0,01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) ; soude de pH 9 ($1,0 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$).

Le professeur peut choisir de n'indiquer que le pH de la solution sur le flacon.

L'expérience permettra de montrer que le pH d'une solution ne suffit pas à caractériser les propriétés acido-basiques de la solution et à s'interroger ainsi sur leur contenu.

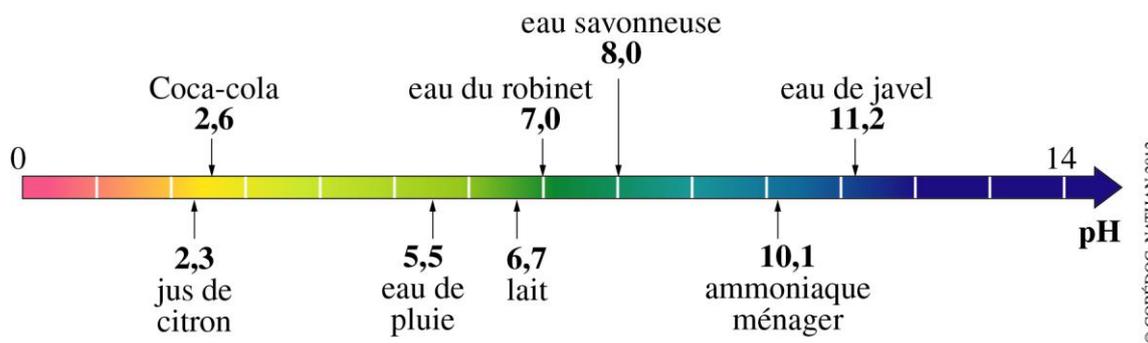
Matériel mis à disposition des élèves :

- pH-mètre et solutions étalon ;
- agitateur magnétique et barreau ;
- éprouvettes graduées ;
- burettes et leur support.

Réponses

1. Exploiter les résultats

a. Un exemple de résultat page suivante.



b. Les notices donnent en général une incertitude inférieure à 0,05 unités pH et l'affichage numérique donne les centièmes d'unité pH. Mais cette précision nécessite un étalonnage fréquent autour du pH mesuré. En pratique l'incertitude est plutôt de 0,1 unité, valeur qui est retenue dans le cours (page 326).

c. À 25°C, les solutions de pH supérieur à 7 sont basiques, les solutions de pH inférieur à 7 sont acides.

2. Interpréter

a.

	jus de citron	Coca-cola	eau de pluie	lait	eau du robinet	eau savonneuse	ammoniaque ménager	eau de javel diluée
pH	2,3	2,6	5,5	6,7	7,0	8,0	10,1	11,2
[H ₃ O ⁺] (mol·L ⁻¹)	5,0×10 ⁻³	2,5×10 ⁻³	3,2×10 ⁻⁶	2,0×10 ⁻⁷	1,0×10 ⁻⁷	1,0×10 ⁻⁸	7,9×10 ⁻¹¹	6,3×10 ⁻¹²

b. Multiplier la concentration en ions H₃O⁺ par 10 diminue le pH d'une unité, la diviser par 10 augmente le pH d'une unité.

3. Proposer un protocole

Il faut obtenir une solution de pH 6,5 à partir d'un pH 8. Les élèves peuvent proposer une simple dilution pour diminuer le pH. La discussion devrait permettre de rejeter ce protocole (on ne peut obtenir une valeur inférieure à 7). L'idée d'ajouter une solution acide devrait émerger.

Exemple de protocole :

- Placer la solution à ajouter (mesurer le volume versé) dans un grand bécher, sous agitation magnétique.
- Étalonner un pH-mètre et placer les électrodes dans le bécher.
- Ajouter peu à peu la solution d'acide choisie en mesurant le pH (on peut mettre à disposition des burettes et en expliquer le fonctionnement) jusqu'à ce que le pH atteigne la valeur souhaitée.

4. Expérimenter pour conclure

Plusieurs solutions acides peuvent être testées. À condition de choisir toujours le même volume d'eau d'aquarium, on peut relever le volume de solution acide nécessaire pour abaisser le pH à la valeur souhaitée et comparer les valeurs obtenues. On peut aussi faire varier le volume d'eau d'aquarium et choisir la même solution acide à introduire.

Quelques conclusions possibles :

- Le volume de solution à ajouter est d'autant plus grand que le volume d'eau initial est grand.
- Le volume à ajouter dépend du pH de la solution acide, mais pas uniquement.

Activité documentaire 2. Histoire des notions d'acide et de base

Commentaires

Cette activité retrace l'histoire de la construction des définitions d'acide et de base, en parallèle avec l'évolution de la compréhension de la structure de la matière. Elle peut être l'objet d'un débat en classe. Toutefois, une recherche documentaire permettra de répondre avec plus de précision à la dernière question.

Réponses

1. Analyser les documents

a. La définition de Boyle repose sur des différences de comportement entre acides et bases que l'on peut observer à partir d'expériences simples et concrètes : caractéristiques organoleptiques, effets sur la teinture de tournesol.

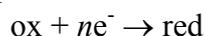
La définition d'Arrhenius sous-tend l'écriture d'une équation de réaction et nécessite la connaissance de la formule chimique des espèces.

b. Les définitions des acides sont identiques. Pour Arrhenius, une base fournit un ion HO⁻, pour Brønsted et Lowry, elle capte un ion H⁺. Ce n'est pas équivalent.

La deuxième partie de la question : « Ces différences sont-elles incompatibles ? » a été supprimée dans le manuel élève en raison d'une trop grande difficulté.

2. Interpréter et conclure

a. Un oxydant est une espèce susceptible de capter un ou plusieurs électrons, un réducteur est une espèce susceptible de céder un ou plusieurs électrons. L'équation de la réaction :



met en évidence l'existence d'un couple ox/red. En captant un électron, un oxydant devient une espèce susceptible d'en céder, c'est-à-dire un réducteur. De la même manière, en captant un ion H⁺, une base B devient une espèce BH⁺ susceptible de céder un ion H⁺, c'est-à-dire un acide. L'équation $B + H^+ \rightarrow BH^+$ traduit l'existence d'un couple BH⁺ (acide)/B(base).

b. Cette notion n'est plus valable avec la définition de Lewis parce qu'il n'y a pas d'échange de particule entre un acide de Lewis et une base de Lewis.

c. La définition de Boyle s'appuie sur des faits expérimentaux, elle ne repose pas sur la connaissance de la structure atomique des espèces chimiques. Entre Boyle (1627-1691) et le XIX^e siècle, les travaux de Lavoisier (1743-1794) ont mis en évidence l'existence d'éléments chimiques, ceux de Faraday (1791-1867) ont ensuite permis la découverte d'espèces chargées. Ces notions étaient nécessaires à l'élaboration des définitions d'Arrhenius et de Brønsted. Enfin, celle de Lewis nécessite une connaissance de la structure électronique de l'atome dont les modèles datent du début du XX^e siècle.

Activité expérimentale 3. Notion d'équilibre acido-basique

Commentaires

S'appuyant sur une mesure de pH, cette activité met en évidence que la réaction acido-basique d'un acide avec l'eau n'est pas toujours totale, elle permet de montrer la différence entre avancement maximal et avancement final.

L'élève est amené par un questionnement à remettre en cause le caractère total d'une réaction qu'il utilisait sans le nommer en dressant son tableau d'évolution.

Le symbolisme utilisé pour l'écriture des réactions totales ou non totales est introduit.

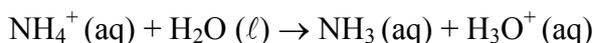
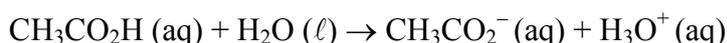
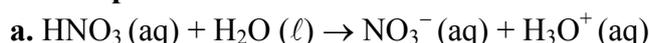
Réponses

1. Exploiter des résultats

Exemple de résultats de mesures.

Solution	pH	[H ₃ O ⁺] (mol·L ⁻¹)
Acide nitrique	4,0	1,0×10 ⁻⁴
Acide éthanoïque	4,4	4,0×10 ⁻⁵
Chlorure d'ammonium	6,6	2,5×10 ⁻⁷

2. Interpréter



b.

	avancement	HA(aq) + H ₂ O(ℓ) → A ⁻ (aq) + H ₃ O ⁺ (aq)			
EI	0	cV	excès	0	0
en cours	x	cV - x		x	x

c. L'avancement maximal de la réaction est obtenu pour $cV - x_{\text{max}} = 0$ donc $x_{\text{max}} = cV$.

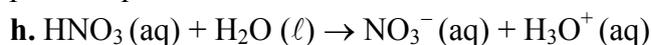
d. La quantité d'ions H₃O⁺ attendue en fin de réaction est égale à x_{max} , sa concentration est donc : $\frac{x_{\text{max}}}{V} = c$.

On attend une valeur de $1,0 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

e. La valeur attendue est bien obtenue pour l'acide nitrique mais pas pour les deux autres acides. L'incertitude sur la mesure de pH est de 0,1 ; la différence entre les valeurs 4,4 et 6,6 et la valeur attendue de 4,0 est supérieure à 0,1 et ne peut donc être imputée aux incertitudes de mesure.

f. On a supposé que l'avancement final était égal à l'avancement maximal.

g. Le terme « réaction totale » signifie que la totalité de l'acide introduit a été consommée, c'est-à-dire que l'avancement final est égal à l'avancement maximal. C'est le cas de la réaction de l'acide nitrique avec l'eau, mais pas de l'acide éthanoïque ni de l'ion ammonium pour lesquels la réaction avec l'eau est non totale.



Activité expérimentale 4. Étude d'une réaction exothermique

Commentaires

Cette activité répond à la compétence du programme « Mettre en évidence l'influence des quantités de matière mises en jeu sur l'élévation de température observée au cours de la réaction entre un acide fort et une base forte ». Elle s'accompagne d'une discussion sur la lecture des pictogrammes de sécurité et peut s'appuyer sur la consultation du site de l'INRS. La question 4 peut être abordée avant de réaliser l'expérience proposée afin de justifier les consignes de sécurité à appliquer. Notons que ces consignes sont dépendantes des concentrations des solutions utilisées.

Réponses

1. Observer

Exemple de résultats de mesure.

Expérience	θ_0 (°C)	θ_f (°C)	$\theta_f - \theta_0$ (°C)
1	20,0	26,3	6,3
2	20,0	20,6	0,6

2. Interpréter

a. La température de la solution augmente, la réaction dégage donc un transfert thermique d'où le qualificatif « exothermique ».



c. Seule la concentration des solutions varie d'une expérience à l'autre. C'est ce paramètre dont on observe l'influence. Plus la concentration est élevée, plus la variation de température est importante.

3. Prolonger l'expérience

a. On peut modifier le volume des solutions introduites : en conservant l'égalité des deux volumes ou en ne faisant varier que l'un d'eux.

Plan d'expérience proposé :

Expérience	V_1 (mL)	V_2 (mL)	c (mol·L ⁻¹)
3	200	200	1
4	150	50	1
5	50	150	1

b. Résultats obtenus :

Expérience	θ_0 (°C)	θ_f (°C)	$\theta_f - \theta_0$ (°C)
3	20,0	26,6	6,6
4	20,0	23,2	3,2
5	20,0	23,2	3,2

- Le résultat de l'expérience 3 est très voisin de celui de l'expérience 1 : le volume total du mélange n'a donc pas d'importance si les deux solutions sont introduites avec le même volume.
- Les résultats des expériences 4 et 5 sont différents de celui de l'expérience 1, (bien que le volume total de la solution soit le même que dans l'expérience 1) mais semblables entre eux.

On peut chercher avec les élèves une interprétation de ces résultats, en s'appuyant sur l'écriture des tableaux d'évolution pour montrer que les quantités de réactifs ayant réagi sont les mêmes dans les expériences 4 et 5 et inférieures, pour un même volume totale de réaction à celles de l'expérience 1. Ceci permet de conclure que la variation de température est d'autant plus importante, pour un volume total de solution donné, que les quantités d'acide et de base ayant réagi sont grandes, c'est-à-dire que l'avancement final de la réaction est important.

4. La sécurité au laboratoire

Sur le site de l'INRS, la signification des mentions de danger est disponible sur la page <http://www.inrs.fr/accueil/risques/chimiques/classification-produits/nouvelle-classification.html>

- Signification des pictogrammes de sécurité : corrosif ;
- Mention de danger H290 : peut être corrosif pour les métaux ;
- Mention de danger H314 : provoque des brûlures de la peau et des lésions oculaires graves.

Ces solutions doivent être manipulées en portant des gants et des lunettes et en évitant le contact avec les métaux.

Remarquons que les gants ne sont nécessaires que pour des concentrations élevées (supérieures ou égales à $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$). En revanche, l'utilisation de lunettes de sécurité est indispensable même pour de la soude peu concentrée pour éviter les lésions oculaires graves.

Exercices d'application

5 minutes chrono !

1. Mots manquants

- $\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+]$; pH-mètre
- supérieure ; inférieur
- produit ionique de l'eau
- céder ; proton
- HO^- ; H_3O^+
- équilibrée ; \rightleftharpoons
- faible
- exothermique ; augmente

2. QCM

- $1,0 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$
- $[\text{HO}^-] = 2,0 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$
- qui peut capter un ion H^+
- augmente d'une unité
- $\text{CH}_3\text{NH}_2(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\ell) \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{NH}_3^+(\text{aq}) + \text{HO}^-(\text{aq})$

Compétences exigibles

3.

Acide	ClOH	HCO_3^-	H_3PO_4	H_3O^+	H_2S	HS^-
Base	ClO^-	CO_3^{2-}	H_2PO_4^-	H_2O	HS^-	S^{2-}

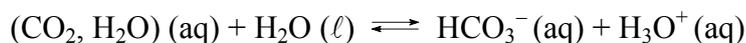
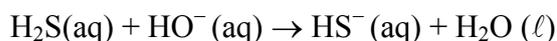
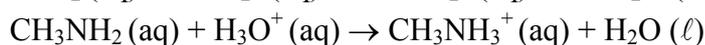
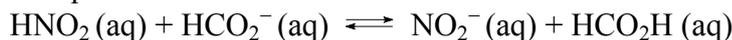
4. a. Une réaction acido-basique est une réaction au cours de laquelle la base d'un couple capte un ion H^+ cédé par l'acide d'un autre couple.

b. 1^{ère} réaction : couples $\text{HCO}_2\text{H}/\text{HCO}_2^-$ et $\text{H}_2\text{O}/\text{HO}^-$.

2^e réaction : couples $\text{H}_2\text{S}/\text{HS}^-$ et $\text{H}_3\text{O}^+/\text{H}_2\text{O}$.

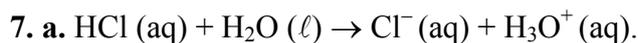
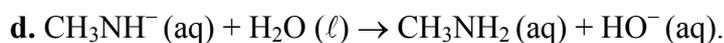
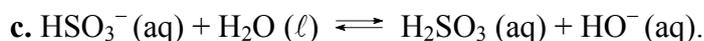
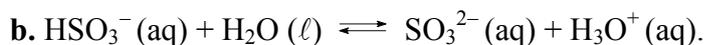
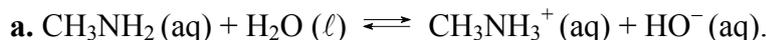
5. La base B et l'acide HA sont introduits en même quantité (10,0 mmol). L'avancement maximal de la réaction acido-basique $B + HA \rightarrow \text{BH}^+ + A^-$ est donc de 10,0 mmol.

Si l'avancement final quasiment égal à 10,0 mmol, la réaction est quasi-totale, dans le cas contraire, elle est équilibrée :



Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 16. Théorie de Brønsted. Notion d'équilibre chimique

6. Un acide ou une base forte réagissent de façon quasi-totale avec l'eau (symbole \rightarrow) ; un acide et une base faible réagissent de façon équilibrée avec l'eau (symbole \rightleftharpoons).



b. Le tableau d'évolution de la réaction est :

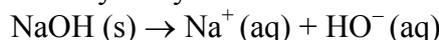
état	avancement	$\text{HCl}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\ell) \rightarrow \text{Cl}^-(\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$			
initial	0	$n = 5,2 \times 10^{-4} \text{ mol}$	excès	0	0
final	$x_f = 5,2 \times 10^{-4} \text{ mol}$	0	excès	$n = 5,2 \times 10^{-4} \text{ mol}$	$n = 5,2 \times 10^{-4} \text{ mol}$

Le volume de la solution est $V = 200 \text{ mL}$.

La concentration finale en ions H_3O^+ est $[\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{n}{V}$ et le pH est égal à $-\log\left(\frac{n}{V}\right)$.

A.N. : $\text{pH} = -\log\left(\frac{5,2 \times 10^{-4}}{0,200}\right) = 2,6$.

8. a. La réaction de dissolution de l'hydroxyde de sodium dans l'eau est :



b. La solution est réalisée en introduisant une quantité d'hydroxyde de sodium de :

$$\frac{0,5}{23 + 16 + 1} = 1,25 \times 10^{-2} \text{ mol dans } 1,00 \text{ L d'eau}$$

La concentration en ions HO^- est donc : $[\text{HO}^-] = 1,25 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

On en déduit la concentration en ions H_3O^+ :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{K_e}{[\text{HO}^-]} = 8,0 \times 10^{-13} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

puis le $\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+] = 12,1$

c. Lorsque la solution est diluée 10 fois, la concentration en ions HO^- est divisée par 10, la concentration en ions H_3O^+ est multipliée par 10, le pH diminue d'une unité, d'où $\text{pH} = 11,1$.

Compétences générales

9. a. Solution d'acide fort : $\text{pH} = -\log c$ avec $c \approx 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ donc $\text{pH} \approx 3$.

La valeur proposée la plus proche est $\text{pH} = 2,6$.

b. Concentration des ions hydroxydes :

$$[\text{HO}^-] \approx \frac{0,4}{40} = 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ donc } [\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{10^{-14}}{[\text{HO}^-]} \approx 10^{-12} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ donc } \text{pH} \approx 12.$$

La valeur proposée la plus proche est $\text{pH} = 12,0$.

c. Concentration des ions hydroxydes :

$$[\text{HO}^-] \approx 10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ donc } [\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{10^{-14}}{[\text{HO}^-]} \approx 10^{-10} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ donc } \text{pH} \approx 10.$$

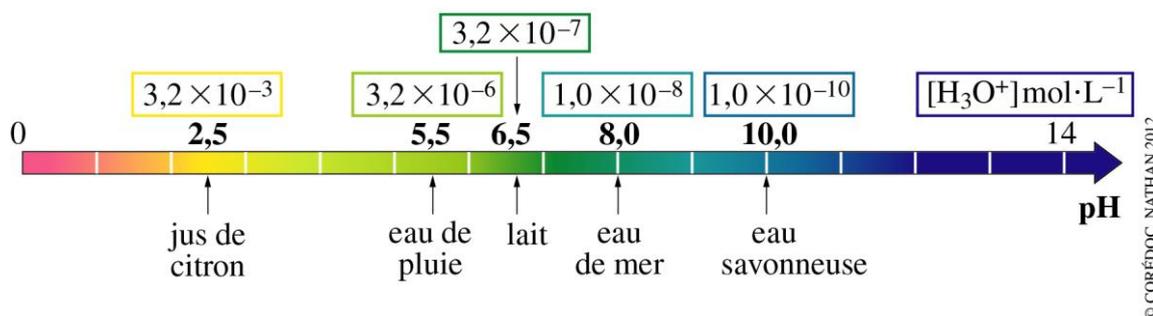
La valeur proposée la plus proche est $\text{pH} = 10,5$.

d. Solution d'acide fort : $\text{pH} = -\log c$ avec $c \approx \frac{4 \times 10^{-4}}{40} \approx 10^{-5} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ donc $\text{pH} \approx 5$.

La valeur proposée la plus proche est $\text{pH} = 5,0$

10. Dans le manuel élève, le pH de l'eau de mer est indiqué à « 8,0 » (au lieu de « 8 ») et le pH de la solution savonneuse à « 10,0 » (au lieu de « 10 »).

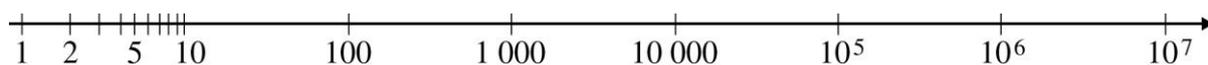
a.



b. Le pH est un exemple d'utilisation d'échelle logarithmique. Les concentrations en ions H_3O^+ de diverses solutions ont des ordres de grandeur très différents (de 10^{-14} à $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$) ; les placer simultanément sur un axe gradué linéairement est impossible sur une distance raisonnable. On construit donc une échelle logarithmique en plaçant sur un axe gradué linéairement non pas la concentration mais son logarithme décimal.

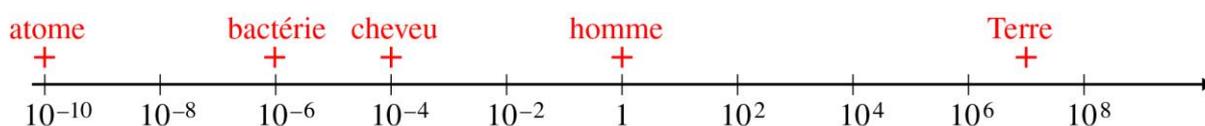
Comme $\log 10x = 1 + \log x$, deux valeurs distantes d'un ordre de grandeur (rapport de 10 entre les deux) seront distantes d'une unité sur une échelle logarithmique.

Ces échelles peuvent être utilisées pour rendre compte de valeurs d'ordre de grandeurs différents, comme des distances ou des durées. Avant de placer des grandeurs sur une échelle logarithmique, il faut les avoir exprimées dans la même unité.



© CORÉDOC. NATHAN 2012

c. Pour placer ces ordres de grandeurs différents, on utilise une échelle logarithmique :



© CORÉDOC. NATHAN 2012

11. a. De manière générale, quelle que soit l'origine de l'eau, le pH est plus élevé en surface qu'en profondeur. Il diminue de façon conséquente avec la profondeur sur le premier km puis se stabilise au-delà de 2km de profondeur.

b. Le phytoplancton réalise la photosynthèse à faible profondeur (pour pouvoir exploiter l'énergie du rayonnement solaire).

L'équation de la photosynthèse est : $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$.

Elle montre la consommation du dioxyde de carbone. Ce dernier est un acide, sa consommation entraîne une diminution de l'acidité et donc une augmentation du pH. À plus grande profondeur, le dioxyde de carbone n'est plus consommé et le pH est plus faible.

12. a. et b. La réaction entre l'acide fort HBr(aq) et la base forte HO⁻ est totale. HBr est introduit en défaut : c'est le réactif limitant, il est entièrement consommé à la fin de la réaction.

	HBr(aq)	+ HO ⁻ (aq)	→ H ₂ O(ℓ)	+ Br ⁻ (aq)
état initial	n_1	n_2	excès	0
état final	0	$n_2 - n_1$	excès	n_1

Dans le manuel élève, la dernière colonne du tableau était une colonne de trop et a donc été supprimée.

c. Il reste des ions HO⁻ en excès dans la solution qui sera donc basique.

Exercices de méthode

13. Exercice résolu.

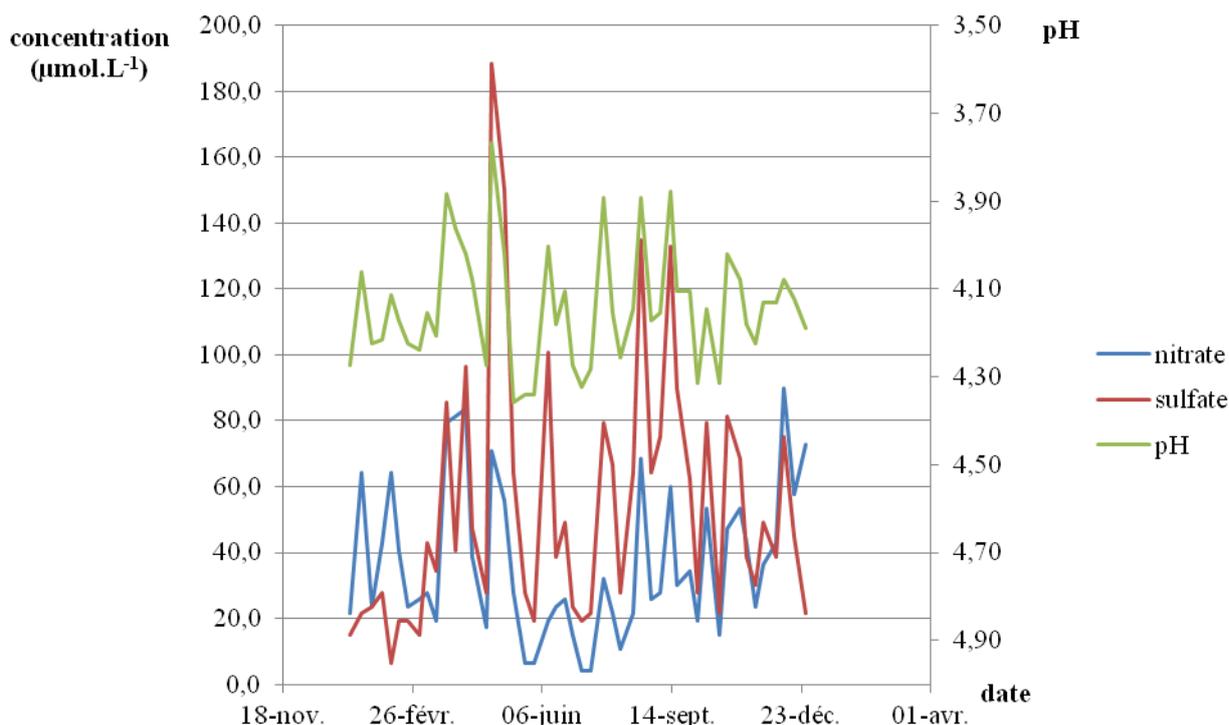
14. a. Une lecture rapide aboutirait à la conclusion que le pH demeure constant tandis que les concentrations en ion nitrate et sulfate varient. Cela est dû au choix de l'échelle de pH qui ne permet pas de mettre en évidence des variations de quelques dixièmes d'unités autour d'un pH égal à 4.

b. Le choix des échelles doit permettre d'observer les variations lorsqu'elles sont significatives (c'est-à-dire supérieures aux incertitudes de mesure), ce qui est le cas des variations de toutes les grandeurs ici. Les échelles de concentration en ions nitrate et sulfate du graphique 2 sont bien adaptées, ainsi que l'échelle de pH du graphique 1.

La représentation en histogramme du graphique 1 n'est pas pertinente. Elle rend difficile l'observation des variations de chacune des grandeurs. Elle est plus adaptée à la comparaison de plusieurs grandeurs qu'au suivi des variations de l'une d'elles.

c. Choisir une échelle inverse permettrait de montrer que l'augmentation de l'acidité (opposée au pH) est concomitante avec l'augmentation des concentrations en ions nitrate et sulfate.

d. Une proposition de graphique :



15. a. Une solution de masse m et de masse volumique ρ occupe un volume $V = \frac{m}{\rho}$, elle contient une masse m_{HCl} de chlorure d'hydrogène.

Sa concentration massique est $c_m = \frac{m_{\text{HCl}}}{V} = \frac{m_{\text{HCl}}\rho}{m}$.

Vérification : m_{HCl} en g, ρ en $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, m en g d'où c_m en $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

Elle contient une quantité n_{HCl} de chlorure d'hydrogène vérifiant $n_{\text{HCl}} = \frac{m_{\text{HCl}}}{M}$.

La concentration molaire de la solution est $c = \frac{m_{\text{HCl}}}{MV} = \frac{c_m}{M}$.

Vérification : c_m en $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, M en $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ d'où c en $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

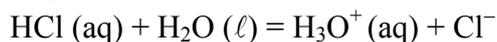
A.N. : $\rho = 1,12 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3} = 1,12 \times 10^3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$; $c_m = \frac{25,0 \times 1,12 \times 10^3}{100} = 280 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$.

$$c = \frac{280}{36,5} = 7,67 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

b. Verrerie nécessaire : une fiole jaugée de 1,00 L, une pipette jaugée de 10,0 mL.

1. Rincer la pipette jaugée avec la solution mère et la fiole jaugée avec de l'eau distillée ;
2. Prélever 10,0 mL de la solution mère à l'aide d'une pipette ;
3. Verser le volume de solution prélevée dans la fiole jaugée ;
4. Compléter la fiole jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée en agitant régulièrement ;
5. Boucher et agiter.

c. Le chlorure d'hydrogène réagit de façon totale avec l'eau :



La quantité d'ions H_3O^+ en solution est égale à la quantité de chlorure d'hydrogène apportée, c'est-à-dire $c_a V'$ où V' est le volume de la solution fille.

D'où $[\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{c_a V'}{V'} = c_a$.

On en déduit le $\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+] = -\log c_a$ avec c_a en $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

A.N. : $c_a = \frac{c}{100} = 7,67 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$;

et $\text{pH} = -\log (7,67 \times 10^{-2}) = 1,1$.

Exercices d'entraînement

16. Le produit « pH-moins » est le solide ionique NaHSO₄. L'équation de sa dissolution est NaHSO₄ (s) → Na⁺ (aq) + HSO₄⁻ (aq). L'ion HSO₄⁻ est un acide qui réagit avec la base H₂O selon la réaction d'équation :

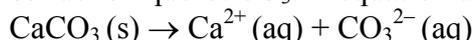


(l'énoncé ne précise pas qu'il s'agit d'un acide faible, la simple flèche est acceptée).

La réaction produit des ions H₃O⁺.

Lorsque l'on ajoute le solide ionique dans l'eau, la concentration en ions H₃O⁺ augmente et donc le pH diminue, d'où l'appellation produit « pH-moins ».

Le produit « pH-plus » est le solide ionique CaCO₃. L'équation de sa dissolution est :



L'ion CO₃²⁻ est une base qui réagit avec l'acide H₂O selon la réaction d'équation :



(l'énoncé ne précise pas qu'il s'agit d'un acide faible, la simple flèche est acceptée).

La réaction produit des ions HO⁻.

Lorsque l'on ajoute le solide ionique dans l'eau, la concentration en ions HO⁻ augmente donc.

Or, en solution : $[\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{K_e}{[\text{HO}^-]}$, donc la concentration en ions H₃O⁺ diminue entraînant

l'augmentation du pH, d'où l'appellation produit « pH-plus ».

17. a. Une solution neutre vérifie $[\text{H}_3\text{O}^+] = [\text{HO}^-]$.

Or, en solution $K_e = [\text{H}_3\text{O}^+] \times [\text{HO}^-]$.

Donc $K_e = [\text{H}_3\text{O}^+]^2$, d'où $-\log K_e = -2\log [\text{H}_3\text{O}^+] = -2\text{pH}$.

Le pH d'une solution neutre vérifie donc $\text{pH} = \frac{pK_e}{2}$.

A.N. : $\text{pH} = \frac{-\log(1,9 \times 10^{-14})}{2} = 6,9$.

b. Le pH du plasma est supérieur à celui d'une solution neutre (7,4 > 6,9) donc le plasma est une solution basique.

c. On calcule les concentrations en ions H₃O⁺ correspondant aux deux valeurs extrêmes de pH :

- pour pH = 6,8, $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-6,8} = 1,6 \times 10^{-7} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$

- pour pH = 7,8, $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-7,8} = 1,6 \times 10^{-8} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$

$$\text{D'où } 1,6 \times 10^{-8} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} < [\text{H}_3\text{O}^+] < 1,6 \times 10^{-7} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

18. a. Le pH du suc gastrique vaut 1,5 ; la concentration en ions H₃O⁺ y est donc égale à :

$$[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{suc}} = 10^{-\text{pH}} = 3,2 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

Dans l'estomac de pH = 3,0, cette concentration est égale à :

$$[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{estomac}} = 10^{-3} = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

Le facteur de dilution est $\frac{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{estomac}}}{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{suc}}}$ donc de $\frac{1,0 \times 10^{-3}}{3,2 \times 10^{-2}} = \frac{1}{32}$.

La solution est diluée 32 fois.

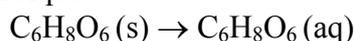
Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 16. Théorie de Brønsted. Notion d'équilibre chimique

b. La valeur du pH permet de déterminer $[\text{H}_3\text{O}^+] = 1,0 \times 10^{-8} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ puis celle en ions HO^- :

$$[\text{HO}^-] = \frac{K_e}{[\text{H}_3\text{O}^+]}, \text{ avec } K_e = 10^{-\text{p}K_e} = 10^{-13,7}$$

A.N. : $[\text{HO}^-] = \frac{10^{-13,7}}{1,0 \times 10^{-8}} = 2,0 \times 10^{-6} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

19. a. Dissolution de l'acide ascorbique :



Il s'agit d'un acide faible qui réagit de façon équilibrée avec la base H_2O selon la réaction d'équation :



b. Soit V le volume de la solution. La valeur du pH de la solution permet de déduire la concentration finale en ions H_3O^+ : $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}}$ et donc sa quantité $[\text{H}_3\text{O}^+]$. V qui correspond à l'avancement final x_f .

A.N. : $x_f = 10^{-2,9} \times 0,20 = 2,5 \times 10^{-4} \text{ mol}$.

c. Le tableau d'évolution de la réaction est :

	avancement	$\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\ell) \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{C}_6\text{H}_7\text{O}_6^-(\text{aq})$			
état initial	0	n	excès	0	0
état final	x_f	$n - x_f$	excès	x_f	x_f

La quantité finale d'ion ascorbate $\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_6^-$ est égale x_f donc $[\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_6^-] = [\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}}$.

La quantité finale d'acide ascorbique $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ est $n - x_f$ où n est la quantité initiale d'acide

ascorbique avec $n = \frac{m}{M}$ (avec m la masse d'acide ascorbique et M sa masse molaire).

D'où : $[\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6] = \frac{M - x_f}{V}$. A.N. : $[\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_6^-] = 10^{-2,9} = 1,3 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

$M = 6 \times 12 + 8 + 6 \times 16 = 176 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$;

$$[\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6] = \frac{0,50}{176 - 2,5 \times 10^{-4}} = 1,3 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

20. a. Réaction équilibrée de la base NH_3 avec l'acide H_2O :



b. L'avancement de la réaction équilibrée de l'ammoniac avec l'eau est inférieur à celui de la réaction totale d'une même quantité de base forte avec l'eau. La quantité et donc la concentration d'ions HO^- dans la solution d'ammoniac sont donc plus faibles que dans la

solution de base forte. Or, en solution $[\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{K_e}{[\text{HO}^-]}$. Donc la concentration d'ions H_3O^+

est plus élevée et donc le pH plus faible dans la solution d'ammoniac que dans la solution de base forte.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 16. Théorie de Brønsted. Notion d'équilibre chimique

21. a. La base conjuguée de l'acide R-CO₂H a pour formule R-CO₂⁻.

b. La réaction d'un acide fort avec l'eau est totale. La quantité d'ions H₃O⁺ produite est égale à la quantité initiale d'acide fort introduit. La concentration en ions H₃O⁺ est donc égale à la concentration apportée de l'acide : [H₃O⁺] = c. Or, la valeur de pH permet de déterminer :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}} = 10^{-3,7} = 2,0 \times 10^{-4}$$

Cette valeur est inférieure à c l'acide est donc faible.

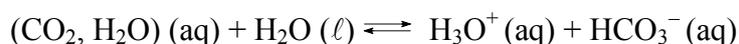
c. R-CO₂H (aq) + H₂O(ℓ) ⇌ H₃O⁺(aq) + R-CO₂⁻(aq).

22. 1. a. L'eau pure est une solution neutre. À 25°C, son pH vaut 7.

b. Les valeurs de pH sont différentes de 7 donc ces différentes eaux ne sont pas « pures ».

2. *Dans le manuel élève, nous avons précisé que le dioxyde de carbone en solution aqueuse se comporte comme un acide faible.*

a. Réaction équilibrée de l'acide faible avec l'eau :



b. D'après l'équation précédente, les solutions dans lesquelles est dissous du dioxyde de carbone sont acides. C'est le cas de l'eau distillée du laboratoire laissée à l'air libre, qui dissout le CO₂ atmosphérique et du Perrier gazéifié par du dioxyde de carbone gazeux.

23. a. L'expérience est une mesure du pH de solutions savonneuse à l'aide de papier pH.

b. Un savon contient des ions carboxylate R-CO₂⁻, qui sont des bases faibles.

c. La couleur du papier pH change quelle que soit le pH pour prendre une couleur particulière. Le papier pH réagit donc à tout pH et pas seulement à pH élevé.

d. La couleur du papier pH est caractéristique d'une solution légèrement acide (pH 5 – 6). C'est préférable parce que le pH de la peau est légèrement acide.

24. On ne peut mesurer le pH que de solutions. Il faut donc réaliser des « solutions de sol », en agitant longtemps une masse de terre dans un volume d'eau. Après filtration, on mesure le pH de la solution avec un pH-mètre. Pour comparer différents sols, il faut que les solutions soient préparées avec la même masse de terre et le même volume d'eau. Le taux d'humidité de la terre peut varier de façon considérable selon les conditions de prélèvement. Il est préférable de sécher la terre en la plaçant à l'étuve avant de peser les échantillons pour préparer des solutions de sol à partir d'une même masse de terre sèche.

Pour favoriser le transfert des ions H₃O⁺ de la terre vers la solution, on peut utiliser plutôt que de l'eau pure une solution de chlorure de potassium (les ions H₃O⁺ de la terre sont remplacés par les ions K⁺ de la solution).

Exemple de protocole : <http://www2.ulg.ac.be/sciences/printemps/pedagogique/1151.pdf>

- Recueillir des échantillons de sol, les placer à l'étude pour les déshydrater ;
- Les broyer finement.

Pour chaque échantillon :

- Peser 10 g de terre sèche ;
 - La placer dans un bécher et y ajouter 25 mL de solution de chlorure de potassium (K⁺(aq), Cl⁻(aq)) de concentration 0,1 mol·L⁻¹ ;
 - Ajouter un barreau magnétique, agiter sur un agitateur magnétique ;
 - Laisser reposer longuement pour décanter ;
 - Mesurer le pH de la solution surnageant à l'aide d'un pH-mètre préalablement étalonné.
-

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 16. Théorie de Brønsted. Notion d'équilibre chimique

25. 1. $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}} = 10^{-5,23} = 5,888 \times 10^{-6} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$

2.a. $\text{pH} = 5,23 \pm 0,05$.

b. Le pH est compris entre les valeurs 5,18 et 5,28.

Donc $[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{max}} > [\text{H}_3\text{O}^+] > [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{min}}$;

avec $[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{max}} = 10^{-5,18} = 6,61 \times 10^{-6} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ et $[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{min}} = 10^{-5,28} = 5,25 \times 10^{-6} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

L'incertitude sur la valeur de $[\text{H}_3\text{O}^+]$ peut être évaluée en calculant l'expression :

$$\Delta[\text{H}_3\text{O}^+] = ([\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{max}} - [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{min}}) = 0,7 \times 10^{-6} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

(on ne garde qu'un chiffre significatif pour l'incertitude).

Pour donner la valeur de $[\text{H}_3\text{O}^+]$, on calcule la valeur moyenne $\frac{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{max}} + [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{min}}}{2}$.

Le dernier chiffre significatif est celui sur lequel porte l'incertitude.

A.N. : $[\text{H}_3\text{O}^+] = (5,9 \pm 0,7) \times 10^{-6} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

26. a. Comme acides d'origine végétale, T. Lowry cite : « vinegar » obtenu à partir de vin ; « citric acid » présent dans le jus de citron et « malic acid » dans les pommes.

Pour les acides d'origine minérale, il cite « vitriol », « aqua fortis or nitric acid » et « muriatic acid ».

b.

Nom anglais	Nom français courant	Formule de l'acide	Formule de la base
vinegar	acide acétique	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	$\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2^-$
citric acid	acide citrique	$\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$	$\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_7^-$
malic acid	acide malique	$\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_5$	$\text{C}_4\text{H}_5\text{O}_5^-$
vitriol	acide sulfurique	H_2SO_4	HSO_4^-
aqua fortis	acide nitrique	HNO_3	NO_3^-
muriatic acid	acide chlorhydrique	$\text{H}_3\text{O}^+, \text{Cl}^-$	H_2O

27. a. et b. L'équation de la réaction totale est $\text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq}) + \text{HO}^- (\text{aq}) \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} (\ell)$.

L'avancement final de la réaction est égal à la quantité initiale de réactif limitant :

Expérience	Réactif limitant	Avancement final x_f	Volume total V_t	Avancement volumique c_f
1	Proportions stœchiométriques	$c_A V_A = 10 \text{ mmol}$	200 mL	$5,0 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$
2	Proportions stœchiométriques	$c_A V_A = 5,0 \text{ mmol}$	100 mL	$5,0 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$
3	H_3O^+	$c_A V_A = 50 \text{ mmol}$	150 mL	$3,3 \times 10^{-1} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$
4	HO^-	$c_B V_B = 50 \text{ mmol}$	150 mL	$3,3 \times 10^{-1} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$

c. La variation de température dépend de l'avancement volumique (même variation pour deux valeurs de c_f identiques expériences 1-2 et 3-4, variations différentes pour deux valeurs de c_f différentes).

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 16. Théorie de Brønsted. Notion d'équilibre chimique

28. Lorsque le niveau d'eau du lac augmente, le volume d'eau augmente mais la quantité d'ions H_3O^+ reste constante. La concentration en ions H_3O^+ diminue par dilution et le pH augmente.

La quantité d'ions H_3O^+ est :

$$n = 10^{-\text{pH}_i} \times V_i$$

où V_i est le volume initial du lac et pH_i son pH initial.

Lorsque le niveau augmente de h , le volume du lac devient :

$$V_f = V_i + Sh$$

si on assimile le lac à un cylindre de surface S .

La concentration en ions H_3O^+ devient $[\text{H}_3\text{O}^+]_f = \frac{n}{V_f}$.

Le pH final est : $\text{pH}_f = -\log \frac{10^{-\text{pH}_i} \times V_i}{V_i + Sh} = \text{pH}_i - \log \frac{V_i}{V_i + Sh}$.

La variation de pH est : $\text{pH}_f - \text{pH}_i = -\log \frac{V_i}{V_i + Sh}$.

$$\text{A.N. : } \text{pH}_f - \text{pH}_i = -\log \frac{32 \times 10^6}{32 \times 10^6 + 41 \times 10^4 \times 10} = 0,05.$$

29. Il s'agit d'augmenter le pH d'une unité, ce qui revient à diviser la concentration en ions H_3O^+ par 10.

Le premier protocole repose sur une dilution au 1/10 qui conduit à la solution souhaitée.

Le second protocole repose sur la diminution de la quantité d'ions H_3O^+ de la solution en exploitant la réaction totale avec les ions HO^- : $\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{HO}^-(\text{aq}) \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}(\ell)$.

La solution initiale a un pH de 3,0, donc une concentration en ions H_3O^+ égale à $1,0 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Pour obtenir 1 L d'une solution de pH = 4,0, c'est-à-dire de concentration $1,0 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ en ions H_3O^+ , il faut donc consommer $9,0 \times 10^{-4} \text{ mol}$ d'ions H_3O^+ , ce que l'on effectue en ajoutant une quantité égale d'ions HO^- .

Une masse m d'hydroxyde de sodium de masse molaire M contient une quantité $n = \frac{m}{M}$

d'ions HO^- . A.N. $n = \frac{36 \times 10^{-3}}{16 + 1 + 23} = 9,0 \times 10^{-4} \text{ mol}$, ce qui correspond bien à la quantité d'ions

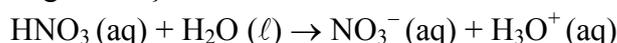
HO^- nécessaire.

Le premier protocole est bien plus précis. En effet, dans le second, une légère erreur dans la mesure de la masse d'hydroxyde de sodium à ajouter modifiera considérablement l'avancement de la réaction totale utilisée (par exemple, si la masse introduite est de 40 mg, tous les ions H_3O^+ seront consommés et le pH vaudra 7 !)

30. 1.a. D'après le document, un lac est qualifié d'acide si son pH est inférieur à 5,5 :

$$-\log [\text{H}_3\text{O}^+] < 5,5 \Rightarrow [\text{H}_3\text{O}^+] > 10^{-5,5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \Rightarrow [\text{H}_3\text{O}^+] > 3,2 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

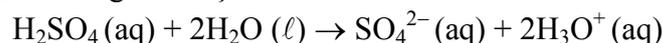
b. L'acide fort HNO_3 réagit de façon totale avec l'eau :



c. Pour transformer SO_2 en SO_3 , il faut un apport d'atome d'oxygène qui peut être fourni par le dioxygène de l'air :

- équation de la formation de $\text{SO}_3(\text{g})$: $2\text{SO}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{SO}_3(\text{g})$;
- réaction avec l'eau : $\text{SO}_3(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\ell) \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq})$.

d. Le diacide fort H_2SO_4 réagit de façon totale avec l'eau :



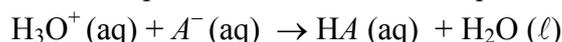
e. Les ions sulfate SO_4^{2-} et nitrate NO_3^- sont produits en même temps que les ions H_3O^+ lors des réactions des acides forts avec l'eau. Leur présence met en évidence que l'acidité est bien corrélée à la présence d'acide nitrique et d'acide sulfurique.

2. a. La quantité n_0 est liée à la concentration en H_3O^+ et donc au pH :

$$n_0 = [\text{H}_3\text{O}^+] \times V = 10^{-\text{pH}} \times V$$

A.N. : $10^{-5,5}$ est la concentration en ions H_3O^+ exprimée en $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, une conversion de volume en L est nécessaire : $n_0 = 10^{-5,5} \times 5,0 \times 10^8 \times 10^3 = 1,6 \times 10^6 \text{ mol}$.

b. Les ions H_3O^+ sont consommés par la réaction acido-basique totale :



c. La quantité initiale d'ions H_3O^+ est n_0 .

La quantité finale d'ions H_3O^+ souhaitée est :

$$n = 10^{-6} \times V = 10^{-6} \times 5,0 \times 10^8 \times 10^3 = 5,0 \times 10^5 \text{ mol}$$

La réaction doit donc consommer une quantité $n_0 - n$ d'ions H_3O^+ , ce qui correspond, d'après l'équation de la réaction, à la quantité n_b de base A^- à ajouter : $n_b = n_0 - n$.

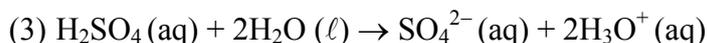
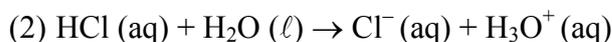
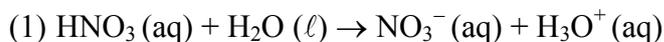
A.N. : $n_b = 1,6 \times 10^6 - 5,0 \times 10^5 = 1,1 \times 10^6 \text{ mol}$.

d. La masse de base à ajouter est $m = n_b \times M = 1,1 \times 10^6 \times 100 = 1,1 \times 10^8 \text{ g} = 1,1 \times 10^2 \text{ t}$.

L'opération coûte donc : $50 \times 1,1 \times 10^2 = 5\,500 \text{ €}$.

Exercices de synthèse

31. L'eau de pluie acide contient des ions nitrate, chlorure et sulfate, produits des réactions totales de l'acide nitrique, de chlorure d'hydrogène et d'acide sulfurique avec l'eau :



Considérons un échantillon d'eau de pluie de volume V contenant une quantité n_1 d'ions NO_3^- , une quantité n_2 d'ions Cl^- et une quantité n_3 d'ions SO_4^{2-} .

La réaction (1) a produit une quantité n_1 d'ions NO_3^- et une quantité n_1 d'ions H_3O^+ .

La réaction (2) a produit une quantité n_2 d'ions Cl^- et une quantité n_2 d'ions H_3O^+ .

La réaction (3) a produit une quantité n_3 d'ions SO_4^{2-} et une quantité $2n_3$ d'ions H_3O^+ .

La quantité totale d'ions H_3O^+ présente est donc $n_1 + n_2 + 2n_3$ et la concentration des ions H_3O^+ est :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{n_1 + n_2 + 2n_3}{V} = c_1 + c_2 + 2c_3$$

où c_1 , c_2 et c_3 sont les concentrations molaires des ions nitrate, chlorure et sulfate.

On connaît les concentrations massiques c_{m1} , c_{m2} et c_{m3} de ces ions dans l'eau de pluie. On peut en déduire leurs concentrations molaires :

$$c_1 = \frac{c_{m1}}{M_1} ; c_2 = \frac{c_{m2}}{M_2} ; c_3 = \frac{c_{m3}}{M_3}$$

où M_1 , M_2 et M_3 sont les masses molaires des ions nitrate, chlorure et sulfate. D'où :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{c_{m1}}{M_1} + \frac{c_{m2}}{M_2} + 2\frac{c_{m3}}{M_3}$$

On en déduit le pH de l'eau de pluie :

$$\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+] = -\log \left(\frac{c_{m1}}{M_1} + \frac{c_{m2}}{M_2} + 2\frac{c_{m3}}{M_3} \right)$$

A.N. : $M_1 = 14 + 3 \times 16 = 62 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $M_2 = 35,5 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $M_3 = 32 + 16 \times 4 = 96 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

$$\text{pH} = -\log \left(\frac{1,24 \times 10^{-3}}{62} + \frac{0,35 \times 10^{-3}}{35,5} + \frac{2 \times 2,88 \times 10^{-3}}{96} \right) = 4,0$$

32. 1. a. D'après la notice, l'incertitude sur la mesure de pH est de 0,01 unité.

b. Les informations relatives à l'étalonnage sont dans la rubrique « calibration ». L'étalonnage doit se faire avec deux solutions (2 points d'après la notice). L'appareil peut identifier automatiquement 3 groupes de 2 solutions tampon.

Les images se forment sur la rétine.

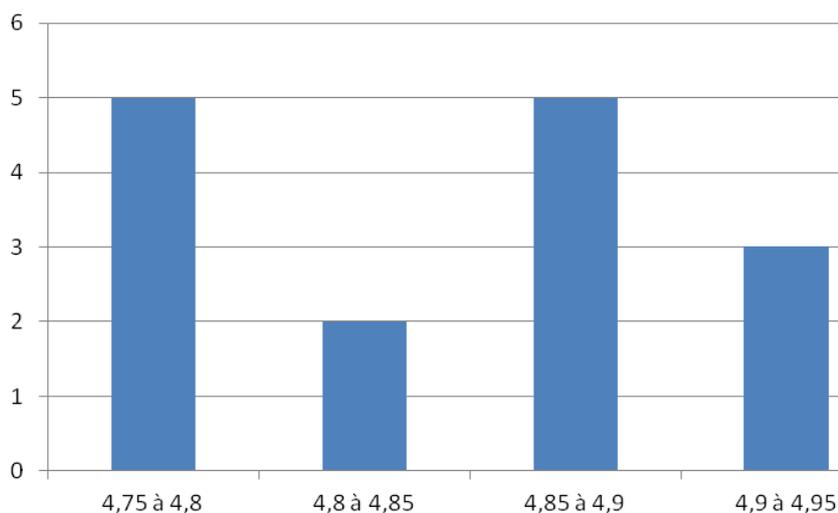
2. a. Les différences entre les mesures effectuées portent sur le chiffre des 1/10 d'unité pH.

La dispersion des mesures semble supérieure à l'incertitude donnée par la notice.

b. Valeur moyenne : 4,81, écart type : 0,06. Pour un intervalle de confiance de 95 % :

$$\text{pH} = 4,81 \pm 2 \times 0,06, \text{ soit } \text{pH} = 4,81 \pm 0,12$$

c.



3. a. Le pH-mètre permet une mesure dans la plage 0-14 mais la sonde de pH ne permet une mesure que dans l'intervalle 0-12. Il n'est donc pas possible de mesurer un pH de 13 avec cette sonde.

b. Il faut conserver la sonde dans une solution de chlorure de potassium à $3 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

33. Dans le manuel élève, la question d. a été complétée par la question « Faire une recherche pour déterminer de quels sucres est constitué le lactose. » afin de faciliter la suite de l'exercice. La question e., présente dans le spécimen, a été supprimée.

Les documents de cet exercice sont extraits du dossier :

http://media.eduscol.education.fr/file/MPS/21/9/LyceesGT_Ressources_2_Exploration_MPS_1-3_yaourt_152219.pdf disponible sur eduscol.

a. La caséine est soluble dans le lait et insoluble dans le yaourt.

b. La transformation du lait en yaourt conduit à la formation d'acide lactique responsable de l'acidification du milieu.

c. On peut acidifier du lait avec quelques gouttes d'acide chlorhydrique, de vinaigre ou de jus de citron et observer s'il coagule.

d. La molécule de lactose est constituée de l'association d'une molécule de glucose et d'une molécule de galactose.

e. Entre le lait et le yaourt, on observe une diminution de la quantité de lactose, la formation de galactose, de glucose et d'acide lactique. On peut supposer que le lactose a été décomposé en glucose et galactose, mais dans ce cas, on devrait obtenir une même masse de glucose et de galactose puisqu'ils ont la même formule brute. Le glucose formé a donc été transformé. On peut supposer que les bactéries permettent sa décomposition en acide lactique, autre molécule organique présente dans le yaourt et pas dans le lait.

Pour vérifier ces hypothèses on peut :

- Préparer une solution de lactose, y ajouter des ferments lactiques, porter à 40°C et mesurer le pH.
- Préparer une solution de glucose, y ajouter des ferments lactiques, porter à 40°C et mesurer le pH.

Dans les deux cas, le suivi du pH d'une solution témoin (sans ferment lactique) doit être effectué.

34. 1. Pour obtenir un volume $V = 1\text{L}$ de solution de concentration c_B , il faut introduire une quantité n_B d'hydroxyde de sodium NaOH(s) vérifiant $n_B = c_B V$. La masse m_B d'hydroxyde de sodium correspondante vérifie $m_B = M_B n_B$ où M_B est la masse molaire de l'hydroxyde de sodium.

D'où $m_B = c_B V M_B$; A.N. : $m_B = 10 \times 1 \times (23 + 16 + 1) = 400\text{ g}$

2. Dans le manuel élève, $d = 1,2$ remplace $d = 1,19$ afin que toutes les données de l'exercice aient le même nombre de chiffres significatifs.

a. La masse d'un échantillon de volume V de la solution S_3 est $m_3 = d\rho V$ où ρ est la masse volumique de l'eau.

Cet échantillon contient une masse de chlorure d'hydrogène $m_{\text{HCl}} = x m_3 = x d\rho V$ et la quantité de chlorure d'hydrogène (de masse molaire M_{HCl}) présente est donc $n_{\text{HCl}} = m_{\text{HCl}}/M_{\text{HCl}}$.

A.N. : $\rho = 1,0\text{ kg}\cdot\text{L}^{-1}$; $m_{\text{HCl}} = 0,37 \times 1,2 \times 1,0 \times 1,0 = 0,44\text{ kg}$; $n_{\text{HCl}} = \frac{0,44 \times 10^3}{35,5 + 1} = 12\text{ mol}$.

b. La concentration molaire de la solution S_3 est $c_3 = \frac{n_{\text{HCl}}}{V}$. A.N. : $c_3 = \frac{12}{1} = 12\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

On souhaite obtenir une solution fille de volume V et de concentration c_A .

On doit prélever un volume V_3 de la solution mère vérifiant $c_3 V_3 = c_A V$, donc $V_3 = \frac{c_A V}{c_3}$.

A.N. : $V_3 = 20 \times \frac{1,0}{12} = 1,7\text{ mL}$.

3. a. Un échantillon de volume $V = 1,0\text{ L}$ de la solution S_2 contient une quantité $n_A = c_A V$ d'ions H_3O^+ (issus de la réaction totale entre le chlorure d'hydrogène et l'eau). On y ajoute une quantité $n_B = c_B V_B$ d'ions hydroxyde où V_B est le volume occupé par 6 gouttes de la solution S_1 . A.N. : $n_A = 20\text{ mmol}$.

Le volume d'une goutte délivré par la burette est $v_B = \frac{1,0}{20} = 5,0 \times 10^{-2}\text{ mL}$;

donc $V_B = 6 \times 5,0 \times 10^{-2} = 3,0 \times 10^{-1}\text{ mL}$ et $n_B = 10 \times 3,0 \times 10^{-1} = 3,0\text{ mmol}$.

Il se produit la réaction totale suivante : $\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{HO}^-(\text{aq}) \rightarrow 2\text{ H}_2\text{O}(\ell)$.

Son tableau d'évolution est :

	avancement	$\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{HO}^-(\text{aq}) \rightarrow 2\text{ H}_2\text{O}(\ell)$		
EI	0	$n_A > n_B$	n_B	excès
EF	n_B	$n_A - n_B$	0	excès

Il reste donc une quantité $n_A - n_B$ d'ions H_3O^+ en solution et une concentration :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{(n_A - n_B)}{V}$$

A.N. : $[\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{20 - 3,0}{1,0} = 1,7\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$.

b. Pour obtenir une solution neutre, il faudrait introduire autant d'ions HO^- que d'ions H_3O^+ , ce qui correspond à un nombre de gouttes p vérifiant : $n_A = c_B \times p v_B$, soit $p = \frac{n_A}{c_B v_B}$.

A.N. : $p = \frac{20}{10 \times 3,0 \times 10^{-1}} = 6,6$. La neutralité s'obtiendra donc entre la 6^e et la 7^e goutte versée.

35. La correction dépendra des pages retenues par les élèves.

36. Rédiger une synthèse de documents

Dans le manuel élève, l'objectif a été reformulé : « L'objectif de cet exercice est d'analyser et d'interpréter les résultats de l'examen des deux nourrissons. »

Le reflux gastro-œsophagien du nourrisson est une anormale remontée du contenu de l'estomac dans l'œsophage. Le milieu stomacal est très acide (pH de 1 à 3 d'après les données du document 5) et le reflux entraîne une brûlure des parois de l'œsophage.

Le diagnostic repose sur un examen pH-métrique. Il consiste en une mesure du pH de l'œsophage grâce à une sonde placée à l'extrémité de l'œsophage (quelques cm au dessus de la jonction avec l'estomac d'après le document 2) et reliée à un pH-mètre. La mesure est effectuée en continu sur plusieurs heures. Les courbes tracées représentent l'évolution du pH au cours du temps. Les heures de prises de biberon sont indiquées.

Les premières courbes proposées concernent un relevé du pH de l'œsophage d'un nourrisson sain, ainsi que l'allure de l'évolution du pH de son estomac.

La sonde relève un pH constant voisin de 7, alors que le pH stomacal lui, décroît entre deux biberons (document 4). Nous pouvons expliquer cette évolution. La salive et le lait ont même pH (document 5). Le lait absorbé par le nourrisson ne modifie pas le pH de l'œsophage. En revanche, son introduction dans l'estomac provoque une augmentation du pH (l'estomac est rempli de lait de pH égal à 7). Le pH de l'estomac décroît de 7 (pH du lait) à 1 lorsque la digestion se produit. Il augmente de nouveau au biberon suivant.

Sur le tracé du pH œsophagien d'un nourrisson présentant un reflux, le pH n'est plus constant. Les variations observées ont la même allure entre deux biberons, dates auxquelles le pH mesuré est de 7, à cause du lait absorbé.

Le tracé présente des décroissances périodiques du pH (d'une durée de quelques minutes toutes les 20 à 30 min), d'amplitudes de plus en plus grandes (1 unité pH 1 h après le biberon, 3 unités 1h 3/4 après le biberon et jusqu'à 6 unités pH 3 heures après).

Nous pouvons interpréter chaque décroissance par un reflux du contenu de l'estomac vers l'œsophage : le pH mesuré par la sonde est alors le pH de l'estomac. Comme nous l'avons vu pour un nourrisson sain, le pH de l'estomac diminue entre deux biberons, le contenu de l'estomac qui remonte dans l'œsophage est de plus en plus acide ce qui explique pourquoi l'amplitude des variations de pH enregistrées est de plus en plus grande lorsque la durée s'écoulant après le biberon augmente.

La variation du pH de l'œsophage du nourrisson malade peut donc s'expliquer par la présence d'un reflux périodique du contenu de l'estomac dans l'œsophage.

Chapitre 17 – Couples acide faible/base faible. Solution tampon

Manuel pages 343 à 362

Choix pédagogiques

Dans ce second chapitre portant sur le thème « Réaction chimique par échange de protons », on s'intéresse plus particulièrement aux couples acide faible/base faible introduits dans le chapitre 16. La constante d'acidité de ces couples est définie comme une constante caractéristique du couple, ne dépendant que de la température. Elle relie en solution, lorsque le système chimique n'évolue plus, les concentrations en acide faible, en sa base conjuguée et en ions H_3O^+ . La relation introduite, écrite sous sa forme logarithmique, sert de base à la construction des diagrammes de prédominance. Ces derniers permettent de déterminer, dans une solution de pH donné, l'espèce acido-basique prédominante d'un couple. L'intérêt de ces diagrammes est tout d'abord mis en évidence sur les indicateurs colorés, introduits dans ce chapitre. Leur usage pour les titrages acido-basique sera expliqué au chapitre 23. Sont ensuite construits, en s'appuyant sur ceux des acides carboxyliques et des amines, les diagrammes de prédominance des acides aminés. Leur utilisation pour comprendre la séparation des acides α -aminés par électrophorèse est évoquée en exercice. Dans ce chapitre, on évoque enfin le contrôle du pH en introduisant la notion de solution tampon. Pour mettre en évidence l'importance du contrôle du pH dans les milieux biologiques, les exemples de la régulation du pH sanguin et de la variation de l'activité catalytique des enzymes avec le pH sont présentés dans le cours et en activité documentaire. Ils sont repris dans les exercices. La notion de catalyse enzymatique introduite au chapitre 13 est alors réinvestie.

Des animations et des vidéos documentaires illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et, certaines d'entre elles, sur les sites Internet compagnon Sirius.

Page d'ouverture

Un brasseur contrôle le pH de l'eau de brassage utilisé pour la fabrication de bière

La fabrication de la bière repose sur un processus de fermentation, catalysé par les enzymes. Les caractéristiques de cette catalyse ont été évoquées dans le chapitre 13 mais une particularité est introduite dans la légende de cette photographie : la sensibilité des enzymes au pH. Ce chapitre permettra d'en comprendre l'origine et de mettre en évidence l'importance du contrôle du pH et les moyens d'y parvenir.

Activités

Activité expérimentale 1. Détermination d'une constante d'acidité

Commentaires

Cette activité répond à la compétence exigible du programme « Déterminer expérimentalement une constante d'acidité ». Elle s'appuie sur la mesure de pH de solutions d'acide éthanoïque et d'ion éthanoate. L'activité permet de mettre en évidence la constance de l'expression $\frac{[\text{H}_3\text{O}^+] \times [\text{CH}_3\text{CO}_2^-]}{[\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}]}$ et d'introduire ainsi la constante d'acidité du couple.

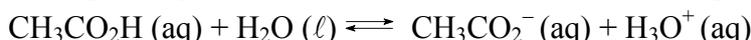
Toutefois, comme des mesures de pH sont utilisées, il est préférable, pour des raisons de précision, de calculer le logarithme décimal de cette expression et d'en montrer la constance.

Réponses

1. Exploiter les résultats

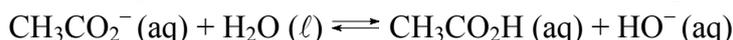
a. Au cours d'une dilution, le pH d'une solution acide d'acide éthanoïque augmente et le pH d'une solution basique d'ion éthanoate diminue.

En effet, l'acide éthanoïque réagit avec la base H₂O selon la réaction d'équation :



Une dilution conduit à une diminution de la concentration en acide introduit, et à une diminution de l'avancement de la réaction. La concentration [H₃O⁺] diminue, entraînant une augmentation du pH.

De même l'ion éthanoate réagit avec l'acide H₂O selon la réaction d'équation :



Une dilution conduit à une diminution de la concentration en base introduite, et à une diminution de l'avancement de la réaction. La concentration [HO⁻] diminue, entraînant l'augmentation de la concentration [H₃O⁺] et la diminution du pH.

b.

- $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H} (\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} (\ell) \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{CO}_2^- (\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq})$.
- Cf. tableau ci-dessous, on utilise la relation $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}}$.

	avancement	$\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H} (\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} (\ell) \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{CO}_2^- (\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq})$			
initial	0	$c_A V$	excès	0	0
final	x	$c_A V - x$	excès	x	x

- D'après le tableau : $[\text{CH}_3\text{CO}_2^-] = \frac{x}{V} = [\text{H}_3\text{O}^+]$ et $[\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}] = \frac{c_A V - x}{V} = c_A - [\text{H}_3\text{O}^+]$.
- Cf. tableau.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 17. Couples acide faible/base faible. Solution tampon

c.

- $\text{CH}_3\text{CO}_2^- (\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} (\ell) \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{CO}_2\text{H} (\text{aq}) + \text{HO}^- (\text{aq})$.
- Cf. tableau, on utilise les relations $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}}$ et $[\text{HO}^-] = \frac{K_e}{[\text{H}_3\text{O}^+]}$.

	avancement	$\text{CH}_3\text{CO}_2^- (\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} (\ell) \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{CO}_2\text{H} (\text{aq}) + \text{HO}^- (\text{aq})$			
initial	0	$c_B V$	excès	0	0
final	x	$c_B V - x$	excès	x	x

- D'après le tableau : $[\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}] = \frac{x}{V} = [\text{HO}^-]$ et $[\text{CH}_3\text{CO}_2^-] = \frac{c_B V - x}{V} = c_B - [\text{HO}^-]$.
- Cf. tableau.

2. Conclure

Cf. tableau.

La grandeur calculée est constante (à 0,1 unité près, ce qui correspond à l'incertitude sur la mesure du pH).

Copie d'écran d'une feuille Excel (*disponible dans le manuel numérique enrichi et sur le site compagnon Sirius*) :

solutions d'acide éthanóique						
concentration (mol.L ⁻¹)	pH	[H ₃ O ⁺] (mol.L ⁻¹)	[CH ₃ CO ₂ H] (mol.L ⁻¹)	[CH ₃ CO ₂ ⁻] (mol.L ⁻¹)	pK _a	
1,00E-02	3,40E+00	3,98E-04	9,60E-03	3,98E-04	4,78E+00	
1,00E-03	3,90E+00	1,26E-04	8,74E-04	1,26E-04	4,74E+00	
1,00E-04	4,50E+00	3,16E-05	6,84E-05	3,16E-05	4,83E+00	
solutions d'ion éthanoate						
concentration (mol.L ⁻¹)	pH	[H ₃ O ⁺] (mol.L ⁻¹)	[HO ⁻] (mol.L ⁻¹)	[CH ₃ CO ₂ H] (mol.L ⁻¹)	[CH ₃ CO ₂ ⁻] (mol.L ⁻¹)	pK _a
1,00E-02	8,4E+00	3,981E-09	2,51189E-06	2,51E-06	1,00E-02	4,8001091
1,00E-03	7,9E+00	1,259E-08	7,94328E-07	7,94E-07	9,99E-04	4,8003451
1,00E-04	7,4E+00	3,981E-08	2,51189E-07	2,51E-07	9,97E-05	4,8010923

Activité expérimentale 2. Étude d'un indicateur coloré

Commentaires

Cette activité, construite autour d'un indicateur coloré, le vert de bromocrésol (VBC), permet d'introduire la notion de diagramme de prédominance. La spectrophotométrie est utilisée pour déterminer les concentrations respectives d'acide et de base conjuguée dans des solutions tampons de différents pH. Les mesures sont exploitées pour tracer l'évolution des proportions de l'acide et de sa base conjuguée en fonction du pH.

Les spectres sont tracés pour toutes les solutions.

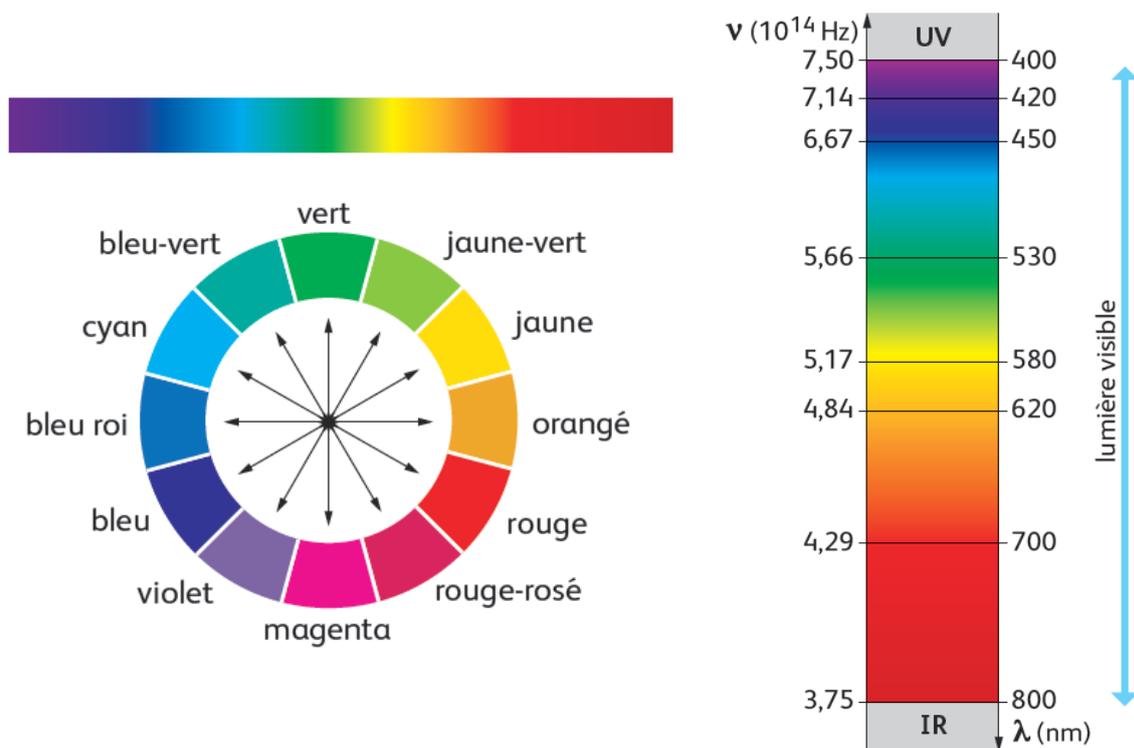
Le spectre de la solution de pH 2 est celui de la forme acide. On y relève $\lambda_{m,a}$, la longueur d'onde de son maximum d'absorption.

Le spectre de la solution de pH 8 est celui de la forme basique. On y relève $\lambda_{m,b}$, la longueur d'onde de son maximum d'absorption. Notons que ce spectre présente deux pics, on utilisera celui de plus grande intensité.

L'absorbance de la forme acide est nulle pour la longueur d'onde $\lambda_{m,b}$ et celle de forme basique est très négligeable devant celle de la forme acide à la longueur d'onde $\lambda_{m,a}$. Ainsi, la valeur de l'absorbance d'un mélange à $\lambda_{m,a}$ est proportionnelle à la concentration de la forme acide et la valeur de l'absorbance d'un mélange à $\lambda_{m,b}$ est proportionnelle à celle de la forme basique.

Le pK_a du VBC est de 4,9. Le VBC a été préféré au classique bleu de bromothymol (BBT) dont le pK_a de 7,0 a une valeur trop singulière : la mise en œuvre de cette activité avec le BBT risque de conduire les élèves à la conclusion erronée : « la base prédomine en milieu basique et l'acide en milieu acide ».

Pour répondre aux questions il peut être utile de fournir aux élèves le cercle des couleurs (page 121 du livre Sirius 1^e S) ainsi que le spectre (document 9 page 83 du livre Sirius 1^e S) reliant couleur et longueur d'onde.



Sirius T^{erm} S - Livre du professeur

Chapitre 17. Couples acide faible/base faible. Solution tampon

Solution de VBC utilisée

La solution de VBC utilisée est à une concentration de $0,1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, notons que pour bien dissoudre le VBC, il est nécessaire d'ajouter un peu d'éthanol à la solution.

Solutions tampon

Pour préparer les solutions tampon on peut utiliser la solution de Britton-Robinson :

- acide borique H_3BO_3 : $4,0 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$;
- acide phosphorique H_3PO_4 : $4,0 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$;
- acide éthanoïque $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$: $4,0 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

En titrant ce mélange par de la soude à $0,2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, on peut obtenir des solutions tampon de pH 2 à 12.

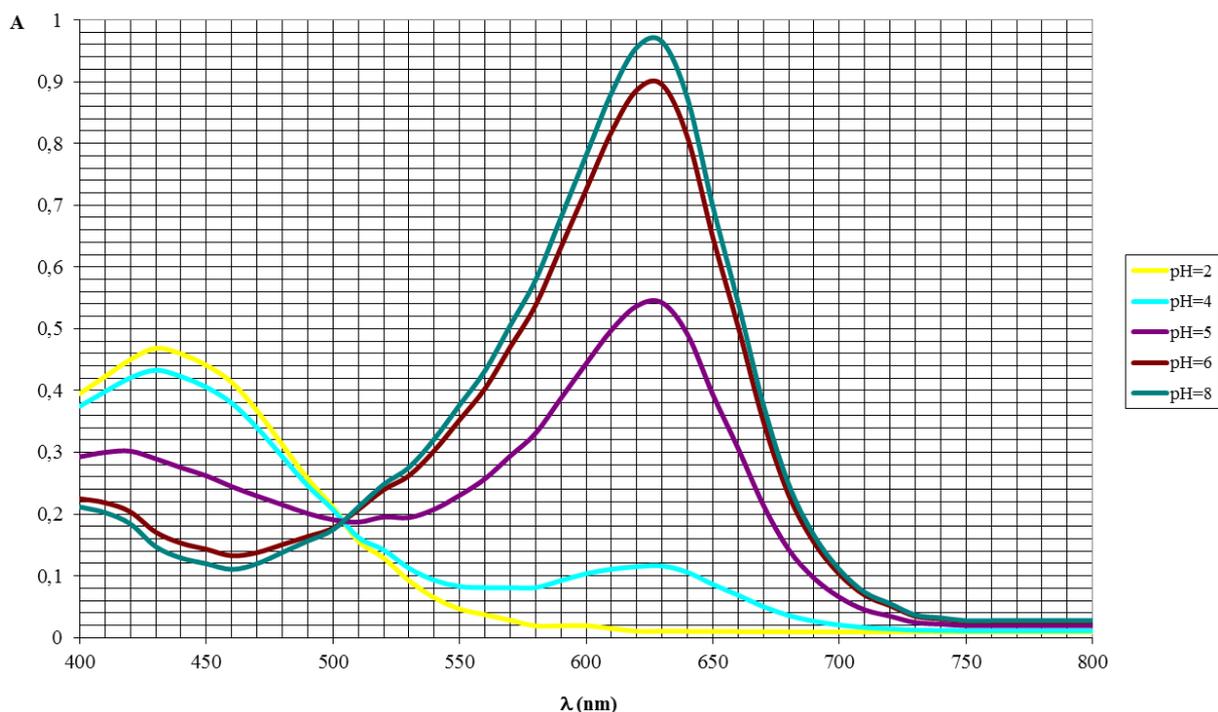
Un diagramme de prédominance plus précis peut être réalisé en préparant davantage de solution de tampons de pH variant entre 1 et 10 et en les répartissant entre les binômes de la classe.

Il est également possible de fournir la solution de Britton-Robinson aux élèves ainsi que de la soude à $0,2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ et de les faire réaliser les solutions tampon.

Réponses

1. Exploiter les résultats

a. *Dans le manuel élève, la question a été complétée. Elle devient : « Déterminer les longueurs d'onde $\lambda_{m,a}$ et $\lambda_{m,b}$ correspondant aux maxima d'absorbance des spectres obtenues pour les solutions de pH égal à 2 et à 8. (On choisira $\lambda_{m,a} < \lambda_{m,b}$)*



On mesure sur le graphique : $\lambda_{m,a} = 432 \text{ nm}$ et $\lambda_{m,b} = 625 \text{ nm}$.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 17. Couples acide faible/base faible. Solution tampon

b. La feuille de tableur est disponible dans le manuel numérique enrichi et sur le site compagnon Sirius.

pH	couleur	Aa	Ab
2	jaune	0,469	0,01
4	jaune-vert	0,433	0,116
5	vert	0,29	0,54
6	bleu-vert	0,171	0,891
8	bleu	0,147	0,96

2. Interpréter

a. Le spectre de la solution de pH 2 présente un maximum d'absorption pour une valeur de 430 nm (couleur bleu). La couleur de la solution est la couleur complémentaire de celle absorbée, c'est-à-dire le jaune.

Le spectre de la solution de pH 8 présente un maximum d'absorption pour une valeur de 625 nm (couleur orangée). La couleur de la solution est la couleur complémentaire de celle absorbée, c'est-à-dire le bleu.

Les couleurs jaune-vert, vert et bleu-vert rendent compte de l'absorbance simultanées au deux longueurs d'onde que l'on peut voir sur les spectres.

b. L'espèce HA de couleur jaune absorbe à $\lambda_{m,a}$ et l'espèce basique, de couleur bleue, à $\lambda_{m,b}$.

c. Les deux espèces sont présentes dans les solutions dont les spectres présentent une absorbance non-nulle aux deux longueurs d'onde : c'est le cas des solutions de pH 4, 5 et 6. À pH 2 et 8, elles peuvent être toutes deux présentes mais les mesures ne permettent pas de le mettre en évidence.

3. Raisonner

a. Lorsqu'une seule espèce dissoute en solution de concentration c , introduite dans une cuve de longueur ℓ absorbe le rayonnement lumineux de longueur d'onde λ , l'absorbance de la solution A vérifie $A = \varepsilon \ell c$.

b. À la longueur d'onde $\lambda_{m,b}$, seule l'espèce basique absorbe le rayonnement lumineux donc :

$$A_b = \varepsilon_b \ell [A^-] \quad (1)$$

À pH = 8, l'espèce basique est très majoritairement présente devant l'espèce acide :

$$[HA] \ll [A^-], \text{ donc } c = [HA] + [A^-] \approx [A^-]$$

À ce pH, la relation (1) devient :

$$A_{b,8} = \varepsilon_b \ell c, \text{ d'où } \varepsilon_b \ell = \frac{A_{b,8}}{c}$$

$$A_b = \frac{A_{b,8}}{c} \times [A^-]$$

La relation (1) s'écrit alors :

$$A_b = \frac{A_{b,8}}{c} \times [A^-], \text{ soit } \frac{A_b}{A_{b,8}} = \frac{[A^-]}{c}$$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 17. Couples acide faible/base faible. Solution tampon

La proportion de la forme basique du VBC est :

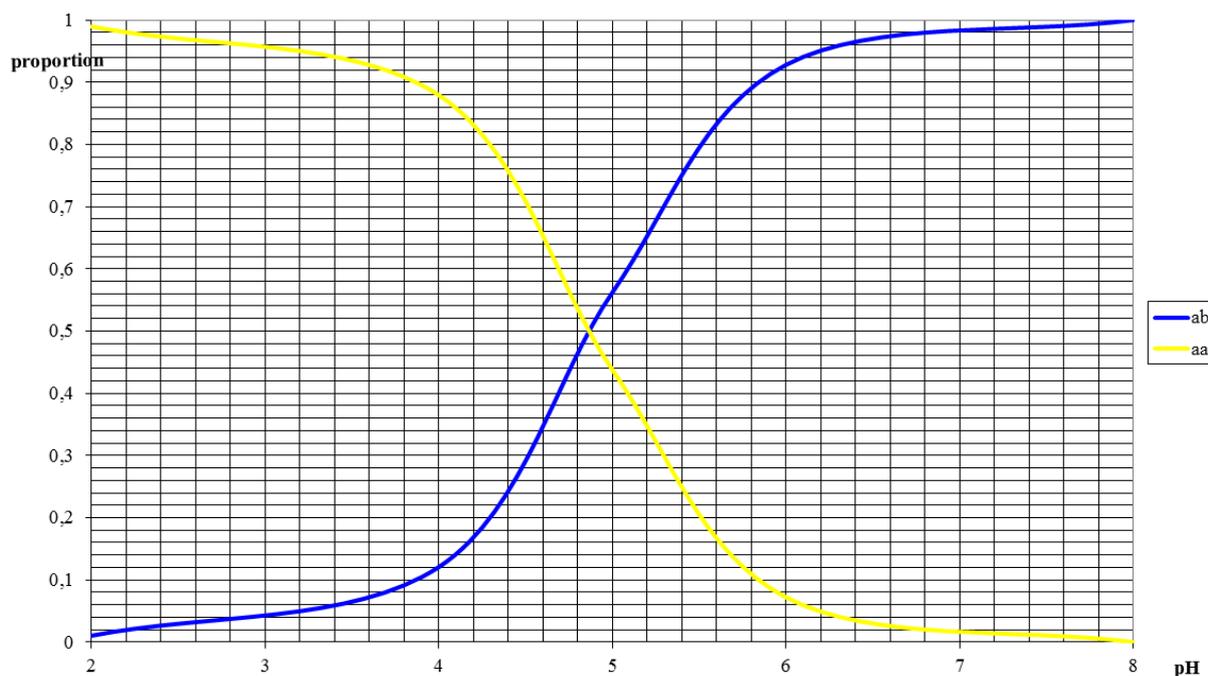
$$\alpha_b = \frac{[A^-]}{c} \text{ donc } \alpha_b = \frac{A_b}{A_{b,8}}$$

c. La proportion de la forme acide est :

$$\alpha_a = \frac{[HA]}{c} = \frac{c - [A^-]}{c} = 1 - \alpha_b$$

d.

pH	couleur	Aa	Ab	α_a	α_b
2	jaune	0,469	0,01	1	0,0104167
4	jaune-vert	0,433	0,116	0,9232409	0,1208333
5	vert	0,29	0,54	0,6183369	0,5625
6	bleu-vert	0,171	0,891	0,3646055	0,928125
8	bleu	0,147	0,96	0,3134328	1



e. En traçant l'allure des courbes α_b et α_a en fonction du pH, on trouve $\alpha_a = \alpha_b = 0,5$ pour un pH voisin de 5,0.

f. Le pK_a du couple vaut 4,9. L'incertitude de mesure sur la valeur du pH est de 0,1. Les résultats montrent donc que les formes acides et basiques sont en même proportion pour un pH égal au pK_a du couple.

Activité expérimentale 3. Étude des propriétés d'une solution tampon

Commentaires

Dans cette activité on montre que des solutions de même pH n'ont pas le même comportement vis-à-vis de l'addition de solutions d'acide fort, de base forte ou d'eau distillée. Le comportement particulier de solutions appelées solutions tampon est ainsi mis en évidence. Les solutions tampon utilisées sont les solutions étalon destinées à l'étalonnage des pH-mètres. De l'acide chlorhydrique et une solution d'hydroxyde de sodium dont les pH sont les mêmes que les solutions étalon sont également proposées.

On pourra prolonger la discussion en interrogeant les élèves sur l'intérêt d'utiliser des solutions tampon pour l'étalonnage des pH-mètres.

L'activité se prolonge par la mise en évidence des propriétés tampon d'une solution équimolaire d'un acide faible et de sa base conjuguée.

Une variante possible consiste à proposer aux différents binômes des solutions d'acide éthanoïque et d'ion éthanoate de proportions différentes afin de chercher à déterminer quelle solution des solutions tampon est la meilleure.

Réponses

1. Interpréter

	pH			
	initial	après ajout d'acide	après ajout de base	après ajout d'eau
Solution étalon pH 4	4,0	3,9	4,2	4,1
Solution étalon pH 7	7,0	6,9	7,1	7,0
Solution étalon pH 10	10,0	9,8	10,1	9,9
Acide chlorhydrique de concentration c_A	4,0	2,7	11,1	4,5
Solution d'hydroxyde de sodium de concentration c_B	10,0	2,7	11,3	9,5

Le pH des solutions étalon varie beaucoup moins que celui de l'acide chlorhydrique et de la solution d'hydroxyde de sodium vis-à-vis des trois perturbations : addition d'acide chlorhydrique, addition de solution d'hydroxyde de sodium, dilution. Le pH des solutions étalon est plus stable.

2. Prolonger l'expérience

a. Pour montrer que la solution obtenue a les propriétés d'une solution tampon, on peut lui faire subir les perturbations décrites dans l'expérience et mesurer les variations de pH consécutives à ces perturbations.

b. Pour 50 mL de la solution tampon préparée les perturbations précédentes vont varier de moins de 0,1 unité pH le pH initial de 4,8

La solution obtenue est une solution dont le pH reste stable et proche de 4,8 lorsqu'on y ajoute des petites quantités d'acide chlorhydrique, de solution d'hydroxyde de sodium ou d'eau.

Activité documentaire 4. Influence du pH en milieu biologique

Commentaires

Cette activité documentaire suppose que la catalyse enzymatique a déjà été étudiée. Elle permet de réinvestir les notions de liaisons faibles introduites en classe de 1^e S, la liaison hydrogène en particulier.

La sensibilité des enzymes au milieu dans lequel elles sont dissoutes a été évoquée dans le chapitre 13. Dans cette activité, on se propose de comprendre les causes de cette sensibilité.

Il est nécessaire d'avoir au préalable évoqué les diagrammes de prédominance.

En conclusion, une animation interactive est proposée. Elle utilise le modèle clé-serrure fréquemment évoqué pour modéliser l'adéquation entre une enzyme et son substrat. Il est alors important d'insister sur la notion de modèle : la possibilité de création de liaisons entre le substrat et l'enzyme est modélisée par une complémentarité de forme. Les élèves sont invités à rédiger une synthèse après avoir visualisé l'animation.

Réponses

1. Analyser les documents

La modification du pH entraîne une rupture des liaisons qui maintenaient la protéine repliée sur elle-même. La protéine se déplie.

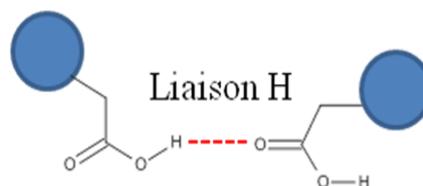
2. Interpréter

a. La liaison hydrogène s'établit entre l'atome d'hydrogène lié à un atome d'oxygène d'un résidu d'acide aminé et un atome d'oxygène d'un autre résidu d'acide aminé (figure ci-contre).

Si les acides-aminés sont sous leur forme basique, les atomes d'hydrogènes ne sont plus présents et la liaison ne peut plus s'établir.

b. Lorsque le pH augmente et dépasse le pK_a du couple acide aspartique/ion aspartate, la forme prédominante du couple est la forme basique. Comme on l'a vu en 2. a., la liaison hydrogène se rompt.

c. La modification est réversible si la liaison peut être reformée après avoir été rompue. Dans le cas précédent par exemple, si l'augmentation du pH n'a pas été trop importante, une diminution de pH permet de retrouver la forme acide et de reformer la liaison. Toutefois, si la molécule s'est dépliée dans l'intervalle de temps entre les deux variations, les deux résidus ne sont plus face à face et la liaison ne peut plus se former.



3. Conclure

Voici ci-dessous une proposition de synthèse.

Pour pouvoir catalyser la transformation d'un substrat en produit, l'enzyme doit établir des liaisons faibles avec le substrat au sein de son site actif.

Sur l'animation, la possibilité d'établir des liaisons est modélisée par une adéquation de forme entre le substrat et l'enzyme. Il existe un pH, appelé pH optimal, pour lequel l'adéquation est parfaite, les liaisons peuvent s'établir et l'enzyme peut jouer son rôle de catalyseur.

Lorsque l'on s'éloigne de ce pH, il n'y a plus d'adéquation de forme ce qui signifie que l'enzyme ne peut plus catalyser la transformation du substrat en produit.

Le pH optimal dépend de la nature de l'enzyme. On peut faire remarquer aux élèves que la pepsine est une enzyme stomacale : son pH optimal de 2 est bien adapté au pH très acide de l'estomac alors que la trypsine a un pH optimal de 8, voisin du pH de l'intestin dans le quel elle agit.

La pepsine et la trypsine catalyse la rupture par hydrolyse de certaines liaisons peptidiques

Exercices d'application

5 minutes chrono !

1. Mots manquants

- a. constante d'acidité ; $pK_a = -\log(K_a)$
- b. la base faible
- c. carboxylate ; amino
- d. peu ; d'acide ou de base

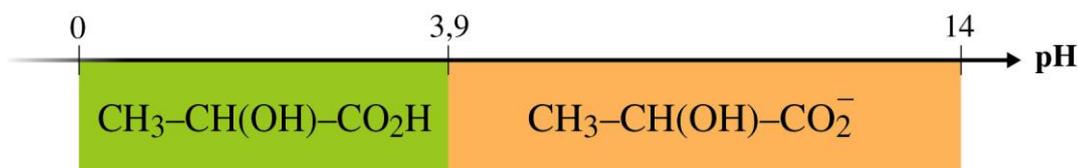
2. QCM

- a. Inférieur au pK_a du couple.
- b. NH_4^+ .
- c. L'espèce prédominante dépend du pK_a du couple .
- d. $1,3 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Compétences exigibles

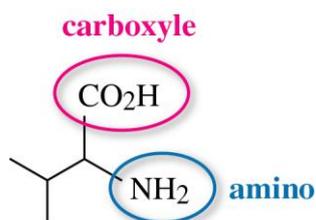
3. a. La base conjuguée a pour formule $\text{CH}_3\text{-CH(OH)-CO}_2^-$.

b.



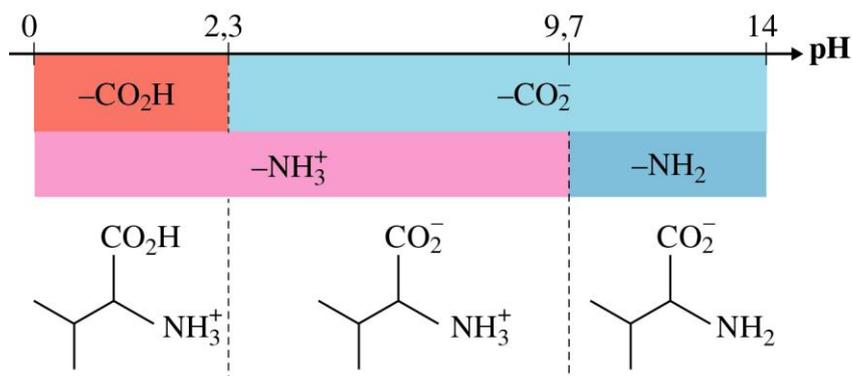
c. À un pH de 6,5 l'acide lactique est sous sa forme basique.

4. a. Les groupes carboxyle CO_2H et amine NH_2 ont des propriétés acido-basiques.

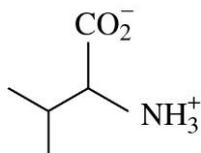


b. Le pK_a du couple $\text{-CO}_2\text{H}/\text{-CO}_2^-$ vaut 2,3 ; celui du couple $\text{-NH}_3^+/\text{-NH}_2$ vaut 9,7.

c. On trace les domaines de prédominance de l'acide et de la base de chaque couple puis on combine les deux diagrammes :



d. D'après le diagramme, à pH = 7,5, l'espèce prédominante est :



Compétences générales

5. a. Le pH diminue lors de l'inspiration et augmente lors de l'expiration.

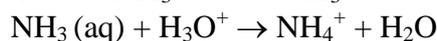
b. Les variations de la concentration en acide ($\text{CO}_2(\text{aq})$) sont responsables de cette évolution.

c.
$$\text{pH} = \text{p}K_a + \log \left(\frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{CO}_2]} \right).$$

d. Si l'on suppose que la concentration en ions HCO_3^- reste constante, lorsque $[\text{CO}_2]$ diminue lors de l'expiration, le rapport $\frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{CO}_2]}$ augmente et le pH également.

Inversement lors de l'inspiration, ce rapport diminue et le pH aussi.

e. Il s'agit d'une réaction entre la base NH_3 et l'acide H_3O^+ :



f. Cette réaction conduit à la consommation d'ions H_3O^+ et donc à l'augmentation du $\text{pH} = -\log[\text{H}_3\text{O}^+]$ du sang.

6. Si la teinte est jaune, l'espèce majoritaire est l'acide.

D'après le diagramme de prédominance de l'acide et de la base du couple représenté ci-dessous, on peut en déduire que le pH est inférieur à 5.



7. Voici les modifications apportées dans le manuel élève :

- le « bleu de bromophénol » remplace le « rouge de crésol » dans tout l'exercice ;
- le pH des tubes, de gauche à droite, est de 3 à 8 (au lieu de 4 à 9).

a. Un indicateur coloré est un couple acido-basique dont les formes acide et basique n'ont pas la même couleur en solution.

b. Le rouge de crésol est jaune pour des solutions de pH 4 et 5. Il est violet pour des solutions de pH 8 et 9. Pour des pH de 6 et 7, la couleur observée correspond à sa zone de virage. Son $\text{p}K_a$ est dans cette zone : $\text{p}K_a = 6,5 \pm 0,5$.

8. a. L'acide conjugué est l'ion $\text{CH}_3\text{-NH}_3^+$.

b.
$$\text{pH} = \text{p}K_a + \log \left(\frac{[\text{CH}_3\text{-NH}_2]}{[\text{CH}_3\text{-NH}_3^+]} \right)$$

c. Pour $\frac{[\text{CH}_3\text{-NH}_2]}{[\text{CH}_3\text{-NH}_3^+]} = 10 ;$

$$\text{pH} = \text{p}K_a + \log 10 = \text{p}K_a + 1 \text{ donc } \text{p}K_a = \text{pH} - 1 = 10,7.$$

d. Si pH = 9,7 alors :

$$\log \left(\frac{[\text{CH}_3\text{-NH}_2]}{[\text{CH}_3\text{-NH}_3^+]} \right) = \text{pH} - \text{p}K_a = 9,7 - 10,7 = -1$$

$$\text{donc } \frac{[\text{CH}_3\text{-NH}_2]}{[\text{CH}_3\text{-NH}_3^+]} = \frac{1}{10}$$

Il faut que la solution soit dix fois plus concentrée en acide. Il faut donc ajouter dix fois plus d'acide conjugué, c'est-à-dire $1,0 \times 10^{-2}$ mol.

9. a. L'espèce acide d'un couple prédomine pour un pH inférieur à son $\text{p}K_a$. L'espèce basique prédomine pour un pH supérieur à son $\text{p}K_a$.

b. Son erreur provient de la valeur de 7,0 du $\text{p}K_a$ du couple du BBT, qui correspond à la valeur de pH délimitant les solutions acides et les solutions basique.

c. Pour corriger cette erreur, il faudrait réaliser les mêmes expériences avec un autre indicateur coloré, de $\text{p}K_a$ différent de 7,0.

Exercices de méthode

10. Exercice résolu.

11. 1. La meilleure des solutions tampon est celle dont le pH varie le moins suite à l'addition d'acide fort. Il s'agit de la solution S_1 .

2. a. Suite à l'ajout d'acide, le pH diminue, la variation de pH est donc négative. On utilise des valeurs absolues pour que β soit positif.

b. Le pH n'a pas d'unité, la grandeur n s'exprime par exemple en mmol, la grandeur V en mL. On peut ainsi proposer :

Grandeur	β_1	β_2	β_3
unité	sans unité	mmol	mmol·L ⁻¹ ou mol·L ⁻¹

c.

exp	V (mL)	n (mmol)	S_1				S_2			
			pH final	β_1	β_2 (mmol)	β_3 (mol·L ⁻¹)	pH final	β_1	β_2 (mmol)	β_3 (mol·L ⁻¹)
1	500	5	4,8	0,2	25	0,05	1,6	4,6	0,4	0,025
2	100	5	4,0	1	5	0,05	3,0	3	2	0,025
3	100	2	4,6	0,4	5	0,05	4,2	4,2	0,8	0,025

3. a. La seule expression qui conduit à une unique valeur par solution quelle que soit l'expérience est l'expression β_3 .

b. Quelle que soit la solution tampon, la variation du pH est d'autant plus importante que la quantité d'acide apportée est grande et que le volume de la solution tampon est petit. Pour caractériser une solution tampon, il faut donc rapporter la variation de pH à la quantité d'acide introduite (c'est le cas de β_2 et β_3) et au volume de solution tampon (β_3).

c. Une bonne solution tampon est une solution dont le pH varie peu ($|\Delta\text{pH}|$ faible) pour une grande valeur de n et une faible valeur de V . Cela nécessite une grande valeur de β .

4. a. La solution doit vérifier, pour $n = 1$ mmol et $V = 100$ mL : $|\Delta\text{pH}| < 0,5$.

$$\text{Soit } \frac{1}{|\Delta\text{pH}|} > \frac{1}{0,5} \Rightarrow \beta_3 > \frac{n}{0,5} ; \beta_3 > \frac{1}{0,5} = 0,02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

b. On souhaite que $\beta_3 > 0,02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, cette valeur est donc une valeur minimale.

12. a. Le graphique présente les proportions des formes acide et basique en fonction du pH. La forme acide prédomine pour des pH inférieurs au $\text{p}K_a$ du couple. En milieu très acide, la forme acide est donc très majoritaire, c'est le cas de l'espèce représentée par la courbe rouge.

Donc rouge : ClOH,

bleu : ClO⁻.

b. Les concentrations en ClOH et ClO⁻ sont égales lorsque le pH de la solution est égal au $\text{p}K_a$ du couple. Sur le graphique, cette situation est repérée par l'intersection des courbes, dont l'abscisse correspond à $\text{pH} = 7,5$. Donc $\text{p}K_a = 7,5$.

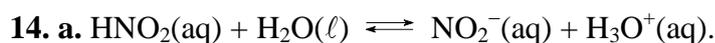
c. Sur le graphique, on lit les proportions de chaque espèce pour un pH de 7,0.

On trouve : 24 % de base ClO⁻ et 76 % d'acide ClOH.

Exercices d'entraînement

13.

Acide	Base conjuguée	K_a	pK_a
$C_2H_5CO_2H$	$C_2H_5CO_2^-$	$1,3 \times 10^{-5}$	4,9
$C_6H_5NH_3$	$^+C_6H_5NH_2$	$2,5 \times 10^{-5}$	4,6
NH_4^+	NH_3	$6,3 \times 10^{-10}$	9,2
HCO_2H	HCO_2^-	$1,6 \times 10^{-4}$	3,8



b. On utilise la relation $K_a = \frac{[NO_2^-] \times [H_3O^+]}{[HNO_2]}$.

D'après l'équation de la réaction précédente, la réaction produit autant d'ions NO_2^- que d'ions H_3O^+ donc dans la solution : $[NO_2^-] = [H_3O^+]$.

D'où : $K_a = \frac{[H_3O^+]^2}{[HNO_2]}$.

A.N. : $K_a = \frac{(3,1 \times 10^{-4})^2}{1,9 \times 10^{-4}} = 5,1 \times 10^{-4}$.

c. $pK_a = -\log K_a$.

A.N. : $pK_a = 3,3$.

15. a. Une solution tampon est une solution dont le pH varie peu suite à l'addition d'une quantité modérée d'acide ou de base ou suite à une dilution modérée.

b. $pH = pK_a + \log \left(\frac{[CH_3CO_2^-]}{[CH_3CO_2H]} \right)$.

c. Le pH souhaité est supérieur au pK_a , ce qui correspond à une situation où la base est majoritaire. Il faut donc introduire davantage de base.

16. a. On utilise la relation :

$$K_a = \frac{[ClO^-] \times [H_3O^+]}{[HClO]} \Rightarrow \frac{[ClO^-]}{[HClO]} = \frac{K_a}{[H_3O^+]} = \frac{10^{-pK_a}}{10^{-pH}} = 10^{-pK_a - pH}$$

A.N. pour $pH = 7,0$:

$$\frac{[ClO^-]}{[HClO]} = 10^{7,0-7,5} = 0,32$$

A.N. pour $pH = 7,6$:

$$\frac{[ClO^-]}{[HClO]} = 10^{7,6-7,5} = 1,3$$

b. Le pK_a du rouge de phénol est de 8,0. La zone de pH 7 à 7,6 fait partie de la zone de virage de cet indicateur coloré : zone dans laquelle une petite variation de pH entraîne une variation de couleur importante.

c. La couleur prise par la solution est comparée à l'échelle de teinte. La couleur dépend du pH de l'eau de la piscine mais également de la concentration en indicateur coloré. Pour pouvoir utiliser l'échelle de teinte, il faut que la concentration totale en indicateur coloré soit identique à celle utilisée pour réaliser l'échelle de teinte. C'est pourquoi la pastille de rouge de phénol doit être introduite dans un volume donné d'eau.

L'illustration de l'exercice 16 page 338 (chapitre 16) montre un exemple d'échelle de teinte d'un kit de mesure.

17. Voici ci-dessous une proposition de liste d'indicateurs colorés.

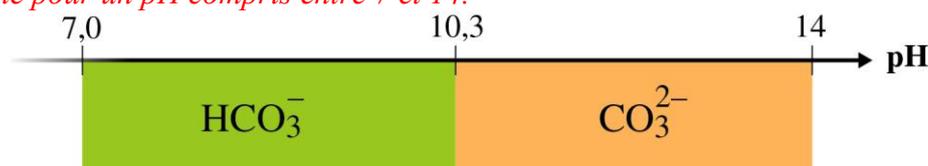
Indicateur	Couleur acide		Couleur base	pK_a
Violet de méthyle	Jaune		mauve	1,0
Hélianthine	Rouge		jaune	3,5
Rouge congo	Violet		Rouge	4,0
Vert de Bromocrésol	Jaune		Bleu	4,9
Rouge de méthyle	Rouge		Jaune	5,0
Bleu de bromothymol	Jaune		Bleu	7,1
Rouge de phénol	Jaune		Rouge	7,5
Rouge de crésol	Jaune		Rouge	8,0
Rouge neutre	Rouge		Jaune	7,5
Phénolphtaléine	Incolore		Rose	8,7
Bleu de thymol	Rouge	Jaune	Bleu	1,9 ; 9,2
Jaune d'alizarine	Jaune		Orange	11,0
Carmin d'indigo	Bleu		Jaune	13,0

a. La régulation du pH est assurée par la solution tampon PBS (buffer = tampon en anglais). Le contrôle de la valeur du pH est assuré par la présence de l'indicateur coloré « rouge de phénol ».

b. L'indicateur coloré est un couple acide base de $pK_a = 7,5$. Sa forme acide (majoritaire si le pH du milieu est inférieur à 7,5) est jaune et sa forme basique (majoritaire si le pH du milieu est supérieur à 7,5) est rouge.

c. La couleur rose du rouge de phénol correspond à sa zone de virage. Une contamination bactérienne se traduit par une couleur jaune, ce qui correspond à une acidification du milieu. La couleur rouge qui apparaît lors d'une attaque fongique montre que cette dernière s'accompagne d'une élévation du pH.

18. a. Dans le manuel élève, la question est complétée afin de préciser qu'il faut dessiner le diagramme pour un pH compris entre 7 et 14.



b. Un pH de 7,7 correspond au domaine où l'acide HCO_3^- est majoritaire devant la base CO_3^{2-} . De plus, cette valeur est très éloignée du pK_a : l'acide HCO_3^- est donc ultra-majoritaire devant CO_3^{2-} : donc $[CO_3^{2-}] \ll [HCO_3^-]$.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 17. Couples acide faible/base faible. Solution tampon

c. En négligeant le terme $[\text{CO}_3^{2-}]$, le TAC s'écrit :

$$\text{TAC} = 100 \times \left(\frac{[\text{HO}^-]}{2} + \frac{[\text{HCO}_3^-]}{2} \right) \times M_{\text{CaCO}_3}$$

d'où : $\text{TAC} = 100 \times \left(\frac{[\text{HO}^-]}{2} + \frac{[\text{HCO}_3^-]}{2} \right) \times M_{\text{CaCO}_3} \Rightarrow [\text{HO}^-] + [\text{HCO}_3^-] = 2 \times \frac{\text{TAC}}{100 \times M_{\text{CaCO}_3}}$.

On en déduit :

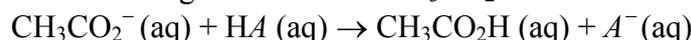
$$[\text{HCO}_3^-] = 2 \times \frac{\text{TAC}}{100 \times M_{\text{CaCO}_3}} - [\text{HO}^-] = 2 \times \frac{\text{TAC}}{100 \times M_{\text{CaCO}_3}} - \frac{K_e}{[\text{H}_3\text{O}^+]} = 2 \times \frac{\text{TAC}}{100 \times M_{\text{CaCO}_3}} - \frac{K_e}{10^{-\text{pH}}}$$

A.N. : $[\text{HCO}_3^-] = 2 \times \frac{7,8}{100 \times (40,1 + 12 + 16 \times 3)} - \frac{10^{-14}}{10^{-7,7}} = 1,6 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

19. a. On utilise la relation : $\text{pH} = \text{p}K_a + \log \left(\frac{[\text{CH}_3\text{CO}_2^-]}{[\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}]} \right)$.

A.N. : $\text{pH} = 4,75 + \log \left(\frac{0,175}{0,125} \right) = 4,9$.

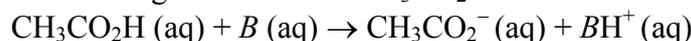
b. L'acide fort ajouté noté HA réagit avec la base CH_3CO_2^- selon la réaction d'équation :



Cette réaction entraîne la consommation de l'ion CH_3CO_2^- et la formation de l'acide

$\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$. La grandeur $\log \left(\frac{[\text{CH}_3\text{CO}_2^-]}{[\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}]} \right)$ diminue donc et le pH diminue.

La base forte ajoutée noté B réagit avec l'acide $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$ selon la réaction d'équation :



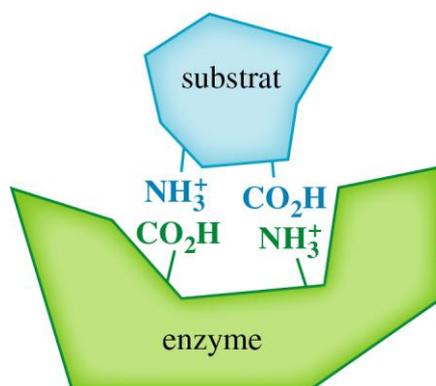
Cette réaction entraîne la consommation de l'acide $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$ et la formation de l'ion

CH_3CO_2^- . La grandeur $\log \left(\frac{[\text{CH}_3\text{CO}_2^-]}{[\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}]} \right)$ augmente donc et le pH augmente.

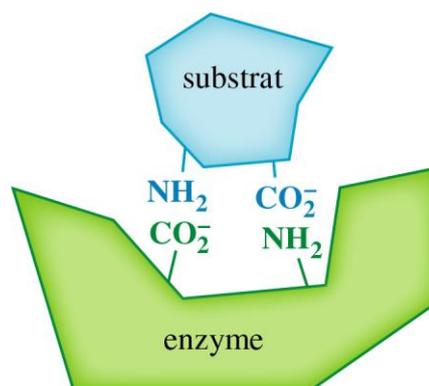
20. a. En milieu très acide, les groupes carboxyle sont sous leur forme acide $-\text{CO}_2\text{H}$ et en milieu très basique sous leur forme basique $-\text{CO}_2^-$.

b. En milieu très basique, les groupes amino sont sous leur forme acide $-\text{NH}_3^+$ et en milieu très basique sous leur forme basique $-\text{NH}_2$.

c. et d.



En milieu très acide



En milieu très basique

e. Dans ces milieux, il ne peut plus y avoir d'attraction entre charges opposées puisque l'un des groupes est sous une forme neutre : la liaison entre l'enzyme et le substrat ne peut pas s'établir et l'enzyme ne peut pas jouer son rôle de catalyseur.

21. a. La solution tampon utilisée est un mélange équimolaire d'acide éthanoïque et d'ions éthanoate. L'animation montre que lors de l'addition d'un acide fort, les ions « H⁺ » ajoutés sont consommés par la base CH₃CO₂⁻ et lors de l'addition d'une base forte les ions « HO⁻ » ajoutés sont consommés par l'acide CH₃CO₂H. Ceci montre en quoi une solution tampon atténue l'effet de l'addition d'un acide fort ou d'une base forte.

b. La solution tampon montre la « disparition » des ions H⁺ et HO⁻, alors qu'il en reste toujours en solution. Elle ne montre pas la variation du pH, atténuée mais existante, qui résulte de la modification des concentrations en acide et en base conjugué (cf. exercice 19).

22. a. Couples : H₃A/ H₂A⁻ ; H₂A⁻/ HA²⁻ ; HA²⁻/A³⁻ (on obtient la formule de la base à partir de l'acide en retirant un atome d'hydrogène et en diminuant la charge d'une unité).

b. L'espèce la plus acide H₂A est majoritaire en milieu très acide. Celle qui lui succède lorsque le pH augmente est sa base conjuguée, etc.

D'où :

- courbe rouge : H₃A
- courbe verte H₂A⁻
- courbe violette : HA²⁻
- courbe bleue : A³⁻

c. $\text{pH} = \text{p}K_a + \log \left(\frac{[A^-]}{[HA]} \right)$ en notant HA l'acide et A⁻ sa base conjuguée.

d. Les concentrations sont égales lorsque le pH est égal au pK_a du couple.

e. L'intersection des courbes, représentant les proportions d'un acide et de sa base conjuguée, correspond à l'égalité de leurs concentrations. L'abscisse de l'intersection des courbes donne donc le pK_a du couple considéré.

Couple	H ₃ A/ H ₂ A ⁻	H ₂ A ⁻ / HA ²⁻	HA ²⁻ /A ³⁻
pK_a	3,1	4,8	6,4

23. a. L'encre réalisée est une solution de la base HCO₃⁻. Lorsque l'on écrit sur le papier avec la solution et que l'encre sèche (l'eau s'évapore), elle laisse des traces de cette base. Le jus de raisin est une solution dans laquelle les pigments colorés se comportent comme des indicateurs colorés. Sa couleur dépend du pH. Le jus de raisin a un pH initial donné (plutôt acide) dans lequel les pigments sont de couleur violette. En présence d'ion HCO₃⁻, le pH est modifié, l'indicateur coloré change de forme acido-basique et donc de couleur.

b. « La couleur du jus de raisin peut varier quand on lui ajoute certaines substances comme le bicarbonate de soude. Tu peux l'observer en ajoutant du bicarbonate de soude directement dans du jus de raisin. Quand tu écris sur la feuille tu laisses des traces de bicarbonate de soude et quand tu peins ta feuille avec le jus de raisin, le jus change de couleur là où il rencontre les traces de bicarbonate de soude. »

24. La photographie montre que l'indicateur coloré peut présenter, en fonction du pH de la solution trois teintes distinctes, séparées par des zones de virage entre deux couleurs :

- pH = 1 : couleur rouge
- pH = 2 : couleur orangée, zone de virage
- pH = 3, 4, 5, 6, 7 : couleur jaune
- pH = 7, 8, 9 : couleur verte, zone de virage
- pH = 10, 11, 12 : couleur bleue

On en déduit que le bleu de thymol est un diacide dont les couples peuvent être notés H_2A/HA^- et HA^-/A^{2-} . H_2A est de couleur rouge, HA^- jaune et A^{2-} bleu.

On peut évaluer les pK_a de ces deux couples par les valeurs de pH correspondant au milieu des zones de virage :

- couple H_2A/HA^- : $pK_{a1} = 2,0 \pm 0,5$;
- couple HA^-/A^{2-} : $pK_{a2} = 9 \pm 1$.

Ces valeurs sont en accord avec les valeurs lues sur le document (1,9 et 9,2).

25. a. Les concentrations molaires des espèces de masse molaire M se déduisent des masses m ajoutées dans un échantillon de volume V d'eau :

$$[HB^+] = \frac{\frac{m_{HBCl}}{M_{HBCl}}}{V}$$

car en se dissolvant, 1 mol de $HBCl(s)$ fournit une mole de HB^+ et $[B] = \frac{m_B}{M_B} \cdot \frac{1}{V}$.

A.N. : la formule de brute de B est : $C_4H_{11}NO_3$ donc $M_B = 121 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$,

la formule de brute de $HBCl$ est : $C_4H_{12}NO_3Cl$ donc $M_{HBCl} = 157,5 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$,

$$[HB^+] = \frac{2,0}{1} \cdot \frac{157,5}{157,5} = 1,27 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} ;$$

$$[B] = \frac{4,9}{1} \cdot \frac{121}{121} = 4,05 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}.$$

$$\text{b. } pH = pK_a + \log\left(\frac{[B]}{[HB^+]}\right).$$

$$\text{c. A.N. à } 20^\circ\text{C} : pH = 8,3 + \log\left(\frac{4,05}{1,27}\right) = 8,8.$$

d. Le pK_a du couple diminue de 0,03 unité par élévation de 1 degré Celsius de la température.

Il vaut 8,3 à 20°C ; il diminue de $0,03 \times (37 - 20) = 0,5$ à 37°C et il augmente de $0,03 \times (20 - 10) = 0,3$ à 10°C .

D'où, à 37°C : $pH = 8,8 - 0,5 = 8,3$ et $pH = 8,8 + 0,3 = 9,1$ à 10°C .

26. a. On doit mesurer le pH et en déduire $[H_3O^+] = 10^{-pH}$.

b. Matériel nécessaire : pH-mètre, sonde de pH (ou deux électrodes, l'une indicatrice de pH, l'autre de référence), bécher, agitateur magnétique, barreau magnétique, deux solutions étalon.

c. On observe sur les spectres que pour une absorbance maximale de la forme acide (autour de 430 nm), l'absorbance de la forme basique est quasiment nulle. Une mesure d'absorbance d'un mélange d'acide et de base à cette longueur d'onde permet d'évaluer la concentration de la forme acide en utilisant la loi de Beer-Lambert (le coefficient d'absorption molaire pourra être déterminé grâce à la courbe rouge). Réciproquement, des mesures d'absorbance à 620 nm (maximum d'absorbance de la base, absorbance nulle de l'acide) permettront de déterminer la concentration en base dans un mélange.

d. Matériel nécessaire : spectrophotomètre, cuves, eau distillée.

27. Dans le manuel élève, l'unité de la concentration en $[CO_2]$ a été modifiée (début de la 2^e colonne) : elle est en mmol·L⁻¹ (et non en mol·L⁻¹).

a. La valeur 7,4 du pH du sang est supérieure au pK_a du couple (6,1). La forme basique HCO₃⁻ prédomine donc devant la forme acide (CO₂, H₂O).

b.
$$pH = pK_a + \log \left(\frac{[HCO_3^-]}{[CO_2]} \right).$$

c. $[CO_2] = 2,3 \times 10^{-4} \times 5,3 \times 10^3 = 1,2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$. La relation de la question b. peut s'écrire :

$$K_a = \frac{[HCO_3^-] \times [H_3O^+]}{[CO_2]} \Rightarrow [HCO_3^-] = K_a \times \frac{[CO_2]}{[H_3O^+]}$$

A.N. : $[HCO_3^-] = 10^{-6,1} \times \frac{1,2}{10^{-7,4}} = 24 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$.

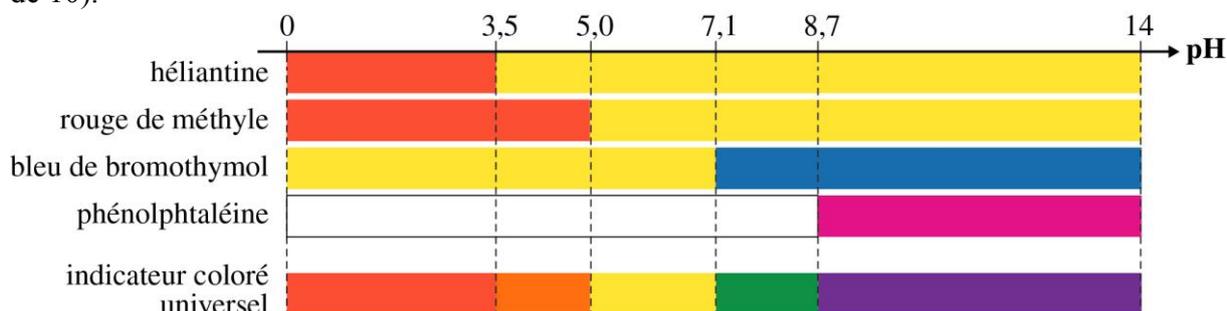
d. Un défaut d'ions HCO₃⁻ entraîne une diminution du pH du sang comme le montre la relation b. Pour maintenir le pH constant, il faut également diminuer la concentration en CO₂ dissous. L'organisme tente d'obtenir cette diminution en amplifiant la respiration (chaque expiration expulse du CO₂ et diminue sa concentration sanguine).

Exercices de synthèse

28. On peut dresser les diagrammes de prédominance de chaque indicateur coloré, en indiquant les couleurs associées à leur forme acide ou basique.

Le diagramme ci-dessous montre que les pK_a des couples utilisés sont régulièrement espacés. Les indicateurs colorés ont été choisis de telle sorte qu'il n'y ait pas trop de superposition de couleur dans chaque intervalle. La dernière ligne donne une indication de la couleur observée dans chaque plage de pH mais elle ne tient pas compte des zones de virage. La réalisation d'une échelle de teinte est nécessaire pour pouvoir exploiter cet indicateur coloré universel.

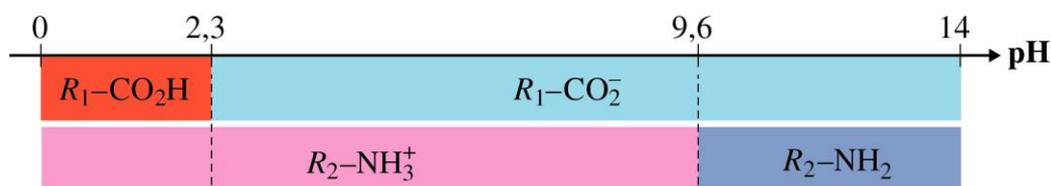
Cet indicateur coloré ne permet pas de différencier des solutions de pH très basiques (au-delà de 10).



29. Voici les modifications apportées dans le manuel élève :

- la « valine » remplace partout dans l'exercice la « proline » ;
- $pK_{a1} = 2,3$ et $pK_{a2} = 9,6$.

1. a.

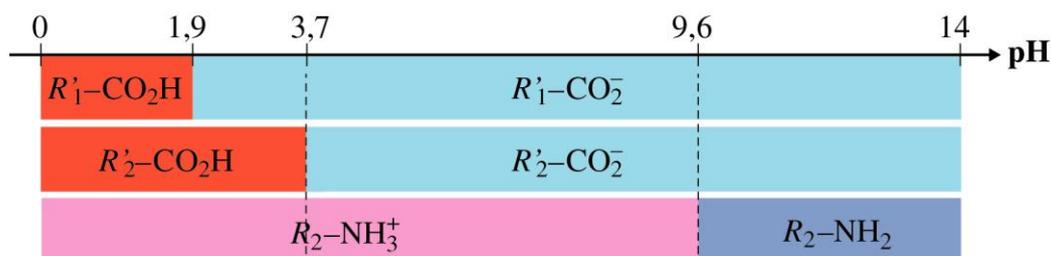


b. Dans l'intervalle $[0 ; 2,3]$, le groupe carboxyle est neutre et le groupe amino possède une charge $+I$. L'acide aminé possède donc une charge globale $+I$.

Dans l'intervalle $[2,3 ; 9,6]$, le groupe carboxyle possède une charge $-I$ et le groupe amino possède une charge $+I$. L'acide aminé possède donc une charge globale $-I + I = 0$.

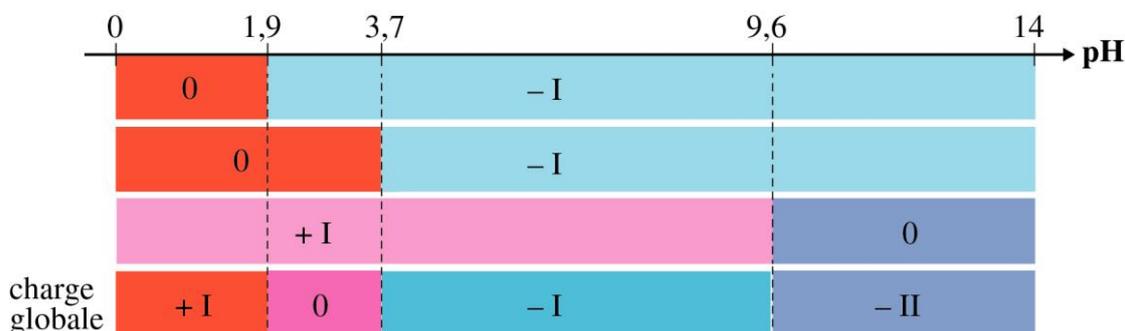
Dans l'intervalle $[9,6 ; 14]$, le groupe carboxyle possède une charge $-I$ et le groupe amino est neutre. L'acide aminé possède donc une charge globale $-I$.

2. a.



Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 17. Couples acide faible/base faible. Solution tampon

b. Sur le diagramme ci-dessous on a remplacé les différentes formes par leur charge. Sur la dernière ligne on fait la somme des charges pour déterminer la charge globale de l'acide aspartique pour chacun des 4 intervalles de pH déterminés :



c. À un pH égal à 7,0 par exemple, la valine est neutre et l'acide aspartique présente une charge $-I$.

30. Dans le manuel élève, et comme dans l'exercice précédent, la « valine » remplace la « proline ».

Sur le papier, les espèces chargées positivement seront attirées par la borne $-$ du générateur, les espèces chargées négativement par la borne $+$ et les espèces neutres ne migreront pas. D'après l'exercice 29, à un pH égal à 6, l'acide aspartique possède une charge $-I$ et la valine est neutre. On observera donc la migration de l'acide aspartique vers la borne $+$ et une absence de migration de la valine.

31. a. La concentration totale du BBT en solution est c . Il se répartit sous ses deux formes acide HIn et basique In^- donc $c = [HIn] + [In^-]$.

b. D'après la loi de Beer-Lambert :

$$A_{620} = \varepsilon_{620} \ell [In^-]$$

où ℓ est la longueur de la cuve et ε_{620} le coefficient d'absorption molaire de In^- à 620 nm.

c. Lorsque $[HIn] \ll [In^-]$, $c \approx [In^-]$; la relation du **b.** s'écrit :

$$A_{\max} = \varepsilon_{620} \ell c$$

d. De la relation établie en **c.**, on déduit :

$$\varepsilon_{620} \ell = \frac{A_{\max}}{c}$$

La relation de **b.** devient $A_{620} = \frac{A_{\max}}{c} [In^-]$, d'où $[In^-] = c \frac{A_{620}}{A_{\max}}$.

e. D'après la relation établie en **d.** :

$$\%In^- = 100 \frac{A_{620}}{A_{\max}}$$

$$\text{de plus : } \%HIn = 100 - \%In^-.$$

f. La feuille de tableur est disponible dans le manuel numérique enrichi et sur le site compagnon Sirius.

g. Lorsque $pH = pK_a$, les formes HIn et In^- sont en même proportion. Sur le graphique, on lit lorsque les courbes se croisent : $pH = 7,2$. On peut donc évaluer $pK_a \approx 7,2$.

32. Dans le manuel élève, le pK_a du couple HIn/In^- a été modifié : il est de 3,5.

1. a. La solution est rouge, ce qui correspond à la couleur de la forme acide majoritaire dans cette solution commerciale.

b. Un échantillon de solution de masse $m = 100$ g a un volume V d'environ 100 mL (si l'on assimile la solution à de l'eau de masse volumique $1\text{kg}\cdot\text{L}^{-1}$). Il contient une masse d'hélianthine égale à $10^{-3} \times m$, soit une quantité :

$$n = \frac{10^{-3} \times m}{M} \text{ d'hélianthine de masse molaire } M$$

D'où la concentration :

$$c = \frac{\frac{10^{-3} \times m}{M}}{V} = \frac{0,1}{327,34} = 3,1 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

2. La solution S_1 est une solution d'acide, son pH est donc acide, c'est-à-dire inférieur à 7,0 à 25°C.

La solution S_2 est une solution de base, son pH est donc basique, c'est-à-dire supérieur à 7,0 à 25°C.

3. Le pH de la solution S_2 est supérieur à 7 donc supérieur au $pK_a = 3,5$ de l'hélianthine. La forme acido-basique majoritaire de cet indicateur coloré sera donc la forme basique. On prévoit donc que la couleur de la solution S_2 , à laquelle on aura ajouté quelques gouttes d'hélianthine, aura la couleur de sa base conjuguée, c'est-à-dire jaune.

4. a. La couleur du tube n°2 est bien jaune comme prévu.

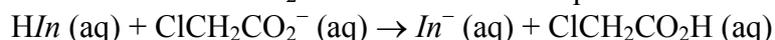
b. La couleur rouge du tube n°1 montre que l'espèce majoritaire y est HIn , ce qui signifie que le pH de la solution est inférieur au pK_a , c'est-à-dire inférieur à 3,5. Le pH du second tube de couleur jaune est quant à lui supérieur à 3,5, mais on sait qu'il est même supérieur à 7.

c. Dans la solution S_2 , la forme majoritaire de l'hélianthine est In^- .

5. a. Les tubes 1 et 3 présentent la même couleur rouge mais l'intensité des teintes est différente. La couleur du tube n°3 est plus intense parce que l'indicateur coloré y est plus concentré.

b. En revanche, entre les tubes 2 et 4 il n'y a pas qu'une différence d'intensité : le tube 2 est jaune pâle alors que le tube n°4 est orangé foncé. Le tube 2 contient l'espèce In^- à faible concentration alors que le tube 4 contient un mélange HIn et In^- à plus grande concentration.

c. L'hélianthine introduite sous sa forme acide en grande quantité a réagi avec la base $ClCH_2CO_2^-$ présente dans la solution S_2 selon la réaction d'équation :



6. La réaction écrite en 5. c. se produit également dans le tube n°2, mais la quantité de HIn introduite est très faible et la réaction n'entraîne qu'une très petite modification de la concentration en ions $ClCH_2CO_2^-$.

Les indicateurs colorés sont des espèces acido-basiques, susceptibles de modifier le pH du milieu dans lequel elles sont introduites si leur quantité est trop importante. Il faut donc les utiliser avec modération.

33. Exemple de synthèse de documents

Dans le manuel élève, la question de synthèse a été modifiée de cette manière : « Rédiger une synthèse de ces documents en 40 lignes de manière à expliquer en quoi les propriétés acido-basiques de l'aspirine sont impliquées dans l'élaboration de la formulation du médicament. Expliquer les avantages et les inconvénients des différentes formulations ».

L'aspirine est un couple acide faible (l'acide salicylique HA)/base faible (l'ion salicylate A^-) de $pK_a = 3,5$. L'acide est liposoluble et faiblement soluble dans l'eau, la base est hydrosoluble et faiblement soluble dans les lipides.

L'aspirine ingérée par voie orale peut être absorbée dans le sang au niveau de l'estomac ou au niveau de l'intestin. L'absorption est plus rapide quand elle a lieu au niveau de l'estomac, l'effet est retardé quand elle a lieu dans l'intestin.

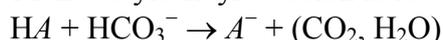
L'effet secondaire principal de l'aspirine est une toxicité gastrique : en présence d'aspirine, les parois stomacales sont moins protégées contre l'acidité de l'estomac.

Le milieu stomacal est très acide (pH égal à 2). La muqueuse gastrique est protégée de cette acidité par les prostaglandines. Or, l'aspirine inhibe la synthèse de ces prostaglandines en se dissolvant dans les graisses de la muqueuse gastrique. La toxicité de l'aspirine est donc liée à sa possible dissolution dans les parois stomacales.

Dans le milieu stomacal de pH égal à 2, et donc inférieur au pK_a du couple HA/A^- , c'est la forme acide, toxique pour les muqueuses gastriques, qui est majoritaire.

Les formulations proposées exploitent les propriétés acido-basiques de l'aspirine :

- L'aspirine peut être ingérée dissoute dans un verre d'eau. La forme ingérée est alors basique.
 - C'est le cas de l'ASPEGIC[®] qui contient l'ion acétylsalicylate.
 - La solubilisation dans l'eau peut être obtenue par réaction acido-basique, c'est le cas de la formulation effervescente qui contient l'acide acétylsalicylique HA et la base hydrogénocarbonate. La solubilisation de l'aspirine repose alors sur la formation de l'ion acétylsalicylate selon la réaction d'équation :



Le dioxyde de carbone formé n'est pas suffisamment soluble dans l'eau : du dioxyde de carbone gazeux se forme, d'où l'aspect « effervescent ».

Cette formulation permet une bonne dissolution de l'aspirine, ce qui favorise son absorption plus rapide au niveau de l'estomac. L'effet est rapide mais il présente l'inconvénient de présenter la toxicité gastrique évoquée précédemment.

- L'aspirine peut être avalée en comprimés gastro-résistants (ASPIRINE pH8TM[®]). Le principe actif est dissimulé sous un enrobage qui résiste à l'acidité de l'estomac et traverse l'estomac sans être dissous. Le comprimé se dissout au niveau de l'intestin, à un pH de 8 supérieur au pK_a du couple HA/A^- . La forme majoritaire est alors l'ion salicylate A^- . Cette formulation évite la toxicité gastrique de l'aspirine mais l'effet thérapeutique est retardé. Les documents ne permettent pas de savoir si la forme basique est bien soluble dans les parois de l'intestin, mais on peut supposer que ces parois sont lipidiques et que l'absorption est alors difficile puisque la forme majoritaire n'est pas liposoluble.
-

Chapitre 18 – Transferts thermiques d'énergie

Manuel pages 363 à 382

Choix pédagogiques

Ce chapitre introduit le thème « Énergie, matière et rayonnement » de la deuxième partie du programme « Comprendre - Lois et modèles ».

Pour cela, une première activité documentaire sur les étoiles à neutrons permet de saisir le changement des ordres de grandeur lors du passage du macroscopique au microscopique, notamment sur le plan du dénombrement (constante d'Avogadro), ou de la taille des objets.

Une deuxième activité documentaire sur le microscope à force atomique montre que les résultats des observations à très petite échelle fournissent des représentations au moyen d'images (il faudra être prudent sur la signification du terme « visualiser ») des atomes et des molécules, qui permettent de remonter aux dimensions et à la structure de la matière à ce niveau d'organisation.

Une activité expérimentale permet ensuite de comparer l'isolation thermique de différents matériaux et d'introduire ainsi la notion de conductivité thermique.

Puis, dans une dernière activité documentaire, l'effet de serre est étudié en effectuant un bilan énergétique de l'atmosphère, ce qui permet de faire un lien avec la thématique sur les enjeux énergétiques de la troisième partie « Agir – Défis du XXI^e siècle ».

Le cours découlant de ces activités reprend les notions précédentes en mettant notamment en évidence l'aspect nécessairement statistique de notre connaissance des systèmes formés d'un grand nombre d'entités microscopiques. Dans l'étude des transferts d'énergie entre systèmes macroscopiques, des notions de base de la thermodynamique (énergie interne, transferts thermiques, travail, capacité thermique), première étape vers l'étude future de ses principes, sont également traitées. À cette occasion, certains éléments méthodologiques de la thermodynamique sont alors mis en place : définition du système étudié, identification de la nature et du sens des transferts d'énergie, analyse critique des résultats obtenus et mise en perspective avec des dispositifs réels.

Enfin, la diversité des transferts thermiques permet d'évoquer l'irréversibilité des phénomènes liée en particulier aux processus diffusifs, et d'aborder des aspects de la vie courante tenant aux préoccupations énergétiques. Ainsi, dans les cours et dans les exercices, les bilans d'énergie sont appliqués au domaine de l'habitat (problématique du chauffage d'une habitation, géothermie, pompe à chaleur, climatiseur, réfrigérateur,...), du transport (moteurs, effets thermiques liés au frottement,...) ou bien encore celui de la production d'énergie.

Des animations et des vidéos documentaires illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et, certaines d'entre elles, sur les sites Internet compagne Sirius.

Page d'ouverture

Pour diminuer leur consommation énergétique, de plus en plus d'habitants optent pour une maison passive.

La description de la photographie doit permettre aux élèves d'évoquer la problématique des transferts thermiques et du coût (financier et environnemental) généré notamment par le chauffage des habitations en hiver. Les élèves réfléchiront ensuite aux différents moyens permettant de limiter les transferts thermiques entre les habitations et l'environnement extérieur.

Activités

Activité documentaire 1. Les étoiles à neutrons

Commentaires

Au travers des documents décrivant les différentes phases de la vie des étoiles supergéantes, cette activité permet d'étudier les ordres de grandeur associés aux phénomènes stellaires spectaculaires qui en découlent.

La dernière question demande une courte synthèse argumentée qui peut s'appuyer sur une recherche documentaire complémentaire.

Réponses

1. Extraire des informations

Les valeurs numériques concernant la masse et la taille d'une étoile supergéante dans différentes phases de sa vie sont :

	Masse de l'étoile	Taille de l'étoile
Étoile supergéante	masse supérieure à 8 masses solaires (supérieure à 10^{31} kg)	rayon de l'étoile de l'ordre de 100 rayons solaires (de l'ordre de 10^8 km)
Explosion de l'étoile supergéante : supernova		
Étoile à neutrons	masse de l'ordre de 1,5 masse solaire (de l'ordre de 10^{30} kg)	rayon de l'étoile de l'ordre de 10^1 km

2. Interpréter les documents

a. L'ordre de grandeur de la taille d'un noyau atomique est 10^{-15} m alors que l'ordre de grandeur de la taille du « noyau » résiduel d'une étoile supergéante, appelé étoile à neutrons, est 10^4 m. Le « noyau » résiduel est donc **10^{19} fois plus grand** qu'un noyau atomique !

b. La masse d'un neutron est égale à : $1,67 \times 10^{-27}$ kg. Son ordre de grandeur est donc 10^{-27} kg. Cette masse est 10^{57} fois plus petite que celle d'une étoile à neutrons (qui vaut 10^{30} kg).

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur

Chapitre 18. Transferts thermiques d'énergie

c. En considérant que l'étoile à neutrons est constituée essentiellement de neutrons, on calcule que l'ordre de grandeur N du nombre de neutrons dans une telle étoile est égal à :

$$N = \frac{10^{30}}{10^{-27}} = \mathbf{10^{57}}. \text{ C'est un nombre gigantesque !}$$

d. L'ordre de grandeur n du nombre de neutrons (en mole) dans une étoile à neutrons est égal à :

$$n = \frac{N}{N_A} = \frac{10^{57}}{6,02 \times 10^{23}} \text{ donc l'ordre de grandeur de } n \text{ est } \mathbf{10^{33} \text{ mol}}$$

e. L'ordre de grandeur V du volume d'une étoile à neutrons, considérée comme sphérique et de rayon R , est égal à :

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi \times (10^4)^3 \text{ donc l'ordre de grandeur de } V \text{ est } \mathbf{10^{12} \text{ m}^3}$$

L'ordre de grandeur d de la densité volumique de cette étoile de masse m vaut donc :

$$d = \frac{m/V}{\rho_{\text{eau}}} \text{ avec } \rho_{\text{eau}} \text{ la masse volumique de l'eau } (\rho_{\text{eau}} = 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3})$$

$$\text{A.N. : } d = \frac{10^{30} / 10^{12}}{10^3} = \mathbf{10^{15}}$$

D'après la dernière phrase du texte, cette densité extraordinaire « équivaut au volume d'une cuillère à café ayant pour masse plusieurs centaines de millions de tonnes ».

Si on considère qu'une cuillère à café peut contenir une sphère ayant un rayon d'ordre de grandeur égal à $R_S = 1 \text{ cm}$, la masse m_S d'une telle sphère vaut effectivement :

$$m_S = d \times \rho_{\text{eau}} \times 4/3 \pi \times R_S^3 = 10^{15} \times 10^3 \times 4/3 \pi \times (10^{-2})^3 = 10^{12} \text{ kg} = \mathbf{10^9 \text{ tonnes}}$$

ce qui correspond à un ordre de grandeur de mille millions de tonnes.

La valeur de la densité calculée dans cette activité est donc **confirmée** par la dernière phrase du texte car une valeur de masse de 600 millions de tonnes par exemple correspond bien à un ordre de grandeur de mille millions de tonnes (10^{12} kg).

3. Conclure

Voici un exemple de synthèse argumentée pour justifier la densité extraordinaire des étoiles à neutrons.

« Dès 1934, deux astrophysiciens, Baade et Zwicky, ont émis l'hypothèse que les supernovae représenteraient des transitions entre des étoiles supergéantes et des étoiles à neutrons qui, dans leur état final, seraient formées de neutrons extrêmement comprimés. Cependant, il a fallu attendre 1967 pour que Pacini émette l'idée que la source d'énergie de la nébuleuse du crabe soit une étoile à neutrons magnétisée, en rotation, et pour que Hewish et son étudiante Bell détectent les premiers signaux, ce qui valut d'ailleurs le prix Nobel à Hewish en 1974. En effet, les étoiles à neutrons, très compactes, sont assez difficiles à détecter. Cette densité extrêmement grande est due à l'effondrement d'une étoile supergéante sur elle-même à la fin de sa vie lorsqu'elle ne produit plus assez d'énergie. Cet effondrement s'accompagne alors de réactions entre les protons et les électrons de cette étoile, donnant principalement des neutrons se déplaçant à très grande vitesse. L'effondrement s'arrête lorsque que l'augmentation de pression induite par l'agitation des neutrons est telle que les forces pressantes générées dans l'étoile à neutrons compensent les forces de gravitation mais cela ne se produit que lorsque la taille de l'étoile est très petite par rapport à sa taille initiale, ce qui explique, de manière très simplifiée, la densité très importante de l'étoile. »

Activité documentaire 2. Le microscope à force atomique

Commentaires

Les documents proposés décrivent le principe de fonctionnement d'un microscope à force atomique.

Cette activité permet aux élèves de s'interroger sur l'ordre de grandeur d'un atome et sur la « visualisation » des atomes par un microscope en leur demandant notamment d'effectuer des recherches pour comparer le microscope à force atomique et le microscope optique.

Réponses

1. Comprendre les documents

a. Le système de balayage d'un microscope à force atomique permet le déplacement du support d'un échantillon (ou de la pointe) afin de sonder **toute la surface** d'un échantillon grâce à la pointe qui se soulève plus ou moins suivant la topographie de l'échantillon, « reproduisant [ainsi] les irrégularités de la surface ».

b. Le rôle du laser et du photodétecteur est de **déterminer les déplacements (hauteur et position) de la pointe**, ce qui permet à l'ordinateur, couplé avec ce matériel, de reconstituer une image en trois dimensions de la surface de l'échantillon.

c. La taille de la pointe est le principal élément qui limite la résolution du microscope à force atomique. Elle doit être le plus effilée possible afin d'être idéalement « un cône se terminant par quelques atomes ».

2. Interpréter les documents

a. La couleur vue sur le document 7 n'est **pas la couleur réelle des atomes**. C'est la couleur choisie par les concepteurs du logiciel pilotant l'ordinateur couplé au laser et au photodétecteur.

b. D'après l'échelle, l'image du document 7 a une longueur de 2,5 nm et une largeur de 2,3 nm. Sa surface S est donc égale à : $S = 2,5 \times 2,3 = 5,8 \text{ nm}^2 = 5,8 \times 10^{-18} \text{ m}^2$.

c. On peut compter sur le document 7 environ **140 atomes de tungstène**, chaque atome étant représenté par une bosse. On peut donc en conclure que l'ordre de grandeur N du nombre d'atomes de tungstène par m^2 est égal à :

$$N = \frac{140}{5,8 \times 10^{-18}} = 10^{19} \text{ m}^{-2}$$

d. Si on suppose qu'un atome de tungstène est une sphère de rayon R , on peut considérer qu'un atome occupe la surface $A = \pi R^2$ sur le document 7.

De plus, si on suppose que les atomes occupent toute la surface du document 7, on peut en conclure que : $N \times A = 1 \text{ m}^2$.

Ainsi :

$$N \times \pi R^2 = 1 \Leftrightarrow R^2 = \frac{1}{\pi \times N} \Leftrightarrow R = \sqrt{\frac{1}{\pi \times N}}$$

A.N. : $R = \sqrt{\frac{1}{\pi \times 10^{19}}}$ m, donc l'ordre de grandeur de R est du rayon atomique d'un atome de tungstène vaut donc 10^{-10} m .

Remarque : le rayon atomique d'un atome de tungstène est égal à $1,35 \times 10^{-10} \text{ m}$. L'ordre de grandeur trouvé dans cette question est donc correct.

3. Conclure

a. La **résolution maximale d'un microscope à force atomique** dépend de la taille de sa pointe, idéalement « un cône se terminant par quelques atomes ». Aujourd'hui, la résolution maximale d'un microscope à force atomique est de l'ordre de 10^{-1} nm = 10^{-10} m, ce qui correspond à la dimension d'un atome.

En revanche, en lumière visible, **la résolution maximale d'un microscope optique** est de l'ordre de 10^{-7} m, ce qui est mille fois plus grand que la dimension d'un atome.

b. La dimension d'un atome étant de l'ordre de 10^{-10} m, il est **impossible de voir les atomes** avec un microscope optique. On peut les visualiser avec un microscope à force atomique par le biais d'un ordinateur mais il est impossible de les voir.

c. **On ne peut pas observer des fluides** avec un microscope à force atomique car la pointe du microscope ne se soulève que si la surface de l'échantillon analysé est solide.

Activité expérimentale 3. Caractériser l'isolation thermique d'un matériau

Commentaires

L'expérience peut être réalisée avec une lampe infrarouge.

Les valeurs de température obtenues sont assez peu reproductibles. Cependant les valeurs des différences de températures obtenues suffisent pour comparer l'isolation thermique des différents matériaux étudiés.

Cette activité expérimentale permet de travailler les compétences expérimentales suivantes : « S'approprier » ; « Analyser », « Réaliser » et « Valider ». De plus, elle demande de réaliser une recherche sur les maisons passives, afin de relier le document d'ouverture du chapitre à la thématique sur les enjeux énergétiques de la troisième partie du programme « Agir – Défis du XXI^e siècle ».

Réponses

1. Observer

Les différences de températures relevées par les deux sondes thermométriques sont plus importantes pour une plaque de polystyrène que pour une plaque de liège, et que pour une plaque de bois (en chêne).

2. Interpréter

a. Il est nécessaire d'utiliser des plaques de même épaisseur et de même surface, de les placer à la même distance de la lampe à infrarouge et de relever la différence de températures après une même durée pour comparer l'isolation thermique des différents matériaux. En effet, il faut **faire varier uniquement un paramètre à la fois** (ici le matériau utilisé) pour être en mesure de l'étudier.

b. La lampe infrarouge transfère de l'énergie thermique au milieu extérieur. La température de l'air environnant augmente donc. De l'autre côté de la plaque étudiée, la température de l'air augmente d'autant plus faiblement que la plaque a une capacité d'isolation importante.

La température de l'autre côté de la plaque est plus faible (et la différence de températures est plus grande) lorsque la plaque est constituée de polystyrène que lorsqu'elle est constituée de liège ou de bois. Cela signifie que **le polystyrène procure la meilleure isolation thermique.**

c. D'après les résultats de l'expérience et le tableau, **la conductivité thermique d'un matériau est d'autant plus grande que sa capacité d'isolation est faible.**

Dans cette expérience, on a étudié la capacité des matériaux à isoler un corps chaud. Cette capacité d'isolation est identique pour isoler un corps chaud ou pour isoler un corps froid. Ainsi, si on souhaite conserver des glaçons sous forme solide le plus longtemps possible dans une pièce à température ambiante, il faut les placer dans le récipient le plus isolant, c'est-à-dire **dans le récipient en polystyrène.**

3. Faire une recherche

Plusieurs matériaux isolants sont actuellement utilisés dans le domaine de l'habitat pour construire une maison passive. Par exemple, des murs en **bloc béton** ou en **briques à joints minces**, avec une isolation par l'intérieur en **laine de roche** ou en doublage **polystyrène expansé** (ou graphité), **avec une contre-cloison en brique** et un enduit plâtre traditionnel, permettent une très bonne isolation s'ils sont associés à une toiture isolée avec 25 cm de **laine minérale.**

Autrement, on peut aussi utiliser des « monomurs » de **terre cuite**, en **béton cellulaire** ou en **ossature bois** avec un complément d'isolation par l'intérieur en **fibres naturelles**, une contre-cloison en **brique** et un **enduit plâtre traditionnel**, toujours associés à une toiture isolée avec cette fois-ci 35 cm de **laine minérale.**

Enfin, une très bonne isolation peut également être obtenue avec des murs en **bois massif**, avec isolation par l'extérieur en **laine de bois** et une toiture isolée avec un panneau de **bois massif** et isolé par l'extérieur avec de la **laine de bois.**

Source : <http://www.maison.com/architecture/maison-basse-consommation/introduction-4699/>

Activité documentaire 4. L'effet de serre

Commentaires

Les documents de cette activité documentaire présentent le phénomène de l'effet de serre sur Terre et ils décrivent plus précisément un bilan de puissances simplifié associé à l'effet de serre. L'étude de ces documents permet de réaliser notamment les bilans énergétiques de trois systèmes différents : la Terre, son atmosphère et l'espace.

Enfin, la dernière question demande une recherche documentaire sur l'influence des différents gaz à effet de serre et sur leur réduction nécessaire dans l'atmosphère.

Réponses

1. Exploiter les documents

a. Deux types de transfert d'énergie sont décrits dans le document 10 : le **rayonnement** et la **convection.**

Remarque : il existe un troisième type de transfert d'énergie entre deux systèmes de température différente, la conduction, qui a lieu de proche en proche, sans déplacement de matière.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 18. Transferts thermiques d'énergie

b. Les rayonnements concernés par les échanges d'énergie avec l'atmosphère sont les rayonnements **infrarouges**.

c. D'après la figure 9, la puissance surfacique du rayonnement reçu par la Terre vaut :

$$\mathcal{P}_1 = 160 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$$

Et la puissance surfacique que recevrait la Terre en l'absence d'atmosphère est égale à :

$$\mathcal{P}_2 = 160 + 80 + 100 = 340 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$$

Le rapport entre ces deux puissances est égal à :

$$\frac{\mathcal{P}_1}{\mathcal{P}_2} = \frac{160}{340} = 47,1 \%$$

Cela correspond aux informations données dans le document 10 : « environ 50 % du rayonnement solaire traverse l'atmosphère terrestre et parvient jusqu'à la surface de la Terre ».

2. Interpréter les documents

a. Schéma représentant les transferts d'énergie entre la Terre et les deux autres systèmes (l'atmosphère et l'espace), *les valeurs numériques sont des puissances surfaciques en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$* :

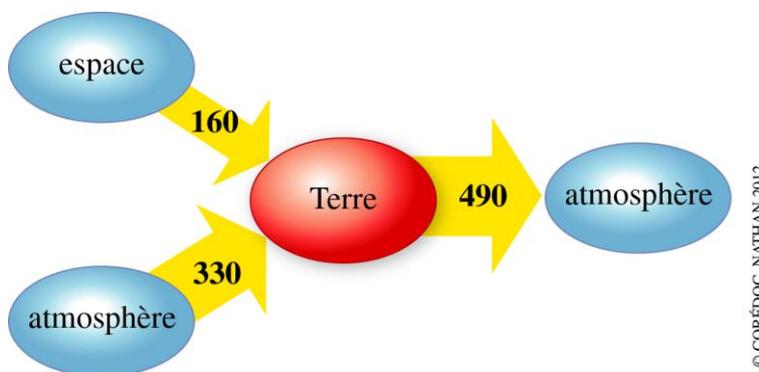
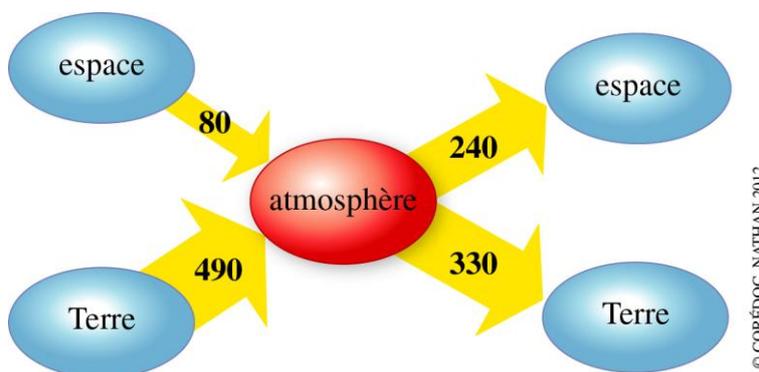
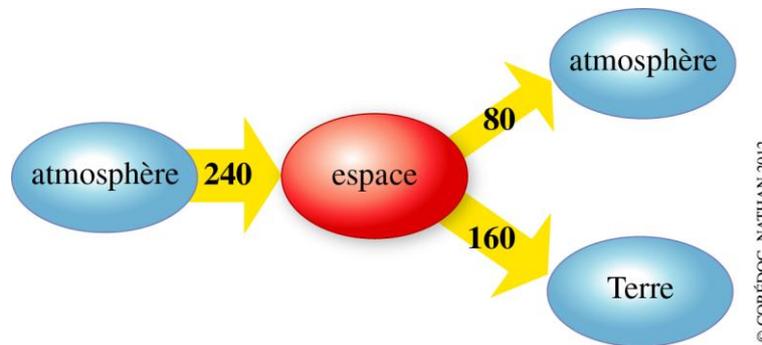


Schéma représentant les transferts d'énergie entre l'atmosphère et les deux autres systèmes (la Terre et l'espace), *les valeurs numériques sont des puissances surfaciques en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$* :



Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 18. Transferts thermiques d'énergie

Schéma représentant les transferts d'énergie entre l'espace et les deux autres systèmes (la Terre et l'atmosphère), les valeurs numériques sont des puissances surfaciques en $W.m^{-2}$:



b. Pour chaque système, la somme des transferts d'énergie (ou de puissances surfaciques) émis est bien **égale** à la somme des transferts d'énergie (ou de puissances surfaciques) reçus : il y a **équilibre thermique**.

3. Conclusion

a. L'effet de serre **n'est pas un phénomène récent**. Il n'est **pas du tout néfaste** à la vie sur Terre : il est même indispensable à la survie de la plupart des espèces vivant sur Terre car, sans effet de serre, la température moyenne à la surface de la Terre serait de $-18^{\circ}C$.

b. Les gaz à effet de serre cités dans le document 10 sont :

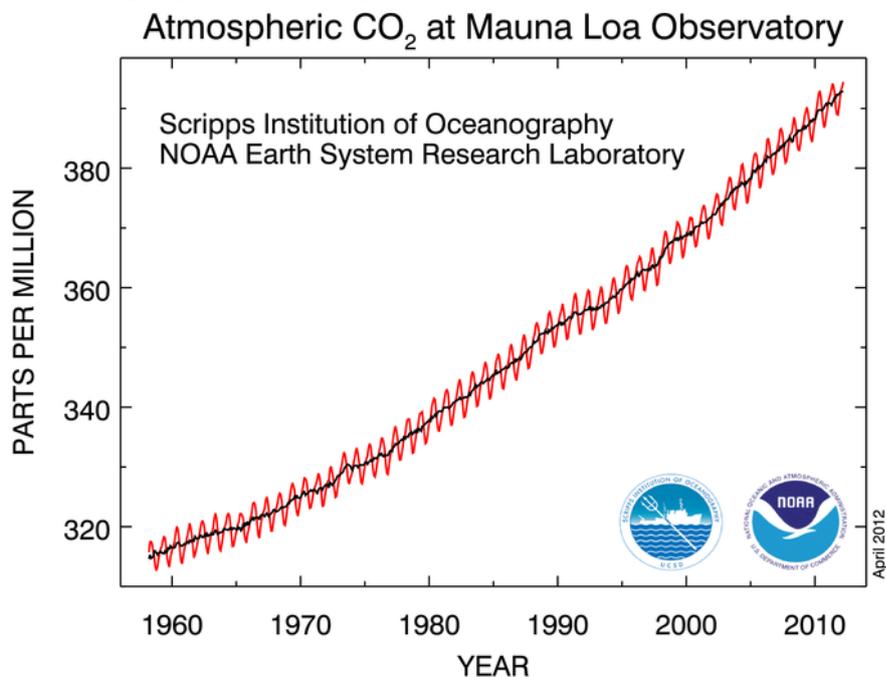
- **la vapeur d'eau H_2O** , qui est le principal gaz à effet de serre naturel. Elle joue un rôle complexe dans le réchauffement climatique car son cycle et ses réponses sont très rapides (quelques semaines au plus) en fonction des conditions météorologiques, contrairement aux autres gaz à effet de serre dont la durée de vie et l'inertie sont beaucoup plus importants. Les activités humaines influencent peu sa concentration dans l'atmosphère. C'est la température de l'atmosphère qui détermine sa présence. Ainsi, en réchauffant l'atmosphère, nos activités pourraient indirectement augmenter la quantité de vapeur d'eau dans l'air, augmentant d'autant plus l'effet de serre : on appelle ceci une **rétroaction positive**.

- **le dioxyde de carbone CO_2** , qui représente environ 55 % du pouvoir radiatif global des gaz à effet de serre. Ce gaz a contribué à l'augmentation de l'effet de serre à hauteur de 90 % depuis 5 ans (données de 2008). Il provient principalement des émissions des combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) Il est également issu de certains procédés industriels, de la déforestation et de l'agriculture intensive. Les secteurs les plus émetteurs sont l'industrie, la production énergétique et les transports. La consommation des ménages (cuisson, chauffage, électricité) contribue aussi significativement aux émissions de dioxyde de carbone. Le dioxyde de carbone est également émis par l'activité naturelle de notre planète : éruptions volcaniques, respiration des plantes et des animaux.

Remarque : les concentrations en dioxyde de carbone ont été comprises entre 190 ppm (ères glaciaires) et 300 ppm (périodes chaudes). Les mesures effectuées à l'observatoire de Mauna Loa (Hawaï) et l'étude des bulles d'air emprisonnées dans les calottes polaires, montrent que la concentration est passée d'environ 280 ppm dans les années 1850 (début de la civilisation industrielle) à plus de 387 ppm en 2009 : le taux de dioxyde de carbone atmosphérique est plus élevé aujourd'hui qu'il ne l'a jamais été au cours des deux derniers millions d'années...

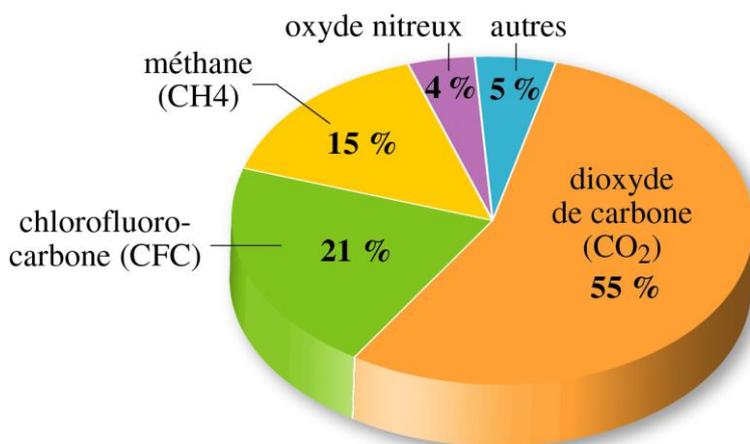
Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 18. Transferts thermiques d'énergie

À titre de comparaison, il avait fallu plus de 5 000 ans pour que la concentration en dioxyde de carbone augmente de seulement 80 ppm à la fin du dernier âge glaciaire (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat GIEC, 2007).
 Notons qu'il existe une oscillation annuelle normale des concentrations de dioxyde de carbone qui s'explique par le cycle végétatif.



Concentrations moyennes mensuelles du CO₂
 relevées à l'observatoire de Mauna Loa - Hawaï
 © NOAA ; 04/2012

- **le méthane CH₄, l'ozone O₃, les oxydes d'azote** (appelés aussi oxydes nitreux). Avec le dioxyde de carbone et les CFC, ce sont les autres principaux gaz qui contribuent à l'effet de serre.



Part des différents gaz à effet de serre : dans l'effet de serre additionnel ou d'origine anthropique, le dioxyde de carbone contribue majoritairement à l'effet de serre.

Source : d'après GIEC 2001, http://www.notre-planete.info/terre/climatologie_meteo/changement_climatique_3.php

Ainsi, la limitation des gaz à effet de serre est aujourd'hui une des priorités mondiales car l'augmentation trop rapide de ces gaz dans l'atmosphère entraîne une **hausse brutale de la température moyenne** sur Terre qui **bouleverse les écosystèmes existants** et qui va **entraîner la migration d'une grande partie de la population humaine habitant au niveau de la mer**.

Exercices d'application

5 minutes chrono !

1. Mots manquants

Dans le manuel élève ont été corrigés les réponses aux mots manquants a. et également j. car la phrase j. a été modifiée ainsi : « L'énergie totale d'un système fermé est la somme de son... et de son... »

- a. constante d'Avogadro (*et non « mole »*)
- b. puissance ; plus
- c. grand
- d. interne ; microscopique
- e. température
- f. température
- g. différence ; systèmes ; équilibre
- h. conduction ; convection ; rayonnement
- i. Φ ; transfert thermique
- j. énergie interne : énergie mécanique (*à la place de : « somme ; transferts thermiques, système »*)

2. QCM

- a. 10^{25}
 - b. augmente
 - c. $C \times \Delta T$
 - d. W
 - e. $\frac{e}{\lambda \times S}$
-

Compétences exigibles

- 3. a. Microscope à effet tunnel.
 - b. Microscope à force atomique.
-

4. Les systèmes fermés sont :

- l'air dans un ballon de football de 6 L ;
 - une cuillère à café en argent de 20 g dans une tasse pleine de café chaud.
-

5. L'ordre de grandeur du nombre d'entités de 200 g de paraffine est :

$$N = \frac{m \times N_A}{M} = \frac{200 \times 6,02 \times 10^{23}}{320} = 3,76 \times 10^{23}$$

L'ordre de grandeur est 10^{23} entités.

L'ordre de grandeur du nombre d'entités de 2 L d'eau liquide est :

$$N = \frac{m \times N_A}{M} = \frac{2 \times 10^3 \times 6,02 \times 10^{23}}{18} = 6,7 \times 10^{25}$$

L'ordre de grandeur est 10^{26} entités. *Dans les corrigés d'exercices du spécimen, il était écrit 10^{25} entités ; cette erreur a été corrigée dans le manuel élève.*

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 18. Transferts thermiques d'énergie

L'ordre de grandeur du nombre d'entités d'une cuillère en argent de 20 g est :

$$N = \frac{m \times N_A}{M} = \frac{20 \times 6,02 \times 10^{23}}{108} = 1,1 \times 10^{23}$$

L'ordre de grandeur est 10^{23} entités.

- 6. a.** Les deux systèmes à étudier sont le radiateur et l'air de la chambre.
b. C'est une convection qui a lieu entre ces deux systèmes.
c. Le transfert thermique s'établit du radiateur vers l'air de la chambre étant donné que la température de la chambre est inférieure à celle du radiateur.
-

- 7. a.** Le type de transfert thermique à l'intérieur du morceau de cuivre est une conduction.
b. La variation d'énergie interne du morceau de cuivre est égale à :

$$\Delta^o u = C_{Cu} \times \Delta T = 173,7 \times (90 - 20) = 1,2 \times 10^4 \text{ J}$$

- 8. a.** Le flux thermique à travers un simple vitrage est égal à :

$$\Phi = \frac{\lambda \times S \times \Delta T}{e} = \frac{1,2 \times 2,0 \times (20 - 0)}{5,0 \cdot 10^{-3}} = 9,6 \times 10^3 \text{ W}$$

- b.** Le flux thermique à travers un mur de béton est égal à :

$$\Phi = \frac{\lambda \times S \times \Delta T}{e} = \frac{1,4 \times 20 \times (20 - 0)}{20 \times 10^{-2}} = 2,8 \times 10^3 \text{ W}$$

- 9. a.** La résistance thermique d'un mur de brique est égale à :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda \times S} = \frac{10 \times 10^{-2}}{0,67 \times 15} = 1,0 \times 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

- b.** La résistance thermique d'un mur composé de brique, de parpaing et de plâtre est égale à :

$$R_{th} = R_{th}(\text{brique}) + R_{th}(\text{parpaing}) + R_{th}(\text{plâtre})$$
$$R_{th} = \frac{10 \times 10^{-2}}{0,67 \times 15} + \frac{30 \times 10^{-2}}{1,15 \times 15} + \frac{2,0 \times 10^{-2}}{0,8 \times 15} = 2,9 \times 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Compétences générales

- 10. a.** La température du gaz dans le ballon à l'équilibre thermique vaut 20°C .

- b.** Le volume du ballon est égal à :

$$V = \frac{4}{3} \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^3 = 4,2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

- c.** La quantité de matière d'hélium dans le ballon vaut :

$$n = \frac{V}{V_m} = \frac{4,2}{24} = 1,8 \times 10^{-1} \text{ mol}$$

Le nombre d'atomes d'hélium dans le ballon est alors égal à :

$$N = n \times N_A = 1,1 \times 10^{23}$$

- 11.** Rosa a raison, les glaçons vont se réchauffer moins vite si on les met dans une écharpe en laine. En effet, la résistance thermique élevée de l'écharpe en laine permet de diminuer le flux thermique entre l'air et les glaçons et donc d'augmenter la durée de fonte de ces glaçons.
-

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 18. Transferts thermiques d'énergie

12. a. L'énergie nécessaire pour chauffer, par transfert thermique, 200 litres d'eau de 15°C à 17° C est égale à :

$$\mathcal{E} = \Delta\mathcal{U} = C_{\text{eau}} \times \Delta T = 200 \times 10^{-3} \times 10^3 \times 4180 \times (37 - 15) = 1,8 \times 10^7 \text{ J}$$

b. L'énergie délivrée par une ampoule est égale à :

$$\mathcal{E} = \mathcal{P} \times \Delta t$$

Ainsi une ampoule peut briller avec une telle énergie pendant une durée égale à :

$$\Delta t = \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{P}} = \frac{1,8 \times 10^7}{60} = 3,0 \times 10^5 \text{ s} = 3,5 \text{ jours !}$$

c. Pour économiser l'énergie, il est donc important d'éteindre la lumière dès que l'on sort d'une pièce, mais il est encore plus important de prendre moins de bains ou de moins chauffer l'eau !

13. a. Le flux thermique vaut :

$$\Phi = \frac{\lambda \times S \times \Delta T}{e}$$

Ainsi, la conductivité thermique du matériau constituant le mur est égale à :

$$\lambda = \frac{\Phi \times e}{S \times \Delta T} = \frac{210 \times 0,20}{20 \times (22 - 8,0)} = 0,15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

b. Le matériau composant ce mur est donc du bois de sapin.

14. a. Un système fermé est une portion d'espace limitée par une surface qui n'échange pas de matière avec l'extérieur. Ce système est condensé si la matière étudiée est liquide ou solide.

b. La variation $\Delta\mathcal{E}$ de l'énergie totale d'un système est égale à la somme des travaux échangés avec l'extérieur \mathcal{W} autres que ceux des forces conservatives et du transfert thermique Q échangé avec le milieu extérieur :

$$\Delta\mathcal{E} = \Delta\mathcal{U} + \Delta\mathcal{E}_c + \Delta\mathcal{E}_p = \mathcal{W} + Q$$

avec $\Delta\mathcal{E}, \Delta\mathcal{U}, \Delta\mathcal{E}_c, \Delta\mathcal{E}_p, \mathcal{W}$ et Q en joules (J).

c. La variation d'énergie interne de ce système est égale à :

$$\Delta\mathcal{U} = C \times \Delta T$$

De plus, si on considère que ce système est immobile :

$$\Delta\mathcal{E}_c = \Delta\mathcal{E}_p \text{ donc } \Delta\mathcal{U} = \mathcal{W} + Q$$

d. On trouve que :

$$\Delta\mathcal{U} = \mathcal{W} + Q = C \times \Delta T$$

Ainsi,

$$\Delta T = \frac{\mathcal{W} + Q}{C}$$

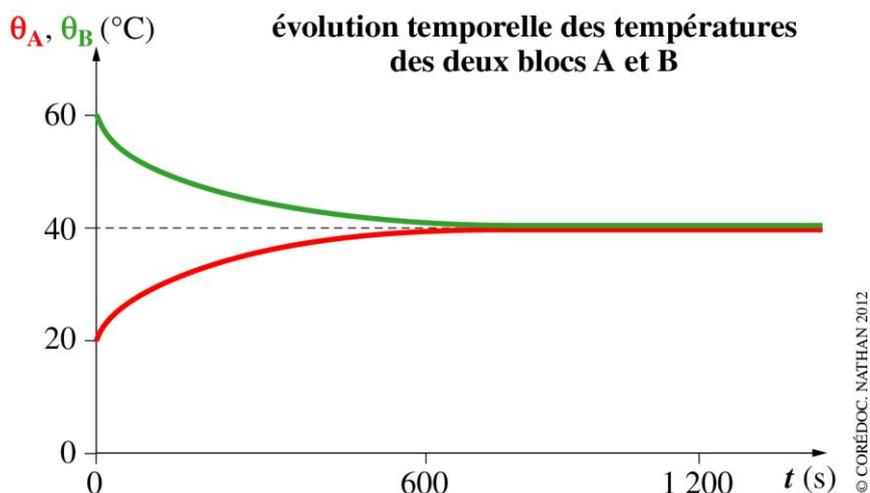
Si le système n'échange plus d'énergie, ni par transfert thermique, ni par transfert mécanique avec l'extérieur, $\mathcal{W} = Q = 0$, ce qui signifie que $\Delta T = 0$.

Le système est à l'équilibre thermique.

Exercices de méthode

15. Exercice résolu.

16. a. L'évolution temporelle des températures des deux blocs A et B peut être représentée de la façon suivante :



b. D'après le graphique précédent, la valeur de la température à l'équilibre est environ égale à 40°C. Étant donné l'imprécision du graphique, on peut donc considérer que :

$$\theta_{A,f} = \theta_{B,f} = 4 \times 10^1 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (avec un seul chiffre significatif)}$$

c. Dans ce contact, le transfert thermique se produit du corps B vers le corps A.

d. Le type de transfert thermique impliqué dans l'établissement de l'équilibre thermique est la conduction.

e. Les blocs A et B sont immobiles. Ainsi, pour chaque bloc, $\Delta\mathcal{E}_c = \Delta\mathcal{E}_p = 0$; donc :

$$\Delta\mathcal{E} = \Delta\mathcal{U} = \mathcal{W} + Q = C \times \Delta T$$

On trouve donc que :

$$\Delta\mathcal{E}_A = \Delta\mathcal{U}_A = C_A \times (\theta_{A,i} - \theta_{A,f}) = 200 \times (4 \times 10^1 - 20,2) = 4 \times 10^3 \text{ J}$$

$$\Delta\mathcal{E}_B = \Delta\mathcal{U}_B = C_B \times (\theta_{B,i} - \theta_{B,f}) = 200 \times (4 \times 10^1 - 60,5) = -4 \times 10^3 \text{ J}$$

$\Delta\mathcal{E}_A > 0$ car le bloc A était initialement plus froid que le bloc B et il a reçu de l'énergie du bloc B.

$\Delta\mathcal{E}_B < 0$ car le bloc B était initialement plus chaud que le bloc A et il a donné de l'énergie au bloc A.

f. Le bilan d'énergie pour le système {A + B} vaut :

$$\Delta\mathcal{E} = \Delta\mathcal{E}_A + \Delta\mathcal{E}_B = 4 \times 10^3 - 4 \times 10^3 = 0$$

Le bilan d'énergie pour ce système est nul car il n'y a pas d'échanges thermiques entre ce système et l'extérieur étant donné qu'il se trouve dans une enceinte calorifugée, sans contact avec un autre système.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 18. Transferts thermiques d'énergie

17. a. Si on ne tient pas compte des frottements, l'énergie totale du système {bille} est conservée : $\mathcal{E}_i = \mathcal{E}_f = \text{cte}$ et son énergie interne \mathcal{U} est constante au cours du temps.

Comme $\mathcal{E}_i = \mathcal{E}_{c_i} + \mathcal{E}_{pp_i} + \mathcal{U}_i = \frac{1}{2}mv^2 + 0 + \mathcal{U}$ (car la bille est à une altitude nulle à l'instant initial) et $\mathcal{E}_f = \mathcal{E}_{c_f} + \mathcal{E}_{pp_f} + \mathcal{U}_f = 0 + mgh_0 + \mathcal{U}$ (car la vitesse de la bille est nulle lorsque la bille a atteint son altitude maximale), on trouve que :

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = mgh_0$$

Ainsi :
$$h_0 = \frac{v_0^2}{2g}$$

Remarque : si on ne tient pas compte des frottements, il est aussi possible de dire que l'énergie mécanique du système $\mathcal{E}_m = \mathcal{E}_c + \mathcal{E}_{pp}$ est conservée.

b. Si on tient compte des frottements, l'énergie totale du système {bille} n'est pas conservée : $\mathcal{E}_i > \mathcal{E}_f$ et son énergie interne \mathcal{U} varie au cours du temps car une partie des forces de frottements se dissipe dans l'air ambiant et l'autre moitié dans la bille.

La variation $\Delta\mathcal{E}$ de l'énergie totale du système est alors égale au travail des forces de frottement se dissipant dans l'air ambiant :

$$\mathcal{W}_{\text{air}} = \Delta\mathcal{E} = \Delta\mathcal{U} + \Delta\mathcal{E}_c + \Delta\mathcal{E}_{pp}$$

De plus, la variation de l'énergie interne est due au travail des forces de frottement se dissipant dans la bille :

$$\mathcal{W}_{\text{bille}} = \Delta\mathcal{U} = C \times \Delta T$$

Enfin, sachant que le travail des forces de frottement se dissipe à moitié dans l'air ambiant et à moitié dans la bille, on trouve que $|\mathcal{W}_{\text{bille}}| = |\mathcal{W}_{\text{air}}|$.

Remarque : $\mathcal{W}_{\text{air}} < 0$ car l'énergie est donnée à l'extérieur ;

$\mathcal{W}_{\text{bille}} > 0$ car l'énergie est donnée au système.

Ainsi : $\Delta\mathcal{U} + \Delta\mathcal{E}_c + \Delta\mathcal{E}_{pp} = \mathcal{W}_{\text{air}} = -\mathcal{W}_{\text{bille}} = -\Delta\mathcal{U}$.

D'où :

$$2\Delta\mathcal{U} = -\Delta\mathcal{E}_c - \Delta\mathcal{E}_{pp}$$

$$\begin{aligned} 2C \times \Delta T &= -(\mathcal{E}_{c_f} - \mathcal{E}_{c_i}) - (\mathcal{E}_{pp_f} - \mathcal{E}_{pp_i}) \\ &= (\mathcal{E}_{c_i} - \mathcal{E}_{c_f}) + (\mathcal{E}_{pp_i} - \mathcal{E}_{pp_f}) \\ &= \mathcal{E}_{c_i} - \mathcal{E}_{pp_f} \quad \text{car } \mathcal{E}_{c_f} = \mathcal{E}_{pp_i} = 0 \end{aligned}$$

$$\Delta T = \frac{\mathcal{E}_{c_i} - \mathcal{E}_{pp_f}}{2}$$

D'après la question **a.**, on sait que $\mathcal{E}_{c_i} = \frac{1}{2}mv_0^2 = mgh_0$;

De plus, $\mathcal{E}_{pp_f} = mgh$.

Finalement :

$$\Delta T = \frac{mgh_0 - mgh}{2C} = \frac{mg(h_0 - h)}{2C}$$

c. En effectuant les applications numériques, on trouve que :

$$h_0 = \frac{(10)^2}{2 \times 9,81} = 5,1 \text{ m}$$

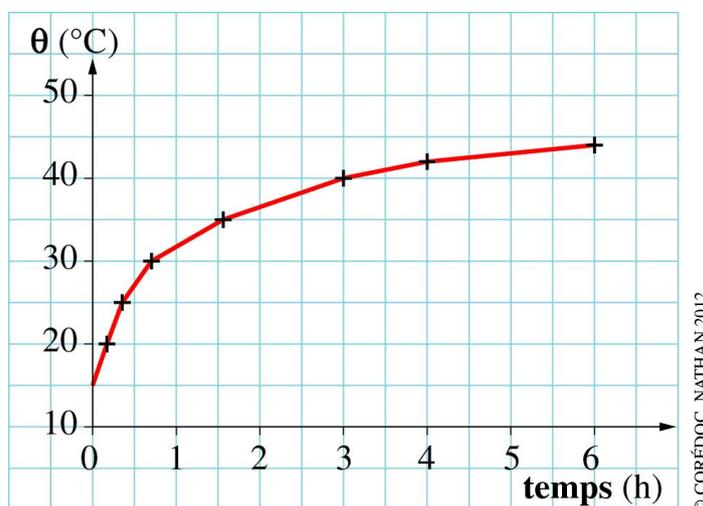
$$\Delta T = \frac{0,100 \times 9,81 \times \left(\frac{(10)^2}{2 \times 9,81} - 5,0 \right)}{2 \times 40} = 1,2 \times 10^{-3} \text{ K}$$

L'échauffement de la bille est donc insignifiant.

Exercices d'entraînement

18. 1. a. Transfert thermique par rayonnement (électromagnétique).

b.



L'évolution est de type exponentiel.

2. a. La température de l'eau lors de la mise en fonctionnement est 15°C. Celle au bout de 5h30 est de 43°C, elle est déterminée par lecture graphique.

b. On utilise :

$$\Delta^{\circ}u = m \times C \times \Delta T$$

A.N. :
$$\Delta^{\circ}u = 8,36 \times 10^4 \times (43 - 15) = 2,3 \times 10^6 \text{ J}$$

19. a. On utilise $\Delta^{\circ}u = m \times C \times \Delta T$.

A.N. :
$$\Delta^{\circ}u = 8,9 \times 10^4 \times (23 - 18) = 4,5 \times 10^5 \text{ J}$$

b. $\mathcal{P} = \frac{\Delta^{\circ}u}{\Delta t}$, ce qui conduit à :

$$\Delta t = \frac{\Delta^{\circ}u}{\mathcal{P}}$$

A.N. :
$$\Delta t = \frac{4,5 \times 10^5}{1800} = 2,5 \times 10^2 \text{ s soit } 4,1 \text{ min}$$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 18. Transferts thermiques d'énergie

20. a. $M = \rho V = \rho eS = 917 \times 1,0 \times 10^{-2} \times 580 \times 10^6 = 53,186 \times 10^8 \text{ kg} = 53,186 \times 10^5 \text{ t} = 5,3 \times 10^9 \text{ kg}$.

b. La quantité d'énergie nécessaire pour faire fondre toute la glace est :

$$\mathcal{E} = 5,3 \times 10^9 \times 335 \times 10^3 = 1,8 \times 10^{15} \text{ J} (= 1800 \text{ 000 GJ})$$

c. Le lac a une surface de 580 km^2 , ce qui correspond à une puissance absorbée ou reçue due au rayonnement solaire de :

$$\mathcal{P}_{\text{reçue}} = 0,1 \times \text{puissance surfacique} \times S = 0,1 \times 340 \times 580 \times 10^6 = 2,0 \times 10^{10} \text{ W}$$

Par ailleurs, $\mathcal{P} = \frac{\mathcal{E}}{\Delta t}$ soit $\Delta t = \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{P}} = \frac{1,8 \times 10^{15}}{2,0 \times 10^{10}} = 90 \text{ 000 s} = 9 \times 10^4 \text{ s} = 25 \text{ h}$.

Attention, il s'agit de 25 heures de rayonnement maximum. En hiver, cela correspond à 3/4 heures par jour. La durée réelle de débâcle est d'environ 1 semaine...

d. 1 kWh est égal à une énergie de 3,6 MJ ($3,6 \times 10^6 \text{ J}$). L'énergie nécessaire pour faire fondre la glace est de $1,8 \times 10^{15} \text{ J}$. Cela correspond à $\frac{1,8 \times 10^{15}}{3,6 \times 10^6} = 5 \times 10^8 \text{ kWh}$.

Le prix du kWh est de 10 centimes d'euros soit un coût total de 50 000 000 euros.

21. a. L'énergie électrique est transformée en énergie lumineuse. Le principe d'émission des LED reposent sur leur caractère semi-conducteur. Il existe un phénomène quantique de recombinaison trou-électron qui conduit à l'émission des photons, sources de lumière.

b. L'énergie électrique est transformée en rayonnement électromagnétique.

c. D'une part, elle chauffe beaucoup plus que les LED, d'autre part, le filament s'use littéralement lors de l'émission du rayonnement. La durée de vie est donc moindre et les déchets plus importants.

d. Les LED ont plusieurs avantages :

- un allumage instantané ;
- une insensibilité aux allumages répétés et aux basses températures ;
- un faible dégagement de chaleur ;
- une durée de vie quasi illimitée qui varie de 50 000 à 100 000 heures (soit 5 fois plus qu'une lampe basse conso fluo-compacte) ;
- une résistance aux chocs supérieure aux fluo-compactes.

Idéales pour un éclairage ponctuel (lampe de chevet, veilleuse, guirlande...), les LED sont des ampoules écologiques produisant ni UV ni mercure. L'un des inconvénients de la LED est son prix qui reste encore élevé, quoiqu'il soit extrêmement rentable à l'usage. Aujourd'hui, les LED restent encore essentiellement réservés à un usage décoratif ou un éclairage d'appoint.

Il existe actuellement trois types d'ampoules à économies d'énergie disponibles sur le marché :

- les LED ;
- les tubes fluorescents ;
- les ampoules fluo-compactes ;

Dans le cadre de la loi Grenelle, le 23 octobre 2008, le ministère de l'écologie a signé avec les professionnels, fabricants et distributeurs, une convention qui les engage sur un calendrier de retrait progressif du marché des ampoules à incandescence entre le 30 juin 2009 et le 31 décembre 2012.

<http://www.partenaire-europeen.fr/Actualites-Conseils/Energie/Developpement-durable/LED-lampe-a-economie-d-energie-20090205>

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 18. Transferts thermiques d'énergie

22. a. $\mathcal{E}_c = \frac{1}{2}mv^2$ d'où $\mathcal{E}_c = 0,5 \times 160 \times \frac{36000}{3600} = 800 \text{ J}$.

b. $\mathcal{E}_c = \Delta^o u = C \times \Delta T$ soit $\Delta T = \frac{\mathcal{E}_c}{\Delta^o u}$.

A.N. : $\Delta T = \frac{800}{39} = 21^\circ\text{C} = 21 \text{ K}$

- c.** - Faux. L'énergie cinétique de la moto ne se conserve pas. Elle diminue !
 - Vrai. L'énergie cinétique de la moto diminue.
 - Faux. Les forces frottements travaillent et il y a transfert thermique.

23. a.

On sait que $\Phi = \lambda \frac{S}{e} (T_A - T_B)$ et par ailleurs $U = RI$.

Par analogie : $(T_A - T_B)$ est analogue à U , I à Φ .

b. $R_{\text{élec}} = \frac{L}{\gamma S}$ par lecture du texte.

c. La résistance thermique peut être considérée comme le coefficient de proportionnalité entre le flux thermique et la différence de température générant ce flux et donc $R_{\text{élec}}$ est analogue à :

$$R_{\text{th}} = \frac{e}{\lambda S} \text{ où } e = L, \text{ la longueur de la tige dans cet exercice.}$$

d. $R = 7,6 \times 10^{-5} \Omega$ et $R_{\text{th}} = 1,0 \times 10^1 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$.

e. Le flux thermique se calcule alors par :

$$\Phi = \frac{\Delta T}{R_{\text{th}}} = \frac{80}{1,0 \times 10^1} \text{ W}$$

En calculant avec les valeurs numériques non arrondies, on obtient $\Phi = 7,6 \text{ W}$.

24. 1. Le sucre possède une énergie potentielle initiale $\mathcal{E}_p = mgh$ (on a pris l'origine des \mathcal{E}_p au niveau du café) et pas d'énergie cinétique initiale (la chute est sans vitesse initiale). Il y a alors conversion d'énergie potentielle en énergie cinétique.

Au niveau du café, $\mathcal{E}_c = mgh$.

2. a. $\Delta^o u = C_{\text{sugar}} \times \Delta T = mgh$.

b. Le sucre ne refroidit pas le café, il arrive donc au moment de l'impact avec une température de 50°C , celle du café. Ce qui conduit à :

$$h = \frac{C_{\text{sugar}} \times \Delta T}{mg}$$

A.N. : $h = \frac{2,5 \times (50 - 20)}{0,0050 \times 9,81} = 1,5 \times 10^3 \text{ m} = 1,5 \text{ km} !$

c. Ce calcul montre l'inanité d'une telle entreprise ! Il apparaît difficile de viser correctement la tasse de cette hauteur. Les éclaboussures produites lors de l'impact risquent de vider la tasse.

On a par ailleurs négliger les frottements sur le sucre (critique de la première phase) et le choc avec le café génère un transfert d'énergie cinétique au fluide café. Celui-ci est éjecté de la tasse...

25. Dans le manuel élève, $\theta_{ext} = -5,0^\circ\text{C}$: un chiffre significatif a été ajouté.

a. On utilise la formule de la résistance thermique :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda S} \quad \text{et} \quad \Phi = \frac{\Delta T}{R_{th}}$$

Les résistances thermiques des double et triple vitrages se déterminent en ajoutant les résistances thermiques des éléments les constituant (verre + air + verre).

Simple vitrage	$R_{th}(\text{verre}) = 8,3 \times 10^{-4} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$	$\Phi = \frac{\Delta T}{R_{th}} = 3,0 \times 10^4 \text{ W}$
Double vitrages	$R_{th} = 2R_{th}(\text{verre}) + R_{th}(\text{air}) = 0,12 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$	$\Phi = \frac{\Delta T}{R_{th}} = 2,2 \times 10^2 \text{ W}$
Triple vitrages	$R_{th} = 3R_{th}(\text{verre}) + 2R_{th}(\text{air}) = 0,23 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$	$\Phi = \frac{\Delta T}{R_{th}} = 1,1 \times 10^2 \text{ W}$

Remarque : les calculs sont effectués sans arrondir les résultats intermédiaires.

b. La configuration la plus isolante est bien celle du triple vitrage. Le flux thermique est réduit d'un facteur 300 en comparaison d'un simple vitrage.

26. Dans le manuel élève, $\theta_i = 15,0^\circ\text{C}$ et $\theta_f = 30,0^\circ\text{C}$: un chiffre significatif a été ajouté à chacune de ces valeurs.

a. Les différents systèmes en contact sont : la masse d'eau froide, la masse d'eau chaude et le calorimètre.

b. Avant le mélange, le calorimètre et la masse d'eau froide sont à la même température $\theta_1 = 15^\circ\text{C}$. Après le mélange, la température de l'ensemble évolue vers une valeur unique $\theta_f = 30^\circ\text{C}$.

c. La variation d'énergie interne de l'ensemble est nulle puisqu'il n'y a aucun échange avec l'extérieur.

d. $\Delta Q_{\text{ensemble}} = 0 = \Delta Q_{\text{eau froide}} + \Delta Q_{\text{eau chaude}} + \Delta Q_{\text{calorimètre}}$.

$$\Delta Q_{\text{ensemble}} = m(\text{eau froide}) \times 4180 \times (\theta_f - \theta_1) + m(\text{eau chaude}) \times 4180 \times (\theta_f - \theta_2) + C_{\text{calorimètre}} \times (\theta_f - \theta_1)$$

A.N. :

$$\Delta Q_{\text{ensemble}} = 0,200 \times 4180 \times (30 - 15) + 0,200 \times 4180 \times (30 - 45,9) + C_{\text{calorimètre}} \times (30 - 15)$$

$$\Delta Q_{\text{ensemble}} = 0,200 \times 4180 \times (30 - 15 + 30 - 45,9) + C_{\text{calorimètre}} \times (30 - 15)$$

$$\Delta Q_{\text{ensemble}} = 0,200 \times 4180 \times (-0,9) + C_{\text{calorimètre}} \times 15$$

$$\text{D'où : } C_{\text{calorimètre}} = \frac{0,200 \times 4180 \times 0,9}{15} = 50 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}.$$

On en déduit la masse en eau du calorimètre :

$$\mu = \frac{50}{4180} = 12 \times 10^{-3} \text{ kg} = 12 \text{ g}$$

Cette valeur permet de remplacer dans les calculs les caractéristiques du calorimètre par une masse virtuelle μ d'eau. On ne réfléchit donc plus qu'en termes d'échanges entre corps introduits et eau.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 18. Transferts thermiques d'énergie

27. a. Le récipient isolé thermiquement nous permet de considérer qu'il n'y a aucun transfert thermique avec l'extérieur.

- Protocole 1 : l'énergie électrique apportée pendant Δt est entièrement transférée à l'eau soit $\mathcal{P}_{\text{elec}} \times \Delta t = C_{\text{eau}} \times \Delta T$. On peut donc calculer C_{eau} .

- Protocole 2 : l'énergie interne du morceau de cuivre est intégralement transférée à l'eau : $\Delta^{\text{Q}}l(\text{cuivre}) = \Delta^{\text{Q}}l(\text{eau})$ soit $C_{\text{cuivre}}(T_f - T_i(\text{cuivre})) = C_{\text{eau}}(T_f - T_i(\text{eau}))$.

Tous les paramètres sont connus ou mesurables sauf C_{eau} , calculable par l'équation.

b. Le protocole 1 peut être considéré comme le plus fiable car il dure moins longtemps. Le critère d'adiabaticité du récipient (pas de transfert thermique avec l'extérieur) ne tient plus sur une période longue. Les pertes augmentent forcément avec le temps.

28. Dans le manuel élève, une précision a été ajoutée : le mur en béton a une épaisseur $e = 10 \text{ cm}$.

Les résistances thermiques s'ajoutent :

$$\begin{aligned} R_{\text{th}} &= \frac{e_{\text{mur}}}{\lambda_{\text{mur}} \times S} + \frac{e_{\text{poly}}}{\lambda_{\text{poly}} \times S} + \frac{e_{\text{platre}}}{\lambda_{\text{platre}} \times S} + \frac{e_{\text{enduit}}}{\lambda_{\text{enduit}} \times S} \\ &= \frac{0,10}{1,4 \times 30} + \frac{0,05}{0,036 \times 30} + \frac{0,01}{0,70 \times 30} + \frac{0,015}{1,15 \times 30} \\ &= 5,0 \times 10^{-2} \text{ K} \times \text{W}^{-1} \end{aligned}$$

Le flux thermique est alors égal à :

$$\Phi = \frac{\Delta T}{R_{\text{th}}} = \frac{25}{0,050} = 5,0 \times 10^2 \text{ W}$$

Ce flux non nul contribue à diminuer la température de la première chambre (20°C) et d'augmenter celle de la seconde (-5°C). Il faut le réduire au minimum en augmentant la résistance thermique au maximum. On peut superposer de nouvelles couches de matériaux ou ajouter un unique matériau possédant une grande conductivité thermique.

Exercices de synthèse

29. Il y a quatre éléments engagés dans les échanges thermiques : aluminium, fer, eau et calorimètre. En calculant la masse en eau du calorimètre (exercice 26), on réduit ce nombre à trois : aluminium, fer et eau. Le transfert thermique associé est la conduction thermique.

La température finale doit répondre à l'équation suivante :

$$0 = C_{\text{alu}}(\theta_f - \theta_1) + C_{\text{fer}}(\theta_f - \theta_2) + C_{\text{eau}}(\theta_f - \theta_3)$$

soit :

$$\theta_f = \frac{C_{\text{alu}}\theta_1 + C_{\text{fer}}\theta_2 + C_{\text{eau}}\theta_3}{C_{\text{alu}} + C_{\text{fer}} + C_{\text{eau}}} = 33^\circ\text{C}$$

On peut donc en conclure que les transferts thermiques s'effectuent de l'aluminium vers le fer et vers l'eau !!

30. a. Une puissance est une énergie divisée par une durée : $\mathcal{P} = \frac{\mathcal{E}}{\Delta t}$.

Ici :

$$\mathcal{P} = \frac{8,610 \times 10^6}{3600 \times 24} = 1,0 \times 10^2 \text{ W}$$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 18. Transferts thermiques d'énergie

b. Le diesel est le plus énergétique des éléments présentés dans le tableau. Il est analogue, en terme énergétique, au chocolat ou à l'huile végétale.

c. Nous avons besoin de 8 610 kJ par jour ce qui correspond à une quantité de diesel :

$$m = \frac{8610}{47000} = 0,183 \text{ kg} = 183 \text{ g} \text{ soit presque un verre de table de } 200 \text{ g} !$$

31. 1. L'énergie cinétique du muon est intégralement transférée au bolomètre sous forme de transfert thermique.

a. $C_b \times \Delta T = \mathcal{E}_c$ soit $\Delta T = \frac{\mathcal{E}_c}{C_b}$.

A.N. : $\Delta T = \frac{0,5 \times 1,88 \times 10^{-28} \times (200 \times 10^3)^2}{100} = 3,8 \times 10^{-20} \text{ K}$, ce qui est indétectable !

b. En réduisant considérablement la capacité thermique du bolomètre, on peut espérer détecter un écart de température et donc une signature du muon cosmique.

2. a. Conversion en joule : les WIMPS ont une énergie comprise entre $1,6 \times 10^{-16} \text{ J}$ et $1,6 \times 10^{-14} \text{ J}$.

b. Lorsque l'énergie du WIMP est de 10 keV ($1,6 \times 10^{-15} \text{ J}$), elle est transférée thermiquement au bolomètre :

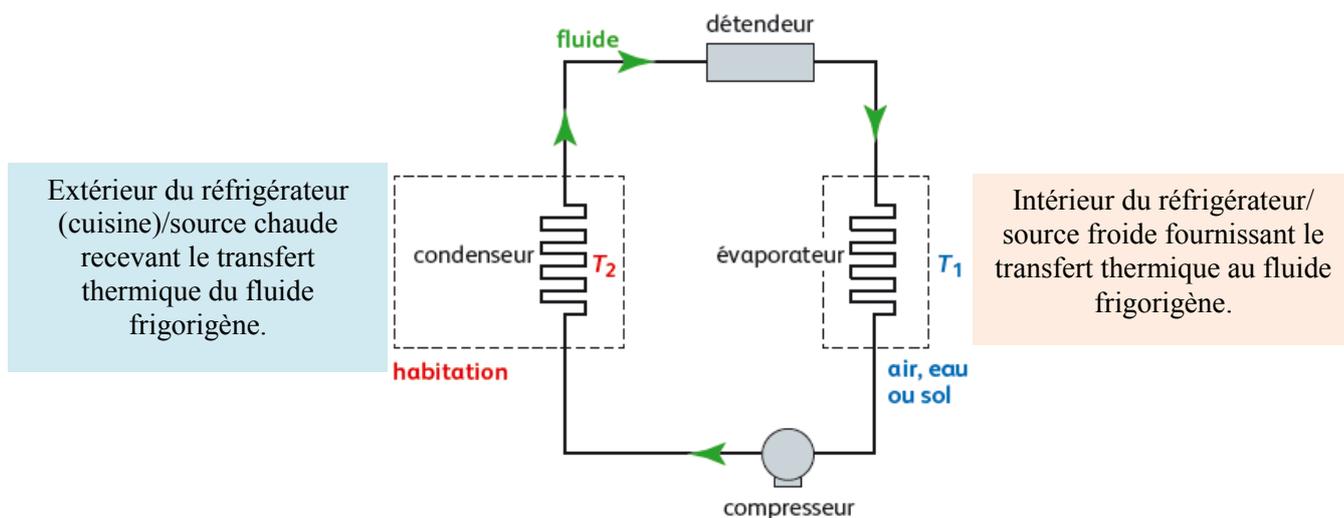
$$C_b \times \Delta T = \mathcal{E}_{\text{WIMP}} \text{ soit } \Delta T = \frac{\mathcal{E}_{\text{WIMP}}}{C_b}$$

A.N. : $\Delta T = \frac{1,6 \times 10^{-15}}{15 \times 10^{-10}} = 1,0 \text{ } \mu\text{K}$

3. La détection aux très basses températures permet de gagner 12 ordres de grandeurs de variation de température. Le micro kelvin est mesurable dans un système de réfrigération à dilution. Le problème reste de trouver un thermomètre suffisamment sensible.

32. a. Le texte précise que le système reçoit, dans l'évaporateur, un transfert thermique Q_1 . Celui-ci est donc positif car reçu par le système. De façon analogue, le transfert thermique Q_2 est fourni par le système donc négatif.

b. Les éléments constituant le réfrigérateur sont les mêmes que pour la pompe à chaleur.



c. L'énoncé précise que la variation d'énergie interne U sur un cycle est nulle. On peut profiter de l'occasion pour dire que U est une fonction d'état et ne dépend que de l'état de départ et d'arrivée d'une transformation, le même dans le cas d'un cycle.

$$\Delta U (\text{fluide}) = Q + W = Q_1 + Q_2 + W = 0$$

C'est donc le travail échangé lors du cycle qui doit compléter le bilan énergétique. Ce travail correspond en général au travail mécanique du compresseur lors de la compression.

d. Plus les températures du condenseur et de l'évaporateur sont proches, plus l'efficacité est élevée. On peut calculer l'efficacité avec $T_2 = 273 + 18 = 291 \text{ K}$ et $T_1 = 273 + (-2) = 271 \text{ K}$:

$$\eta = \frac{291}{20} = 15$$

e. L'efficacité réelle s'écrit donc :

$$\eta_{\text{réelle}} = \frac{|Q_2|}{W} \text{ et } \Delta U = W + Q_1 + Q_2$$

On a donc $|Q_2| = |W + Q_1| = W + Q_1 > W$ (W et Q_1 sont positifs).

On en déduit donc : $\eta_{\text{réelle}} = \frac{W + Q_1}{W} > 1$; ce qu'il fallait démontrer.

L'indice de performance supérieur à 1 montre clairement que pour 1 kWh utilisé par le compresseur, on récupère $\eta_{\text{réelle}}$ kWh > 1 kWh. L'intérêt économique semble évident.

33. Exemple de rédaction de synthèse de documents

Lorsqu'un engin spatial pénètre dans l'atmosphère terrestre lors de son retour sur terre, sa structure est soumise à des frottements très importants. La température du matériau externe peut atteindre plus de 1 600 °C. Ce matériau externe porte bien son nom de bouclier thermique. C'est un matériau composite qui doit être très résistant mécaniquement et thermiquement. Il est constitué de tuiles réfractaires positionnées de façon stratégique sur la face exposée de l'engin.

Lorsqu'un problème survient, la situation peut être dramatique. Des dégâts sur le bouclier thermique peuvent conduire à la destruction de l'engin spatial. L'une des ressources évoque le cas de la navette spatiale américaine Columbia qui explosa en vol en 2003. Les conclusions de l'enquête évoquent une destruction localisée du bouclier thermique par un objet s'étant détaché de la navette.

Les solutions futures de bouclier thermique doivent présenter deux avantages :

- la mise en place simplifiée : les tuiles actuelles sont de petites tailles ce qui peut générer des défauts aux jointures lors de la pose ;
- l'inspection systématique simplifiée.

Il est difficile et laborieux d'inspecter une multitude de tuiles.

Finalement, le projet « Shingle » semble proposer une solution intéressante. Des tuiles de plus grandes tailles (1m²), encadrées dans une structure permettant l'installation sans problème de jointure.

Ce projet est développé par le CNES et participe à l'élaboration de l'engin spatial du futur PRE-X.

Chapitre 19 – Transferts quantiques d'énergie

Manuel pages 383 à 398

Choix pédagogiques

Dans ce chapitre, consacré au transfert quantique d'énergie, parmi les compétences exigibles figure une compétence expérimentale : « Mettre en œuvre un protocole expérimental utilisant un laser comme outil d'investigation ou pour transmettre de l'information ».

Le laser outil d'investigation ? On pense bien sûr à la mesure de la distance Terre-Lune mais le laser peut aussi être utilisé pour mesurer des distances très petites comme celle qui sépare les deux fentes d'Young par exemple. Cette activité expérimentale a été proposée au chapitre 5. La mesure d'une distance avec un faisceau laser est une technique connue des élèves. Il y a d'autres domaines, beaucoup moins connus des élèves, dans lesquels le laser peut être utilisé comme outil d'investigation, mais ces techniques demandent des lasers très puissants que nous ne possédons pas au lycée.

C'est pourquoi, en accord avec le programme qui laisse le choix entre outil d'investigation et transmission d'information, nous avons préféré présenter une activité documentaire pour l'outil d'investigation et une activité expérimentale réalisable par tous pour la transmission d'information.

Des animations et des vidéos documentaires illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et, certaines d'entre elles, sur les sites Internet compagnon Sirius.

Page d'ouverture

La page d'ouverture de ce chapitre est illustrée par la photographie d'un tir laser vers la Lune. Ce document met en évidence la grande directivité du faisceau qui semble ne pas diverger. Peut-on réaliser un tel faisceau avec une lampe torche ? La réponse est bien évidemment non. Les élèves le savent et peuvent facilement répondre à cette question. Comment peut-on produire une telle lumière ? Quelles en sont les principales caractéristiques ? Voici quelques questions que l'on peut poser aux élèves pour ouvrir ce chapitre s'ils ne l'ont pas déjà fait par eux-mêmes en observant la photographie.

On peut également utiliser la légende qui parle volontairement de photons pour rappeler des notions vues en 1^{re} S et certainement revues en début d'année. Ces connaissances seront bien utiles lorsque l'on abordera l'émission stimulée.

Activités

Activité documentaire 1. Le laser, outil d'investigation

Commentaires

Utiliser un laser pour réaliser l'analyse spectrale d'une roche, c'est le défi que va relever le rover Curiosity lancé vers Mars le 26 novembre 2011. À son bord, un laser pulsé de 6MW : nous sommes loin des 2mW autorisés au lycée !

Cette activité permet de découvrir quelques propriétés du laser (grande directivité du faisceau, forte puissance) et invite à chercher d'autres applications des lasers pulsés.

Réponses

1. Analyser les documents

a. Les deux caractéristiques du faisceau lumineux émis par le laser sont sa grande directivité (surface de 0,5 mm à 7 m de diamètre) et sa grande puissance (6 MW).

b. Un laser pulsé est un laser qui n'émet pas en continu. Il émet des impulsions très courtes à intervalles de temps réguliers.

c. Dans le meilleur des cas, il faut 50 impulsions pour réaliser une analyse spectrale. Avec une durée de 55 ns et une puissance de 6MW, l'énergie nécessaire est :

$$E = 50 \times 55 \times 10^{-9} \times 6,0 \times 10^6 = 16,5 \text{ J}$$

Cette énergie est relativement faible pour vaporiser une roche. Rappelons qu'il faut un peu plus de 4 J pour élever d'un seul degré la température d'un gramme d'eau.

d. Le laser pulsé permet d'avoir des impulsions de très grande puissance. Apporter la même énergie pendant un temps plus long avec un laser à émission continue ne produit pas le même effet sur la roche car l'énergie thermique va se propager par conduction sur un volume beaucoup plus grand, produisant une élévation de température plus faible.

e.
$$\mathcal{P} = \frac{6,0 \times 10^6}{\pi(0,25 \times 10^{-3})^2} = 3,1 \times 10^{13} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

C'est 30 milliards de fois plus grand que la puissance surfacique du rayonnement solaire à midi en été. On comprend pourquoi la roche est pulvérisée.

2. Faire une recherche

a. Actuellement, on sait réaliser des lasers pulsés dont les impulsions ne durent que quelques femtosecondes (femto = 10^{-15}). Ces lasers ont de nombreuses applications. Ils peuvent servir de flash pour photographier des phénomènes extrêmement rapides, tels que des réactions chimiques par exemple, et mieux comprendre le mécanisme de ces réactions.

b. On trouve également des lasers pulsés dans l'industrie. Ils sont utilisés pour percer ou découper du métal avec une très grande précision (exercice 6 page 393). La très faible durée des impulsions permet de vaporiser le métal, sans perte d'énergie par conduction et donc sans abimer les bords de la découpe.

Ces lasers à impulsions sont également utilisés en chirurgie et en particulier en chirurgie des yeux (découpe de la cornée). L'excès d'énergie est communiqué à l'électron sous forme d'énergie cinétique.

Activité expérimentale 2. Transmettre de l'information avec un laser

Commentaires

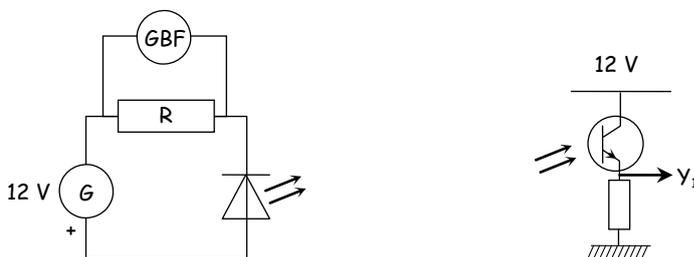
Contrairement à l'activité précédente, les lasers dont nous disposons dans les lycées permettent facilement d'illustrer le principe de la transmission d'information, c'est pourquoi nous proposons une activité expérimentale.

Quelques informations sur le dispositif

Le matériel utilisé :

- Une diode laser. On peut utiliser la diode laser Jeulin ou utiliser la diode laser d'un niveau à bulle (10 euros environ dans les grandes surfaces de bricolage).
- Un GBF (GF3 Jeulin ou modèle équivalent).
- Un phototransistor et son alimentation continue 12 V.
- Un oscilloscope.
- Un ampli de puissance et un haut-parleur (on peut utiliser l'ampli intégré dans les GBF GF3 Jeulin).
- Des fils de connexion.
- Un micro à électret amplifié.

Le montage :

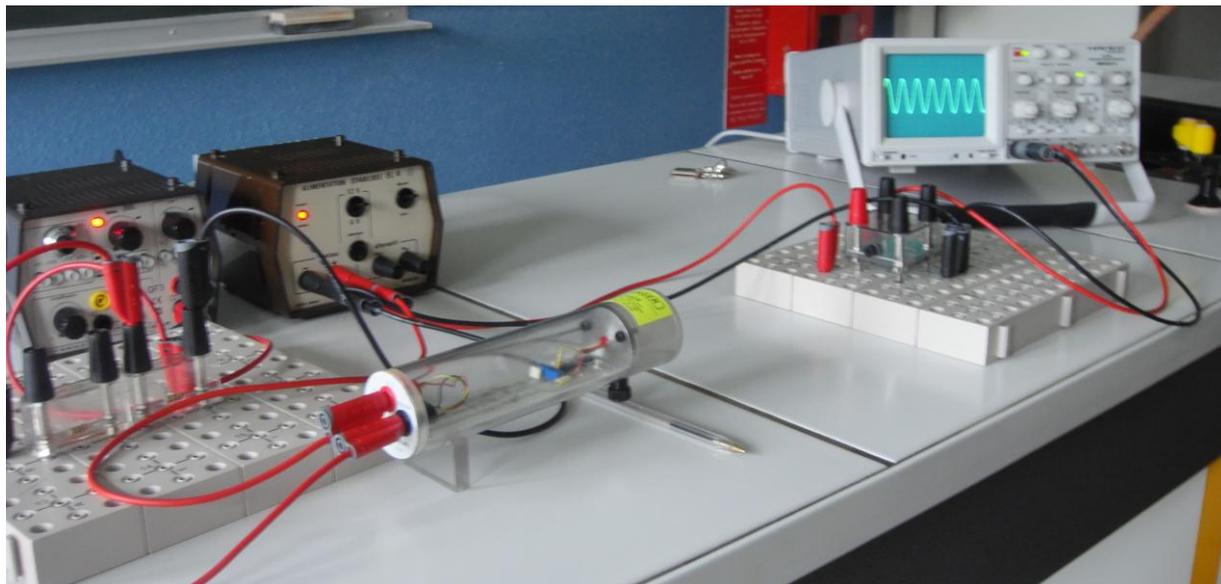


La diode laser Jeulin est alimentée par un générateur de fem $E = 12 \text{ V}$ (à prévoir en plus dans la liste du matériel si on utilise cette diode laser). Il faut introduire en série entre la diode et le générateur une résistance d'une centaine d'ohms environ (une résistance radio de 120Ω convient très bien).

Brancher la sortie du GBF en dérivation aux bornes de la résistance. Placer l'ensemble à une extrémité de la paillasse.

Alimenter le phototransistor avec le générateur de tension continue et brancher sa sortie sur la voie I de l'oscilloscope.

Placer le phototransistor à l'autre extrémité de la paillasse de telle sorte qu'il soit dans le faisceau de la diode laser.



L'oscilloscope n'est pas indiqué dans la liste de matériel du manuel car il n'est pas utile pour les élèves. Il permet juste au professeur de déterminer, en fonction du matériel dont il dispose, la tension maximale du GBF pour que le signal délivré par le phototransistor soit sinusoïdal. Régler la fréquence du GBF sur 440 Hz puis augmenter progressivement la tension de sortie en vérifiant sur l'écran de l'oscilloscope que le signal reçu reste sinusoïdal.

Si la diode utilisée provient d'un niveau à bulle, la tension d'alimentation est fournie par deux piles de 1,5 V. Dans ces conditions, la tension délivrée par le GBF ne doit pas dépasser 0,2 V à 0,3 V et il faut utiliser une résistance plus faible pour ne pas éteindre complètement le signal (environ 50 Ω). Là aussi, des essais avant la séance de TP sont nécessaires.

Une fois les différents paramètres connus, on peut retirer l'oscilloscope et brancher à la sortie du phototransistor un ampli et un haut-parleur.

Le micro à électret se branche de la même façon, à la place du GBF.

Réponses

1. Observer

a. L'intensité du faisceau lumineux délivré par la diode laser est modulée par le GBF. Elle augmente et diminue à la fréquence du GBF. Cela est très facilement observable quand la fréquence est réglée sur 1 Hz.

b. L'objectif est atteint avec la diode laser. On peut facilement communiquer d'une paille à l'autre.

2. Interpréter et conclure

a. Le signal porteur est le faisceau laser. C'est lui qui porte l'information. Son intensité est modulée par l'information à transmettre, fournie par le GBF ou le micro à électret.

b. Pour transmettre l'information le plus loin possible, le signal porteur doit être très directif et suffisamment intense.

Démarche d'investigation

Cette deuxième partie de l'activité expérimentale est présentée sous forme de démarche d'investigation : comment transmettre de l'information s'il y a un obstacle entre les lieux d'émission et de réception du signal ?

Plusieurs protocoles peuvent être proposés par les différents groupes d'élèves : utiliser plusieurs miroirs, n'en utiliser qu'un seul, utiliser une fibre optique, etc.

En général, les méthodes proposées permettent effectivement de contourner l'obstacle mais les élèves remarquent très vite que la fibre optique est la méthode de loin la plus facile à mettre en œuvre. Elle permet également de transporter l'information beaucoup plus loin. C'est la méthode utilisée pour transmettre de l'information aux quatre coins du monde.

Quelques remarques

On peut indiquer aux élèves que la transmission d'information sera étudiée un peu plus loin dans le cours et que, contrairement à ce qui vient d'être fait dans cette activité, c'est toujours un signal numérique que l'on transmet (ce qui revient à allumer ou éteindre la diode laser) car le signal numérique est très facile à régénérer.

Les lasers utilisés sont des lasers infrarouges car l'atténuation dans les fibres optiques est beaucoup plus faible.

Exercices d'application

5 minutes chrono !

1. Mots manquants

- quantifiés
- absorption
- stimulée ; excité
- pompage ; inversion
- cavité résonante
- constructives ; d'amplifier/d'augmenter
- monochromaticité ; cohérence
- transitions

2 QCM

- Une absorption.
- Gamma.
- Est un phénomène beaucoup moins probable que l'émission spontanée.
- Les radiations dont la longueur d'onde vérifie la relation $2L = n\lambda$ avec n entier non nul.

Compétences exigibles

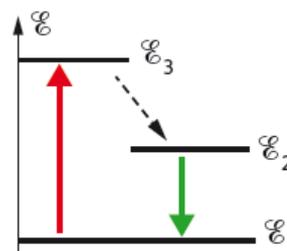
3. Pour que le photon soit absorbé, il faut que l'atome soit dans l'état fondamental. Il va ainsi gagner de l'énergie pour passer dans l'état excité.

Au contraire, lors de l'émission stimulée, le photon n'est pas absorbé car l'atome est déjà dans l'état excité. Le photon incident va induire la désexcitation de l'atome et l'émission d'un photon.

4. a. Le pompage permet de faire passer les atomes du niveau fondamental au niveau excité \mathcal{E}_3 (flèche rouge sur le schéma). L'émission stimulée qui constitue la lumière émise par le laser correspond à la transition du niveau \mathcal{E}_2 vers le niveau \mathcal{E}_1 (flèche verte).

b. Il peut y avoir émission spontanée mais elle est peu probable :

- entre les niveaux \mathcal{E}_3 et \mathcal{E}_1 car le niveau \mathcal{E}_3 se désexcite très vite vers le niveau \mathcal{E}_2 pour réaliser l'inversion de population ;
- entre les niveaux \mathcal{E}_2 et \mathcal{E}_1 car le niveau \mathcal{E}_2 a été choisi de telle sorte que sa durée de vie soit grande (durée de vie = temps moyen de désexcitation spontanée).



5. a. Soit D la distance et d le diamètre de la tache. L'angle α étant petit, on peut faire l'approximation $\tan \alpha = \alpha$. On a donc :

$$d = D\alpha = 200 \times 2,0 \times 10^{-3} = 0,40 \text{ m}$$

b. Le diamètre du faisceau à la sortie du laser est négligeable devant le diamètre de la tache. Ce dernier est connu au cm près, alors que le diamètre du faisceau ne mesure qu'1 mm. Si on avait tenu compte du diamètre du faisceau, le résultat aurait été le même.

6. a. Puissance lors d'une impulsion :

$$\mathcal{P} = \frac{\mathcal{E}}{\Delta t} = \frac{3,0 \times 10^{-6}}{100 \times 10^{-15}} = 30 \text{ MW}$$

La puissance moyenne est 100 000 fois plus faible que la puissance lors d'une impulsion si on néglige la durée d'une impulsion devant la durée qui sépare deux impulsions consécutives (simplification légitime puisque l'énergie n'est donnée qu'avec deux chiffres significatifs) :

$$\mathcal{P}_{\text{moy}} = 300 \text{ W}$$

b. La puissance lors d'une impulsion est considérable. Le faisceau laser étant très fin, l'énergie du laser est transférée sous forme thermique à une toute petite surface de métal et dans une durée trop petite pour que cette énergie puisse, par conduction, être répartie sur un volume plus grand. Le métal est sublimé instantanément.

7. a. C'est la grande cohérence de la lumière du laser qui permet d'obtenir des interférences sans placer de fente source.

b. Utilisons la relation donnant l'interfrange vue au chapitre 5 :

$$i = \frac{\lambda D}{a_{1-2}} \Rightarrow \lambda = \frac{i \times a_{1-2}}{D} = \frac{2,53 \times 10^{-3} \times 0,50 \times 10^{-3}}{2,00}$$
$$\lambda = 6,3 \times 10^{-7} \text{ m}$$

8. a. La longueur d'onde est de l'ordre du micromètre. Elle appartient au domaine des infrarouges.

b. Calculons l'énergie transportée par le photon associé à cette radiation :

$$\mathcal{E} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{1,6 \times 10^{-6}} = 1,24 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Convertissons cette énergie en eV :

$$\mathcal{E} = \frac{1,24 \times 10^{-19}}{1,60 \times 10^{-19}} = 0,78 \text{ eV}$$

Cette énergie permet des transitions entre des niveaux d'énergie rotationnelle et entre des niveaux d'énergie vibrationnelle mais elle est insuffisante pour permettre des transitions électroniques.

9. $\Delta \mathcal{E} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$

$$\nu = \frac{\Delta \mathcal{E}}{h} = \frac{5,67 \times 10^{-19}}{6,63 \times 10^{-34}} = 8,55 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3,00 \times 10^8}{8,55 \times 10^{14}} = 3,51 \times 10^{-7} \text{ m} = 351 \text{ nm}$$

Cette radiation se situe dans l'ultraviolet.

Compétences générales

10. Un laser de 2mW rayonne chaque seconde une énergie :

$$\mathcal{E} = 2\text{mJ} \quad (\mathcal{E} = \mathcal{P}\Delta t)$$

Calculons l'énergie transportée par un photon.

$$\Delta\mathcal{E} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{632 \times 10^{-9}} = 3,15 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Nombre de photons émis chaque seconde :

$$n = \frac{\mathcal{E}}{\Delta\mathcal{E}} = \frac{2 \times 10^{-3}}{3,15 \times 10^{-19}} = 6 \times 10^{15}$$

L'ordre de grandeur du nombre de photons est donc 10^{16} .

11. $\lambda = \frac{c}{\nu}$

$$c = \lambda\nu = 3,392231400 \times 10^{-6} \times 88376181,627 \times 10^6 = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

12. a. La fenêtre de télécommunication se situe entre 1,3 et 1,6 μm . Il s'agit du domaine infrarouge.

b. Pour réduire les pertes, il faut choisir un domaine de longueur d'onde pour lequel le coefficient d'atténuation est le plus faible. D'après le schéma, ce domaine est compris entre 1,5 μm et 1,6 μm .

c. Graphiquement, le coefficient d'atténuation est de l'ordre de 4 %.

d. Même avec un faible coefficient d'atténuation, l'amplitude du signal transmis diminue lorsque la distance augmente. Il est donc impossible de transmettre des informations sur de grandes distances. On place donc des amplificateurs pour redonner au signal son amplitude initiale lorsque cette dernière devient trop faible.

Exercices de méthode

13. Exercice résolu.

14. a. L'atome passe du niveau fondamental \mathcal{E}_1 , qui constitue donc l'état initial, au niveau excité \mathcal{E}_2 qui constitue l'état final. On a donc :

$$\Delta\mathcal{E} = \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1 > 0 \text{ car } \mathcal{E}_2 > \mathcal{E}_1$$

b. L'énergie du photon a pour expression $\mathcal{E}_{\text{photon}} = h\nu$. C'est une grandeur toujours positive. D'autre part, il n'y a absorption du photon que si la transition est possible, c'est-à-dire si l'énergie apportée par le photon correspond au passage du niveau fondamental au niveau excité.

On a donc : $\Delta\mathcal{E} = \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1 = h\nu$

c. L'énergie du photon est la même. Elle est toujours positive et a comme valeur $\mathcal{E}_{\text{photon}} = h\nu$.

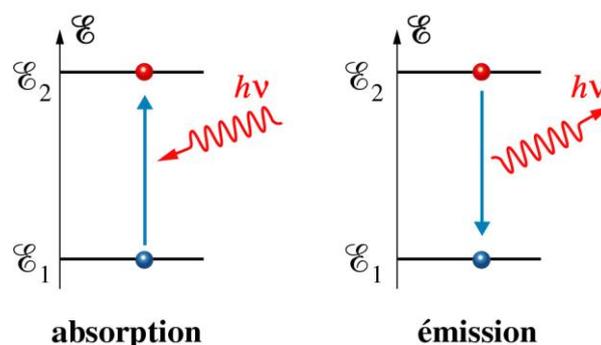
d. Pour l'émission, l'état excité \mathcal{E}_2 est l'état initial et l'état fondamental \mathcal{E}_1 est l'état final.

On a donc : $\Delta\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 < 0$ car $\mathcal{E}_2 > \mathcal{E}_1$

e. Puisque l'énergie du photon $h\nu$ est toujours positive, on peut écrire :

$$\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = -h\nu \text{ ou encore } \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1 = h\nu$$

Cette relation $\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1 = h\nu$ est donc vraie à l'émission comme à l'absorption d'un photon.



15. a. Le domaine des ondes électromagnétiques infrarouges s'étend de 800 nm à 1 mm (8×10^{-7} m à 10^{-3} m). Le nombre d'onde est l'inverse de la longueur d'onde. Les longueurs d'onde de la bande $4\,000 \text{ cm}^{-1}$ à $2\,000 \text{ cm}^{-1}$ sont donc comprises entre $\frac{1}{4000} \text{ cm}$ et $\frac{1}{2000} \text{ cm}$ soit $2,5 \times 10^{-6} \text{ m}$ et $5 \times 10^{-6} \text{ m}$. Elles sont donc bien situées dans le domaine infrarouge.

b. Les échanges d'énergie entre matière et rayonnement se font par quanta.

Un rayonnement permet aux atomes de la molécule d'hexan-1-ol de changer de niveau d'énergie électronique si les photons associés à ce rayonnement transportent une énergie suffisante. Le photon qui transporte la plus grande énergie dans le domaine considéré est celui associé à la radiation de plus petite longueur d'onde. Calculons l'énergie transportée :

$$\mathcal{E} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{2,5 \times 10^{-6}} = 8,0 \times 10^{-20} \text{ J} \text{ soit } 5,0 \times 10^{-1} \text{ eV}$$

L'énergie nécessaire pour réaliser des transitions électroniques est de l'ordre de l'eV. Dans le domaine considéré, le rayonnement infrarouge ne permet pas de changer de niveau électronique.

c. Une molécule possède également de l'énergie rotationnelle et de l'énergie vibrationnelle dont les ordres de grandeurs sont 10^{-1} pour l'énergie vibrationnelle et 10^{-3} eV pour l'énergie rotationnelle. Dans le domaine représenté sur la figure, des changements de niveaux rotationnels sont possibles, mais des transitions entre niveaux vibrationnels sont également possibles.

d. La différence d'énergie entre deux niveaux rotationnels est environ 1 000 fois plus faible que la différence d'énergie entre deux niveaux vibrationnels. Il y a donc un très grand nombre de niveaux d'énergie rotationnelle pour chaque niveau d'énergie vibrationnelle. Lors du passage d'un niveau d'énergie vibrationnelle à un autre, il y a un très grand nombre de transitions possibles. Les raies d'absorption ont des fréquences trop voisines pour pouvoir être discernées. On observe des bandes d'absorption.

Exercices d'entraînement

16. a. Lorsque la lumière traverse une ouverture de petite dimension, elle subit le phénomène de diffraction.

b. $\theta = \frac{1,22\lambda}{D} = \frac{1,22 \times 632,8 \times 10^{-9}}{0,90 \times 10^{-3}} = 8,6 \times 10^{-4} \text{ rad.}$

c. L'angle de divergence est le double de l'angle de première extinction soit $1,7 \times 10^{-3} \text{ rad.}$
On en déduit le diamètre de la tache à 50 m :

$$d = 1,7 \times 10^{-3} \times 50 = 0,086 \text{ m} = 8,6 \text{ cm}$$

17. a. Cette radiation appartient au domaine des infrarouges.

b. Le faisceau est de couleur rouge.

c. Pour que le chirurgien puisse balayer la tumeur avec le faisceau laser, il faut que celui-ci soit visible. Le laser utilisé étant dans le domaine de l'infrarouge, la lumière émise n'est pas visible, c'est pourquoi on utilise un laser auxiliaire.

d. Chaque photon transporte une énergie :

$$\mathcal{E} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{10,6 \times 10^{-6}} = 1,88 \times 10^{-20} \text{ J}$$

Chaque seconde, le faisceau transporte une énergie $\mathcal{E} = 2,7 \times 10^{21} \times 1,88 \times 10^{-20} = 51 \text{ J.}$
Il a donc une puissance de 51 W.

18. Le phénomène observé est dû à la grande cohérence de la lumière émise par le laser. Les ondes diffusées dans toutes les directions par la surface du verre dépoli interfèrent entre elles. En certains points de la surface, ces interférences sont destructives, ce qui fait apparaître de petites taches noires.

19. a. Elle est nulle puisque les deux faisceaux parcourent la même distance.

b. Une plage brillante puisqu'il n'y a pas de déphasage entre les deux faisceaux.

c. Les faisceaux font un aller-retour entre la lame semi-réfléchissante et les miroirs.

Le faisceau qui se réfléchit sur le miroir M_2 parcourt donc une distance supplémentaire égale à $2d$. On a donc $\delta = 2d$.

d. Il y a interférence constructive si $\delta = k\lambda$, k appartenant à \mathbb{Z} .

e. La première plage brillante correspond à $k = 0$.

La 633^e plage brillante correspond à $k = 632$:

$$\delta = 2d = 632 \lambda \quad d = 316 \times 632 = 2,00 \times 10^5 \text{ nm} = 0,200 \text{ mm}$$

20. a. Pour que l'exposant soit sans unité, il faut que k s'exprime en joule par kelvin $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$.

b. L'énergie du niveau excité étant supérieure à celle du niveau fondamental et la température absolue étant positive ou nulle, on en déduit que l'exposant de l'exponentielle est négatif quelle que soit la température.

e^{-x} est inférieure à 1 pour x positif. On en déduit donc que $\frac{N_2}{N_1} < 1$ ou $N_2 < N_1$.

c. Dans une enceinte, quelle que soit la température, il y a toujours plus d'atomes dans l'état fondamental que dans l'état excité. Dans la cavité résonante du laser, on observe le phénomène inverse : il y a plus d'atomes dans l'état excité que dans l'état fondamental. C'est pourquoi on parle d'inversion de population.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 19. Transferts quantiques d'énergie

d. Pour une température donnée, plus l'écart d'énergie est grand, plus l'exposant est petit (grand en valeur absolue). Comme la fonction exponentielle $y = e^{-x}$ avec $x = \frac{\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1}{kT}$ est une

fonction strictement décroissante, y diminue si x augmente. On en déduit que le rapport des populations diminue quand l'écart d'énergie augmente (il y a de moins en moins d'atomes dans l'état excité).

e. Quand la température tend vers 0 K, $x \rightarrow \infty$ et $y = e^{-x} \rightarrow 0$, l'exposant et le rapport des populations tend vers 0 : il n'y a plus d'atome dans l'état excité.

f. Oui, car la température caractérise l'état d'agitation. S'il n'y a plus d'agitation, il n'y a plus de chocs entre les atomes et il n'y a plus de raison pour qu'un atome passe dans un état excité.

21. a. Cette phrase signifie que l'énergie des photons associés à cette radiation correspond à une transition possible entre le niveau fondamental et un niveau excité de l'atome de sodium.

b. $|\Delta v| = \frac{h\nu}{mc}$

$$\Delta v = \frac{3,38 \times 10^{-19}}{3,82 \times 10^{-26} \times 3,00 \times 10^8} = 2,95 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

c. Cette diminution est extrêmement faible. Elle correspond à :

$$\frac{2,95 \times 10^{-2}}{1,00 \times 10^3} \text{ soit environ } \frac{3}{100000} \text{ de la vitesse initiale}$$

d. Le photon absorbé provient toujours de la même direction alors que le photon est émis dans n'importe quelle direction, ce qui fait que pour un grand nombre d'émissions, les photons sont émis avec la même probabilité dans toutes les directions. La valeur de la vitesse, diminuée par l'émission d'un photon, peut être augmentée par un photon émis en sens inverse. Sur un grand nombre d'émissions, les variations de vitesse se compensent.

e. Appliquons la relation donnée dans le texte :

$$a = \frac{2,95 \times 10^{-2}}{10^{-8}} = 2,95 \times 10^6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

Cette accélération est considérable : environ 3×10^5 fois plus grande que l'accélération de la pesanteur.

f. En choisissant un axe Ox orienté dans le sens du mouvement des atomes de sodium, on a :

$$v_x = -2,95 \times 10^6 t + 1,00 \times 10^3$$

et

$$x = \frac{1}{2}(-2,95 \times 10^6)t^2 + 1,00 \times 10^3 t$$

La première équation permet de calculer t en écrivant que $v = 0$. On trouve $t = 3,39 \times 10^{-4}$ s.

En remplaçant dans la deuxième expression, on trouve $x = 0,169$ m.

g. Les atomes étant en mouvement, la fréquence des photons absorbés dépend de la vitesse des atomes de sodium. Il s'agit de l'effet Doppler.

22. a. L'énergie transportée par le faisceau laser provient du générateur qui produit la décharge électrique dans le gaz.

b. La décharge électrique apporte l'énergie nécessaire aux atomes pour passer de l'état fondamental à l'état excité dans lequel ils se trouvent au moment de l'émission stimulée.

c. La dernière phrase du document peut se mettre sous la forme mathématique : $2L = n\lambda$.

d. En exprimant λ en fonction de la fréquence, cette expression devient :

$$2L = \frac{nc}{\nu_n} \text{ en appelant } \nu_n \text{ la fréquence correspondant à } n \Rightarrow \nu_n = \frac{nc}{2L}$$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 19. Transferts quantiques d'énergie

Pour obtenir la plus petite différence entre deux fréquences, il faut donner à n deux valeurs consécutives:

$$\nu_{n+1} - \nu_n = \frac{(n+1)c}{2L} - \frac{nc}{2L} = \frac{c}{2L}$$

A.N. :
$$\nu_{n+1} - \nu_n = \frac{3,00 \times 10^8}{2 \times 0,300} = 5,00 \times 10^8 \text{ Hz} = 500 \text{ MHz}$$

e. Le mélange est tel que $\Delta\nu = 1\,400 \text{ MHz} > \nu_{n+1} - \nu_n$: il peut donc y avoir plusieurs fréquences émises (3 au total).

Remarque : en supposant que ce laser est le laser hélium néon utilisé dans les lycées, on peut considérer qu'il est monochromatique car :

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3,00 \times 10^8}{632 \times 10^{-9}} = 4,75 \times 10^{14} \text{ Hz} \quad \text{et} \quad \frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{5,00 \times 10^8}{4,75 \times 10^{14}} \approx 10^{-6}$$

Exercices de synthèse

23. a. Énergie transportée dans une impulsion :

$$\mathcal{E}_{\text{imp}} = \mathcal{P}\Delta t = 30 \times 10^6 \times 100 \times 10^{-15} = 3,0 \times 10^{-6} \text{ J}$$

b. Énergie d'un photon :

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{532 \times 10^{-9}} = 3,74 \times 10^{-19} \text{ J}$$

c. Nombre de photons par impulsion :

$$N = \frac{\mathcal{E}_{\text{imp}}}{\mathcal{E}_{\text{photon}}} = \frac{3,0 \times 10^{-6}}{3,74 \times 10^{-19}} = 8,0 \times 10^{12} \text{ photons}$$

d. Distance parcourue par la lumière en 100 fs :

$$L = v\Delta t = 3,00 \times 10^8 \times 100 \times 10^{-15} = 3,00 \times 10^{-5} \text{ m} = 3,00 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

e. La section du faisceau étant de $1,0 \text{ mm}^2$, les photons sont contenus dans un volume :

$$V = 1,0 \times 3,00 \times 10^{-2} = 3,0 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$$

f. On en déduit le nombre de photons par mm^3 à la sortie du laser :

$$n = \frac{N}{V} = \frac{8,0 \times 10^{12}}{3,0 \times 10^{-2}} = 2,7 \times 10^{14} \text{ photons/mm}^3$$

24. 1. Premier cas

a. Cette phrase signifie que l'énergie des photons associés à cette radiation correspond à une transition possible entre le niveau fondamental et un niveau excité de l'atome.

b. Non, puisque l'atome est immobile. Il « voit » donc les radiations avec la même fréquence. Celle-ci étant inférieure à la fréquence pour laquelle l'atome absorbe les photons, la probabilité que l'atome absorbe un photon est faible et identique pour les deux faisceaux.

c. Pour que l'atome se mette en mouvement, il faudrait qu'il absorbe les photons provenant d'un seul faisceau, ce qui n'est pas possible puisque la probabilité d'absorber est la même.

2. Deuxième cas

a. Non ; pour l'atome, les deux sources sont en mouvement. La source de gauche s'approche et celle de droite s'éloigne. Il y a donc un effet Doppler.

b. Plus la fréquence de la radiation est proche de la fréquence d'absorption, plus la probabilité d'absorber un photon augmente. Comme au départ, $\nu < \nu_0$, la probabilité va augmenter du côté où la fréquence vue par l'atome augmente, c'est-à-dire du côté où la source s'approche. Il y aura donc augmentation de la probabilité d'absorber un photon venant de la gauche et diminution de la probabilité d'absorber un photon provenant de la droite (puisque l'écart entre ν et ν_0 augmente de ce côté).

c. L'ensemble « photon-atome » est un système isolé. La quantité de mouvement de l'ensemble reste constante au cours de l'absorption. La quantité de mouvement du photon étant de sens opposé à celle de l'atome, la quantité de mouvement de l'atome après absorption sera plus petite.

$$m\vec{v} + \vec{p}_{\text{photon}} = m\vec{v}' \quad \text{d'où} \quad m\nu - p_{\text{photon}} = m\nu' \quad \text{d'où} \quad \nu' < \nu$$

On peut également raisonner sur la force que subit l'atome lorsqu'il rencontre le photon.

d. Il se passe le phénomène inverse, l'atome va absorber les photons venant de la droite, ce qui va diminuer sa vitesse.

e. Refroidir un gaz, c'est diminuer l'agitation thermique, c'est-à-dire les mouvements désordonnés des atomes. Ces mouvements étant de directions quelconques, il faut pouvoir les ralentir dans les trois dimensions d'où le dispositif.

25. Éléments de correction de la synthèse de documents

Après avoir rappelé ce qu'est un laser femtoseconde, le candidat doit mettre en avant les caractéristiques principales de ce laser, à savoir sa grande puissance et la durée très brève des impulsions. Le principal intérêt du laser femtoseconde, quel que soit le domaine d'application, réside justement dans la durée des impulsions qui évite par sa brièveté les effets thermiques. L'énergie thermique n'a pas le temps de se propager par conduction autour de l'endroit touché par le faisceau. Cela permet de vaporiser la matière touchée par le faisceau sans chauffer la matière environnante. On trouve ainsi des lasers femtoseconde dans l'industrie (micro-usinage) et en ophtalmologie (découpe de la cornée).

Un autre intérêt de la durée des impulsions est l'utilisation du laser comme flash pour prendre des photos avec un temps d'exposition très court. On peut ainsi photographier la rupture ou la formation de liaisons chimiques.

Chapitre 20 – Dualité onde-particule

Manuel pages 399 à 415

Choix pédagogiques

Dans la première partie du cours, l'aspect particulière de la lumière abordé en classe de 1^{re} S est généralisé à l'ensemble des rayonnements électromagnétiques, on attribue alors au photon en plus du quantum d'énergie $h\nu$, une quantité de mouvement ; l'effet Compton abordé en termes de chocs entre particules a été choisi pour confirmer le comportement particulière des photons.

Suivant le cheminement historique, la deuxième partie introduit ensuite les ondes de matière et la relation de de Broglie.

La dualité onde-particule qui s'applique aussi bien aux rayonnements électromagnétiques qu'aux ondes de matière constitue la dernière partie ; la notion d'objet quantique et la nécessité de traiter son comportement en termes de probabilité (sans développement mathématique) termine le chapitre.

Les quatre activités introduisent ou illustrent ces différentes parties.

Des animations, des simulations et des vidéos documentaires illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et, certaines d'entre elles, sur les sites Internet compagnon Sirius.

Page d'ouverture

Pour illustrer ce chapitre sur la dualité onde-matière, le choix s'est porté sur cette œuvre de l'artiste Erwin Redl dans laquelle lumière et matière se rejoignent.

L'artiste joue à la fois sur la lumière qui baigne l'ensemble de la pièce et les points lumineux réalisés à l'aide de centaines de diodes qui suggèrent la matière. L'espace dans lequel se trouve le personnage semble ainsi matérialisé avec des effets de perspectives surprenants.

On peut noter que l'ensemble rappelle l'univers virtuel de Matrix.

Activités

Activité documentaire 1. L'effet Compton

Commentaires

Cette première activité permet tout d'abord de réinvestir les connaissances des élèves sur l'aspect particulaire des rayonnements électromagnétiques, aspect abordé en classe de 1^{re} S. Elle fournit aussi l'occasion de montrer le cheminement de la science avec les controverses qui divisent le milieu scientifique de l'époque de Compton et les difficultés rencontrées par Compton lui-même pour fournir une interprétation satisfaisante de son expérience.

La dernière question invite à une recherche documentaire.

Réponses

1. Analyser les documents

a. Pour des valeurs de θ comprises entre 0 et $\pm \frac{\pi}{2}$, $\cos \theta$ prend des valeurs de 0 à 1.

$\Delta\lambda$ prend donc des valeurs comprises entre 0 et $2,42 \times 10^{-12}$ m.

b. En attribuant un caractère particulaire aux rayons X, le raisonnement est le suivant :

- un photon X incident a une énergie $\mathcal{E} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$;

- un photon diffusé a une énergie $\mathcal{E}' = h\nu' = \frac{hc}{\lambda'}$;

- l'expérience montre que $\lambda' > \lambda$ donc $\mathcal{E}' < \mathcal{E}$.

Les photons diffusés ont donc une énergie inférieure à celle des photons incidents.

c. Compton interprète ce phénomène comme un choc entre deux particules formant un système isolé, un photon et un électron peu lié de la cible.

2. Exploiter les informations et conclure

a. D'après la relation $h = \frac{\mathcal{E}}{\nu}$, on en déduit :

$$\dim(h) = \dim(\text{énergie}) \times T$$

D'après la définition de l'énergie cinétique $\mathcal{E} = \frac{1}{2}mv^2$:

$$\dim(mc) = \dim\left(\frac{\frac{1}{2}mc^2}{c}\right)$$

$$\dim(mc) = \frac{\dim(\text{énergie})}{L \times T^{-1}}$$

Donc :

$$\dim\left(\frac{h}{mc}\right) = \frac{\dim(\text{énergie}) \times T \times L \times T^{-1}}{\dim(\text{énergie})} = L$$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 20. Dualité onde-particule

A.N. :
$$\lambda_{\text{Compton}} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{9,11 \times 10^{-31} \times 3,00 \times 10^8} = 2,43 \times 10^{-12} \text{ m}$$

La valeur calculée est voisine de la valeur expérimentale ; l'écart est de l'ordre de 1/200 soit 0,5 %.

b. Pour mettre en évidence une différence de longueur d'onde de l'ordre de 10^{-12} m, les rayonnements électromagnétiques utilisés doivent avoir des longueurs d'onde voisines. C'est le cas des rayons X dont les longueurs d'onde dans le vide sont comprises entre 10^{-11} m et 10^{-8} m. Les longueurs d'onde des rayonnements UV, comme les rayonnements visibles, sont supérieures à 10^{-8} m et une différence de longueur d'onde de l'ordre de 10^{-12} m est alors difficilement mesurable.

c. L'application de la conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie totale du système constitué par un électron et une autre particule, le photon, conduit au résultat. Ainsi, l'interprétation de l'expérience de Compton confirme l'hypothèse des photons : les rayonnements électromagnétiques dont la lumière constitue la partie visible ont un comportement particulière.

3. Faire une recherche

L'effet photoélectrique est l'émission d'électrons par un matériau sous l'effet d'un rayonnement électromagnétique. Pour chaque matériau, il existe un seuil en fréquence caractéristique du matériau, au dessous duquel il n'y a pas émission d'électrons. En dessous de cette fréquence, quelle que soit l'intensité du rayonnement, aucun électron n'est émis.

On ne peut pas expliquer cet effet en considérant un rayonnement comme une onde électromagnétique car dans ce cas, en augmentant son intensité, on devrait pouvoir fournir suffisamment d'énergie au matériau pour libérer des électrons.

La notion de photon est nécessaire pour expliquer cet effet qui est interprété comme l'absorption d'un photon. Un photon possède une énergie déterminée par sa fréquence et l'éjection d'un électron ne peut avoir lieu que si l'énergie de ce photon est égale ou supérieure à l'énergie nécessaire à l'extraction d'un électron du matériau :

$$h\nu \geq h\nu_0, \nu_0 \text{ étant la fréquence seuil.}$$

L'excès d'énergie est communiqué à l'électron sous forme d'énergie cinétique.

Activité documentaire 2. Le comportement ondulatoire des électrons

Commentaires

L'activité présente des situations où l'aspect ondulatoire de la matière est significatif.

Les hypothèses de Louis de Broglie sont données dans le texte permettant de traiter cette activité avant le cours.

L'introduction situe historiquement les expériences de diffraction qui ont constitué une preuve de l'aspect ondulatoire de la matière postulé par Louis de Broglie.

La diffraction de particules matérielles (électrons, neutrons) étant fréquemment utilisée en physique et chimie du solide afin d'étudier la structure cristalline d'un matériau donné, l'exploitation porte sur ces techniques.

Réponses

1. Analyser les documents

a. Le phénomène physique sur lequel sont basées les expériences est le phénomène de diffraction.

L'expérience de Davisson et Germer étudie les électrons réfléchis par un cristal alors que l'expérience de Thomson étudie les électrons transmis.

b. Le phénomène de diffraction est caractéristique des ondes ; en donnant lieu au phénomène de diffraction, les électrons montrent un aspect ondulatoire.

De plus, l'expérience valide la relation de de Broglie : $\lambda = \frac{h}{p}$.

En effet, la figure de diffraction est identique lorsqu'elle est obtenue pour un même cristal :

- avec des rayons X de longueur d'onde dans le vide λ ;
- avec des électrons dont la longueur d'onde associée calculée avec la relation de de Broglie est égale à la même valeur λ .

2. Exploiter les informations et conclure

a. Le phénomène de diffraction se produisant lorsque la longueur d'onde de l'onde est de l'ordre de 10^{-10} m, les rayons X dont les longueurs d'onde dans le vide sont comprises entre 10^{-11} m et 10^{-8} m sont adaptés.

b. La longueur d'onde associée à une particule matérielle est donnée par la relation :

$$\lambda = \frac{h}{p} ; \text{ avec } p = mv \text{ et } \mathcal{E}_c = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \frac{p^2}{m} \text{ soit } p = \sqrt{2m\mathcal{E}_c}$$

La longueur d'onde de Broglie est :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m\mathcal{E}_c}}$$

Les unités à employer sont les unités SI : l'énergie doit être en joule.

$$\mathcal{E}_c = 100 \times 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 9,11 \times 10^{-31} \times 100 \times 1,60 \times 10^{-19}}}$$

$$\lambda = 1,23 \times 10^{-10} \text{ m}$$

La longueur d'onde associée à ces électrons est de l'ordre de 10^{-10} m, ils peuvent donner lieu au phénomène de diffraction par un cristal.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 20. Dualité onde-particule

c. Le calcul de λ est à effectuer pour les neutrons :

$$\lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 1,67 \times 10^{-27} \times 0,05 \times 1,60 \times 10^{-19}}}$$

$$\lambda = 1,28 \times 10^{-10} \text{ m}$$

donc :

$$\lambda = 1 \times 10^{-10} \text{ m avec un seul chiffre significatif}$$

La longueur d'onde associée à ces neutrons est de l'ordre de 10^{-10} m, ils peuvent donner lieu au phénomène de diffraction par un cristal.

Activité documentaire 3. La dualité onde-particule

Commentaires

L'objectif de l'activité est de mettre en évidence la complémentarité des deux aspects de la lumière et d'introduire une interprétation probabiliste du phénomène d'interférence.

Pour aborder la dualité onde-particule, le choix s'est porté sur la description d'une expérience d'interférence réalisée par une équipe de scientifiques français, expérience dont la particularité est d'utiliser une source de lumière délivrant des photons un par un. Le principe de cette source est développée dans le document proposé en exercice 15 page 411.

L'observation vidéo de la réalisation progressive des interférences est disponible.

Pour compléter la description et l'exploitation de cette expérience, on peut:

- consulter des articles tel que celui publié en 2005 dans *The European Physical Journal* intitulé « Single-photon wavefront-splitting interference » dont les auteurs sont J.-F. Roch, V. Jacques, E. Wu, T. Toury, F. Treussart du laboratoire de Photonique Quantique et Moléculaire de l'ENS Cachan et A. Aspect, P. Grangier du laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique d'Orsay ;
- visionner une partie de la conférence donnée par le physicien Philippe Grangier sur le thème de la physique quantique :

<http://www.canal->

[u.tv/video/universite_de_tous_les_savoirs/la_physique_quantique_philippe_grangier.1434](http://www.canal-u.tv/video/universite_de_tous_les_savoirs/la_physique_quantique_philippe_grangier.1434)

Réponses

1. Analyser les documents

a. La source émet les photons un par un.

b. Le photon se montre sous son aspect particulaire lorsqu'il arrive sur le détecteur, chaque impact se traduisant par un point.

Le photon se montre sous son aspect ondulatoire lorsque le motif des franges d'interférence apparaît.

2. Exploiter les informations

a. Les photons étant émis un par un, deux photons ne peuvent pas interférer. La formation des franges d'interférence ne s'explique pas par une interaction entre deux photons.

b. Une frange brillante correspond à une probabilité de présence maximale des photons, alors que les franges sombres correspondent à une probabilité de présence minimale.

c. À la date $t = 10$ s, la position des impacts semble aléatoire car le nombre de photons reçus n'est pas suffisant. Le nombre de photons doit être important pour que la loi de probabilité se manifeste et que le motif caractéristique des interférences apparaisse.

3. Conclure

On ne peut pas dissocier l'aspect ondulatoire et l'aspect particulaire d'un photon : le photon est un objet quantique qui manifeste l'un ou l'autre de ses aspects selon les conditions d'observation.

Il ne peut être décrit que par la mécanique quantique qui lui associe une fonction d'onde permettant de calculer sa probabilité de présence en un endroit donné.

Activité documentaire 4. Microscopes optique et électronique

Commentaires

La première partie de l'activité définit la résolution d'un microscope et sa limite de résolution. Le lien entre la valeur de la longueur d'onde de l'onde utilisée et cette limite conduit à envisager l'utilisation d'ondes autres que les ondes électromagnétiques.

Le microscope électronique qui utilise une onde de matière est alors introduit montrant la similitude entre ondes électromagnétiques et ondes de matière.

La dernière question invite à une recherche documentaire portant sur la découverte d'autres types de microscope.

Réponses

1. Analyser les documents

a. Le phénomène de diffraction limite la résolution d'un microscope. La limite de résolution est proportionnelle à la longueur d'onde de l'onde utilisée.

b. Comme toutes particules matérielles, les électrons peuvent avoir un comportement ondulatoire.

c. La longueur d'onde de l'onde associée à des électrons peut être plus petite que celle de la lumière ; la limite de résolution est alors plus petite.

2. Pour aller plus loin

a. Le canon à électrons fournit un faisceau d'électrons monocinétiques ; il comporte différentes électrodes qui accélèrent (par champ électrique) et focalisent les électrons émis par un filament de tungstène chauffé ou une pointe métallique portée à une tension négative élevée.

Les lentilles électromagnétiques contrôlent le faisceau d'électrons et le font converger sur un plan particulier par rapport à l'échantillon.

Ce mode est similaire à la façon dont un microscope optique utilise des lentilles en verre pour faire converger la lumière sur ou au travers de l'échantillon pour former une image.

L'ensemble est dans le vide pour éviter les interactions entre les électrons du faisceau et les molécules de l'air.

b. Les microscopes à sonde locale utilisent les interactions qui se produisent entre l'échantillon étudié et une pointe très fine qui se déplace au-dessus de l'échantillon. Ils permettent de visualiser la topographie de la surface d'un échantillon à l'échelle de l'atome. Il existe plusieurs types de microscopes à sonde locale comme :

- le microscope à force atomique (AFM) qui utilise la force de répulsion entre d'une part les nuages électroniques des atomes de la surface de l'échantillon et d'autre part le nuage électronique des atomes de la pointe ;

- le microscope à effet tunnel qui mesure l'intensité d'un courant résultant du passage d'électrons entre la pointe et la surface d'un échantillon conducteur ; la pointe métallique étant déplacée à une distance suffisamment faible de l'échantillon, les électrons peuvent passer par effet tunnel de l'échantillon à la pointe.

Exercices d'application

5 minutes chrono !

1. Mots manquants

- photons
- $h\nu$; constante de Planck
- ondulatoire ; particulaire
- particulaire
- la quantité de mouvement
- un faisceau d'électrons
- ondulatoire
- une onde ; une particule
- probabilité

2. QCM

- a. $p_r < p_v$. La quantité de mouvement p d'un photon de longueur d'onde λ est :

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

La longueur d'onde d'un photon de lumière rouge est supérieure à celle d'un photon de lumière violette : $\lambda_r > \lambda_v$ donc $\frac{h}{\lambda_r} < \frac{h}{\lambda_v}$ soit $p_r < p_v$.

b. $\lambda = \frac{h}{p}$

- c. La même vitesse. En effet, $\lambda = \frac{h}{p}$ et $p = mv$ donc :

$$\frac{\lambda_p}{\lambda_\alpha} = \frac{m_\alpha}{m_p} \times \frac{v_\alpha}{v_p} = 4 \frac{v_\alpha}{v_p}$$

$$\text{si } v_\alpha = v_p, \frac{\lambda_p}{\lambda_\alpha} = 4$$

- d. le système {photon ; électron}. L'effet Compton s'interprète comme un choc entre deux particules : au cours du choc, seule la quantité de mouvement du système {photon ; électron} se conserve.
- e. virtuelle
-

Compétences exigibles

3. Einstein postule que la lumière est formé de quanta d'énergie.

Il leur attribue une énergie $\mathcal{E} = h\nu$ et une quantité de mouvement $p = \frac{h\nu}{c}$.

4. a. L'énergie du photon étant $\mathcal{E} = h\nu$, la fréquence est :

$$\nu = \frac{\mathcal{E}}{h}$$

A.N. :
$$\nu = \frac{2,0 \times 10^{-15}}{6,63 \times 10^{-34}} = 3,0 \times 10^{18} \text{ Hz}$$

La longueur d'onde est :

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

A.N. :
$$\lambda = \frac{3,00 \times 10^8}{3,0 \times 10^{18}} = 1,0 \times 10^{-10} \text{ m} = 0,10 \text{ nm}$$

Ce photon n'appartient pas au domaine du visible (400 à 800 nm).

b. La quantité de mouvement est donnée par la relation :

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{\mathcal{E}}{c}$$

A.N. :
$$p = \frac{2,0 \times 10^{-15}}{3,00 \times 10^8} = 6,7 \times 10^{-24} \text{ J}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$$

5. a. Longueur d'onde dans le vide :

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

A.N. :
$$\lambda = \frac{3,00 \times 10^8}{2,4 \times 10^9} = 1,25 \times 10^{-1} \text{ m arrondi à } 0,13 \text{ m}$$

Énergie des photons :

$$\mathcal{E} = h\nu$$

A.N. :
$$\mathcal{E} = 6,63 \times 10^{-34} \times 2,4 \times 10^9 = 1,6 \times 10^{-24} \text{ J}$$

$$\mathcal{E} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 2,4 \times 10^9}{1,60 \times 10^{-19}} = 9,95 \times 10^{-6} \text{ eV}$$

b. Pour un photon de longueur d'onde $\lambda = 600 \text{ nm}$, son énergie est donnée par la relation :

$$\mathcal{E} = \frac{h\nu}{\lambda}$$

$$\mathcal{E} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{600 \times 10^{-9} \times 1,60 \times 10^{-19}}$$

$$\mathcal{E} = 2,1 \text{ eV}$$

L'énergie d'un photon visible est beaucoup plus grande que celle d'un photon utilisé en Wi-Fi.

6. a. Les rayons X sont des ondes électromagnétiques comme la lumière visible ; leurs longueurs d'onde sont plus petites que les longueurs d'onde de la lumière visible et des rayons ultraviolets.

b. Les particules mises en jeu sont d'une part un photon et d'autre part un électron de la cible.

c. Les rayons X se comportent comme des particules ayant une énergie et une quantité de mouvement

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 20. Dualité onde-particule

7. Une particule matérielle, par exemple un électron, présente des propriétés apparemment inconciliables. Il serait à première vue incongru d'affirmer qu'un électron a à la fois les propriétés d'une particule et celles d'une onde.

Et pourtant, lors d'une expérience d'interférence, c'est ce que fait un électron : l'impact d'un électron est localisé sur un écran et confirme son caractère particulaire mais, l'impact d'un grand nombre d'électrons sur ce même écran fait apparaître la figure d'interférence, confirmant son caractère ondulatoire.

8. a. Pour l'électron, la longueur d'onde est :

$$\frac{h}{p_e} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{9,11 \times 10^{-31} \times 3,00 \times 10^5} = 2,43 \times 10^{-9} \text{ m}$$

Pour le proton, la longueur d'onde est :

$$\frac{h}{p_p} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{1,67 \times 10^{-27} \times 1,64 \times 10^3} = 2,42 \times 10^{-10} \text{ m}$$

Dans le manuel élève, au dénominateur de cette dernière application numérique : $1,67 \times 10^{-27}$ remplace $9,11 \times 10^{-31}$ (mis par erreur dans le spécimen, mais la réponse donnée était correcte).

b. Pour des ondes électromagnétiques, les longueurs d'onde correspondent au domaine des rayons X.

9. - Le caractère ondulatoire de la matière est significatif lorsqu'un faisceau d'électrons donne une figure de diffraction quand il est envoyé sur un cristal (expérience réalisée par Davisson et Germer en 1927). La diffraction par un cristal est observée avec d'autres particules matérielles : neutrons, atomes, molécules. On peut citer également l'obtention d'interférence avec des électrons, des atomes...

- L'effet photoélectrique est en exemple de cas qui ne s'interprète pas avec le modèle ondulatoire de la lumière ; lorsqu'un faisceau lumineux frappe un métal, des électrons sont émis par ce métal mais il existe un seuil en fréquence caractéristique de ce métal. Le modèle particulaire explique que l'énergie du photon ($\mathcal{E} = h\nu$) doit être supérieure à une énergie seuil ($\mathcal{E}_0 = h\nu_0$), soit $\nu \geq \nu_0$. On peut citer également l'expérience de Compton.

10. a. À la date $t = 10$ s, la position de l'impact d'un photon semble aléatoire

b. À la date $t = 500$ s, la figure qui apparaît est celle des interférences : des franges apparaissent.

c. Les zones les plus claires correspondent à une probabilité de présence maximale des photons alors que les plus sombres correspondent à une probabilité de présence minimale.

d. Dans cette expérience, le caractère ondulatoire des photons se manifeste lorsqu'ils sont en nombre suffisant, ce qui est réalisé à la date $t = 500$ s.

Compétences générales

11. Par définition : $p = mv$ et $\mathcal{E}_c = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \frac{p^2}{m}$ soit $p = \sqrt{2m\mathcal{E}_c}$.

La longueur d'onde associée est :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m\mathcal{E}_c}}$$

A.N. :

$$\lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 50 \times 1,66 \times 10^{-27} \times 5,0 \times 10^{-2} \times 1,60 \times 10^{-19}}}$$

$$\lambda = 1,8 \times 10^{-11} \text{ m}$$

12. $\lambda = \frac{h}{p}$. De la relation de de Broglie, on déduit :

$$\dim h = \dim(\text{énergie}) \times \text{T}$$

D'après la définition de l'énergie cinétique $\mathcal{E} = \frac{1}{2} mv^2$:

$$\dim(mc) = \dim\left(\frac{\frac{1}{2} mc^2}{c}\right)$$

$$\dim(mc) = \dim(p) = \frac{\dim(\text{énergie})}{\text{L} \times \text{T}^{-1}}$$

Donc :

$$\dim\left(\frac{h}{p}\right) = \frac{\dim(\text{énergie}) \times \text{T} \times \text{L} \times \text{T}^{-1}}{\dim(\text{énergie})} = \text{L}$$

Le rapport $\frac{h}{p}$ a la dimension d'une longueur.

13. a. Le point de coordonnées ($\mathcal{E} = 100 \text{ keV}$, $Z = 50$) est dans le domaine de l'effet photoélectrique : on observe l'effet photoélectrique lorsque les photons d'énergie 100 keV interagissent avec cette cible.

Le point de coordonnées ($\mathcal{E} = 1 \text{ MeV}$, $Z = 50$) est dans le domaine de l'effet Compton : on observe l'effet Compton lorsque les photons d'énergie 1 MeV interagissent avec cette cible.

b. Il existe un point d'abscisse 500 keV situé sur la ligne d'équiprobabilité des deux effets. Il est donc possible d'obtenir avec la même probabilité l'effet Compton et l'effet photoélectrique avec des photons d'énergie 500 keV. L'ordonnée du point est $Z = 40$ (échelle peu précise).

Les deux effets peuvent être obtenus simultanément pour une cible de numéro atomique $Z = 40$.

c. La troisième interaction est l'effet de matérialisation. Elle intervient avec des photons très énergétiques (un photon donne alors un électron et un positon).

Exercices de méthode

14. Exercice résolu.

15. a. Un centre NV est un défaut de la maille cristalline du diamant dû à la présence d'un atome d'azote (N) à côté d'un emplacement vacant (V).

Ces centres NV sont bien séparés spatialement. Dans un nanocristal de diamant, on peut isoler un centre NV.

b. Une impulsion laser, ultra brève, est envoyée sur un centre NV qui est alors excité. Lorsque qu'il se désexcite, il émet un photon.

c. Le dispositif de filtrage laisse passer les photons de longueur d'onde 690 nm (rouge) et arrêtent les photons qui excitent les centres NV.

d. La source est dite « source de photon unique » car elle fournit un seul photon par impulsion laser : un seul centre présent dans un nanocristal est excité et un photon unique est alors émis. Le nom « source de photon unique » est un peu ambigu car en réalité des millions de photons sont émis, mais un par un, jamais deux ou plus ensemble, ce qui justifie le terme « photon unique ».

e. Deux fentes fines et parallèles sont éclairées par une source de lumière ; les deux fentes jouent le rôle de deux sources cohérentes. Le phénomène d'interférence apparaît dans la zone de recouvrement des deux faisceaux et des franges d'interférence apparaissent sur un écran placé dans cette zone. Les photons se comportent comme des particules localisées spatialement lorsqu'ils arrivent sur l'écran. Ils montrent un comportement ondulatoire en formant peu à peu la figure d'interférence.

16. a. La longueur d'onde associée à une particule matérielle est donnée par la relation :

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

h est la constante de Planck et p la quantité de mouvement de la particule de masse m animée de la vitesse v .

$$p = mv \text{ et } \mathcal{E}_c = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \frac{p^2}{m} \text{ soit } p = \sqrt{2m\mathcal{E}_c}$$

Soit :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m\mathcal{E}_c}}$$

b. Les unités à employer sont les unités SI : l'énergie doit être en joule.

$$\mathcal{E}_c = 5,0 \times 10^{-2} \times 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 1,67 \times 10^{-27} \times 5,0 \times 10^{-2} \times 1,60 \times 10^{-19}}}$$

$$\lambda = 1,3 \times 10^{-10} \text{ m} = 0,13 \text{ nm}$$

$$\text{c. } \lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e \mathcal{E}_{ce}}} = \frac{h}{\sqrt{2m_n \mathcal{E}_{cn}}} \text{ d'où } \mathcal{E}_{ce} = \frac{m_n}{m_e} \mathcal{E}_{cn}$$

$$\text{A.N. : } \mathcal{E}_{ce} = \frac{1,67 \times 10^{-27}}{9,11 \times 10^{-31}} \times 5,0 \times 10^{-2} = 92 \text{ eV}$$

Exercices d'entraînement

17. a. L'énergie d'un photon est donnée par la relation :

$$\mathcal{E} = h\nu \text{ avec } \nu = \frac{c}{\lambda} \text{ soit } \mathcal{E} = \frac{hc}{\lambda}$$

On en déduit que la longueur d'onde dans le vide est :

$$\lambda = \frac{hc}{\mathcal{E}}$$

La longueur d'onde seuil du tungstène, notée λ_0 , est celle d'un photon d'énergie :

$$\mathcal{E}_0 = 4,49 \text{ eV}$$

A.N. : l'énergie est à exprimer en joule

$$\lambda_0 = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{4,49 \times 1,60 \times 10^{-19}} = 2,77 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$\lambda_0 = 277 \text{ nm}$$

b. D'après le texte, le photon doit apporter une énergie supérieure au travail d'extraction :

$$\mathcal{E} \geq \mathcal{E}_0$$

$$\frac{hc}{\lambda} \geq \frac{hc}{\lambda_0} \text{ donc } \lambda \leq \lambda_0$$

La longueur d'onde doit être inférieure à la longueur d'onde seuil.

18. a. "Work function" est l'énergie minimale que l'on doit fournir pour extraire un électron du métal : c'est le travail d'extraction.

b. La lumière est décrite sous son aspect particulière : le photon.

c. Pour qu'il y ait effet photoélectrique, l'énergie du photon doit être supérieure ou égale au travail d'extraction du matériau :

$$\mathcal{E} = h\nu \geq \text{« work function »}$$

A.N. :

$$\mathcal{E} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 1,1 \times 10^{15}}{1,60 \times 10^{-19}} = 4,56 \text{ eV}$$

Deux valeurs du tableau sont inférieures à 4,56 eV. Elles correspondent aux deux métaux que l'on peut choisir : le baryum (Ba) et l'aluminium (Al).

19. Le phénomène de diffraction fait intervenir le rapport $\frac{\lambda}{a}$, a étant la taille de l'obstacle ou de l'ouverture.

La longueur d'onde associée à un grain de sable est donné par la relation de de Broglie :

$$\lambda = \frac{h}{p} \text{ avec } p = mv$$

A.N. : pour un grain de sable de masse $m = 1 \text{ mg}$ et de vitesse $v = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,

$$\lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{1 \times 10^{-6}} = 7 \times 10^{-28} \text{ m}$$

En supposant $a \leq 100\lambda$ pour avoir diffraction, $a \leq 6 \times 10^{-26} \text{ m}$ soit un ordre de grandeur de 10^{-25} m . Il n'existe pas « d'objet » de cette dimension permettant de mettre en évidence par diffraction le caractère ondulatoire d'un grain de sable.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 20. Dualité onde-particule

20. a. $\dim h = \dim (\text{énergie}) \times T = \dim (\text{force}) \times L \times T = M \times L \times T^{-2} \times L \times T$
 $\dim h = M \times L^2 \times T^{-1}$
 $\dim mc = M \times L \times T^{-1}$
 $\dim \frac{h}{m_e c} = \frac{M \times L^2 \times T^{-1}}{M \times L \times T^{-1}} = L$

A.N. : $\lambda_{\text{Compton}} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{9,11 \times 10^{-31} \times 3,00 \times 10^8} = 2,43 \times 10^{-12} \text{ m}.$

b. D'une part, la lumière visible correspond à des longueurs d'onde dans le vide comprises entre 400 nm et 800 nm, soit un ordre de grandeur de 10^{-6} m.

D'autre part, la relation donnant $\Delta\lambda$ montre que l'ordre de grandeur de $\Delta\lambda$ est de 10^{-12} m (maximum égal à λ_{Compton} pour $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$).

L'écart entre les deux ordres de grandeur est très important et la variation de longueur d'onde sera difficile à mettre en évidence.

L'expérience ne sera pas pertinente en lumière visible, elle le sera avec des rayons X dont les longueurs d'onde sont plus faibles que celles de la lumière visible.

21. a. Le « comportement ondulatoire » d'une particule de matière est mis en évidence par des expériences caractéristiques des ondes : la diffraction ou les interférences.

b. La masse d'une molécule est calculée à partir de sa masse molaire et de la constante d'Avogadro N_A :

$$m = \frac{M(C_{60})}{N_A} = \frac{60 M(C)}{N_A}$$

Des relations $\lambda = \frac{h}{p}$ et $p = mv$, on en déduit la vitesse v des molécules :

$$v = \frac{h}{m\lambda} = \frac{h}{\lambda} \times \frac{N_A}{M} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 6,02 \times 10^{23}}{60 \times 12 \times 10^{-3} \times 2,5 \times 10^{-12}} = 222 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

22. a. Deux fentes fines et parallèles sont éclairées par une source de lumière ; les deux fentes jouent le rôle de deux sources cohérentes. Le phénomène d'interférence apparaît dans la zone de recouvrement des deux faisceaux et des franges d'interférence apparaissent sur un écran placé dans cette zone.

b. Dans cette expérience, la source de lumière est particulière puisqu'elle émet des photons un par un à intervalles réguliers. Les photons se comportent comme des particules localisées spatialement lorsqu'ils arrivent sur l'écran. Ils montrent un comportement ondulatoire en formant peu à peu la figure d'interférence. Dans cette expérience d'interférence, on ne peut pas prévoir la position de l'impact d'un photon sur l'écran mais lorsque leur nombre est important, ils respectent une loi de probabilité et forment le motif caractéristique des franges d'interférence ; les franges s'interprètent comme une alternance de zones où le photon a une probabilité de présence minimale ou maximale.

c. Il n'est pas possible de déterminer par quelle fente passe un photon ; toute tentative détruit la figure d'interférence ; la source fournissant des photons un par un, chaque photon semble être passé simultanément par les deux fentes ce qui n'est pas envisageable pour une particule indivisible.

23. - K n'est pas éclairée : l'intensité $I = 0$; entre A et K, il n'y a pas de contact électrique.

- K est éclairée : l'intensité n'est pas nulle lorsque la longueur d'onde est inférieure à une certaine valeur.

L'interprétation se fait avec le modèle particulaire de la lumière : les photons apportent de l'énergie pour extraire les électrons de la cathode, leur énergie doit être supérieure ou égale à une valeur caractéristique du matériau de la cathode.

L'énergie d'un photon est :

$$\mathcal{E} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$\mathcal{E} \geq \mathcal{E}_0$$

soit :

$$\frac{hc}{\lambda} \geq \frac{hc}{\lambda_0}$$

donc :

$$\lambda \leq \lambda_0$$

- K est éclairée, l'intensité I augmente.

Lorsque l'on augmente l'intensité lumineuse, le nombre de photons reçus par la cathode augmente, le nombre d'électrons émis augmente et l'intensité électrique I augmente.

b. À l'aide de l'animation, la longueur d'onde maximale donnant naissance à l'effet photoélectrique est d'environ 580 nm.

24. a. La mélasse optique refroidit et immobilise les atomes.

b. $\lambda_{\text{Ne}} = 15 \text{ nm}$.

$$\lambda = \frac{h}{p} \text{ et } p = mv \text{ d'où } v = \frac{h}{m\lambda} = \frac{h}{\lambda} \times \frac{N_A}{M}$$

A.N. :

$$v = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 6,02 \times 10^{23}}{20 \times 10^{-3} \times 15 \times 10^{-9}} = 1,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

c. De $i = \frac{\lambda D}{a}$, on déduit :

$$\lambda = \frac{ai}{D}$$

A.N. :

$$\lambda = \frac{6 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^{-3}}{0,85} = 1,4 \times 10^{-8} \text{ m} = 14 \text{ nm}$$

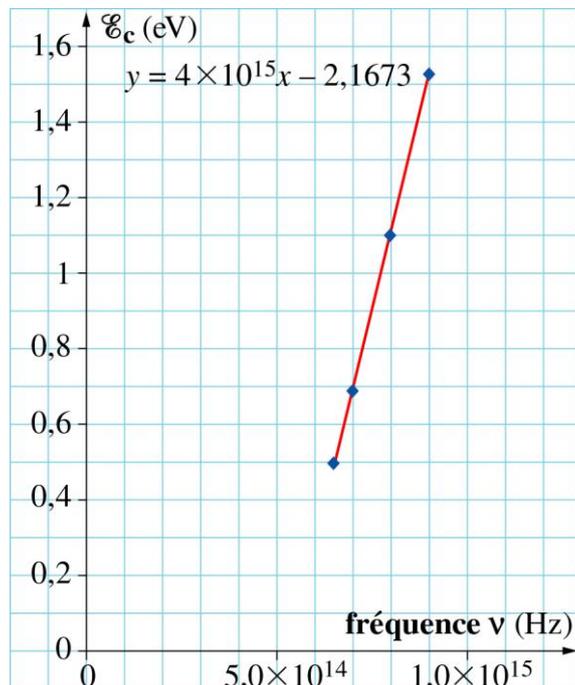
La valeur est comparable à la valeur $\lambda_{\text{Ne}} = 15 \text{ nm}$.

d. L'aspect particulaire des atomes se manifeste par l'impact localisé sur l'écran. L'aspect ondulatoire se manifeste par la répartition des points d'impact sur l'écran qui forment des franges comme une onde.

La densité en un point de l'écran est proportionnelle à la probabilité qu'à un atome de se retrouver en ce point.

25. a. $\mathcal{E}_c = \mathcal{E} - \mathcal{E}_0$ soit $\mathcal{E}_c = h\nu - \mathcal{E}_0$; avec \mathcal{E}_c énergie cinétique de l'électron mis ; \mathcal{E} énergie du photon incident de fréquence ν et \mathcal{E}_0 travail d'extraction.

b.



c. La représentation de \mathcal{E}_c en fonction de la fréquence ν est une droite d'équation $y = ax + b$. L'équation établie en **a.** peut s'écrire : $y = hx + \mathcal{E}_0$.

En posant $y = \mathcal{E}_c$ et $x = \nu$. Le résultat est conforme à la relation d'Einstein.

d. La fréquence seuil correspond à $\mathcal{E}_c = 0$. La lecture graphique donne : $\nu_0 = 5,4 \times 10^{14}$ Hz.

La longueur d'onde seuil dans le vide est donnée par :

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} = \frac{3,00 \times 10^8}{5,4 \times 10^{14}} = 0,56 \times 10^{-6} \text{ m}$$

Le travail d'extraction \mathcal{E}_0 est obtenu graphiquement :

$$y = \mathcal{E}_0 \text{ pour } x = 0 : \mathcal{E}_0 = 2,2 \text{ eV}$$

Le coefficient directeur de la droite est gal à la valeur de la constante de Planck, h exprimé en joule \times seconde :

$$h = 4,0 \times 10^{-15} \times 1,60 \times 10^{-19} = 6,4 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

La valeur admise est de $6,63 \times 10^{-34}$ J \cdot s.

e. La représentation pour le zinc de \mathcal{E}_c en fonction de la fréquence ν est une droite parallèle à la précédente (même coefficient directeur h) ; elle coupe l'axe des x à l'abscisse :

$$x = \nu_0 = 8,1 \times 10^{14} \text{ Hz, fréquence seuil de ce métal}$$

26. 1. De la relation $2d \sin\theta = n\lambda$, on déduit :

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta}$$

A.N. : pour $\theta_1 = 13,5^\circ$, $n = 1$,

$$d = \frac{0,10}{2 \sin 13,5} = 0,21 \text{ nm}$$

2. a. Par définition, $p = mv$ et $\mathcal{E}_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \frac{p^2}{m}$ soit :

$$p = \sqrt{2m\mathcal{E}_c}$$

A.N. :

$$p_1 = \sqrt{2 \times 9,11 \times 10^{-31} \times 151 \times 1,60 \times 10^{-19}}$$

$$p_1 = 6,63 \times 10^{-24} \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$p_2 = 13,2 \times 10^{-24} \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$p_3 = 19,9 \times 10^{-24} \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

b. Pour $n = 1$, $\lambda_1 = 2d \sin\theta = 0,10 \text{ nm}$.

$$\text{Pour } n = 2, \lambda_2 = \frac{2d \sin \theta}{2} = \frac{\lambda_1}{2}$$

$$\text{Pour } n = 3, \lambda_2 = \frac{2d \sin \theta}{3} = \frac{\lambda_1}{3}$$

c. D'après la relation de Louis de Broglie, $\lambda = \frac{h}{p}$ soit $\lambda \times p = h$.

$$\lambda_1 \times p_1 = 6,63 \times 10^{-34} \text{ SI}$$

$$\lambda_2 \times p_2 = 6,62 \times 10^{-34} \text{ SI}$$

$$\lambda_3 \times p_3 = 6,63 \times 10^{-34} \text{ SI}$$

Le produit $\lambda \times p$ est quasiment constant et égal à la valeur de la constante de Planck ; il y a accord avec la relation de de Broglie.

Exercices de synthèse

27. a. La longueur d'onde associée à une particule matérielle est donnée par la relation : $\lambda = \frac{h}{p}$.

h est la constante de Planck et p la quantité de mouvement de la particule de masse m animée de la vitesse v .

b. $p = mv$ et $\mathcal{E}_c = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \frac{p^2}{m}$ soit $p = \sqrt{2m\mathcal{E}_c}$ soit :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m\mathcal{E}_c}}$$

c. Les unités à employer sont les unités SI : l'énergie doit être en joule.

$$\mathcal{E}_c = 60 \times 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 9,11 \times 10^{-31} \times 60 \times 1,60 \times 10^{-19}}}$$

$$\lambda = 1,6 \times 10^{-10} \text{ m} = 0,16 \text{ nm}$$

d. La longueur d'onde dans le vide des rayons X de fréquence $\nu = 1,90 \times 10^{18} \text{ Hz}$ est :

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3,00 \times 10^8}{1,90 \times 10^{18}} = 1,60 \times 10^{-10} \text{ m} = 0,160 \text{ nm}$$

e. La diffraction est un phénomène caractéristique d'une onde ; la diffraction du faisceau d'électrons confirme que l'on peut associer une onde à une particule matérielle.

De plus, la figure de diffraction est identique lorsqu'elle est obtenue :

- avec des rayons X de longueur d'onde 0,160 nm ;
- avec des électrons dont la longueur d'onde associée calculée avec la relation de de Broglie est égale à 0,160 nm, validant ainsi cette relation.

28. a. Les neutrons libres n'appartiennent pas à un noyau. Ils n'existent pas dans la nature car leur durée de vie est courte.

b. ${}_0^1\text{n} \rightarrow {}_1^1\text{p} + {}_{-1}^0\text{e} + {}_0^0\bar{\nu}_e$.

c. La fission est une réaction nucléaire au cours de laquelle un noyau lourd dit fissile, est scindé en deux sous l'impact d'un neutron.

d. Les atomes d'hydrogène de la molécule d'eau lourde sont des isotopes de l'hydrogène ${}_1^1\text{H}$.
La formule de cet isotope est ${}_1^2\text{H}$.

Les neutrons sont ralentis par choc. Au cours des collisions avec les molécules d'eau lourde, ils transfèrent une partie de leur énergie cinétique à la cible (molécule d'eau).

e. D'après la relation de Louis de Broglie, $\lambda = \frac{h}{p}$ avec $p = mv$; plus la vitesse est grande plus

la longueur d'onde est petite. Pour avoir une longueur d'onde adaptée à la diffraction, il faut diminuer la valeur de v .

f. La diffraction par les neutrons permet de déterminer les positions des noyaux atomiques dans un cristal.

$$g. \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m\mathcal{E}_c}}$$

$$\mathcal{E}_c = 100 \times 10^{-3} \times 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 1,67 \times 10^{-27} \times 100 \times 10^{-3} \times 1,60 \times 10^{-19}}}$$

$$\lambda = 9,07 \times 10^{-11} \text{ m}$$

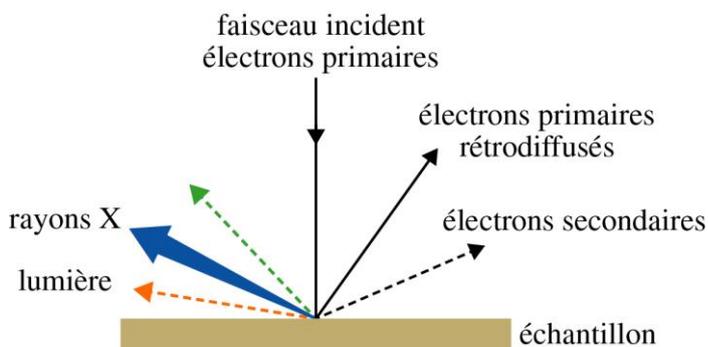
Ces neutrons sont adaptés à l'étude par diffraction d'un cristal dans lequel l'ordre de grandeur des distances interatomiques est de 10^{-10} m.

29. Proposition de synthèse de documents

Un microscope est un instrument qui donne une image agrandie d'un objet pour permettre l'observation de détails non visibles à l'œil nu.

Le microscope électronique utilise non pas un faisceau lumineux comme un microscope optique mais un faisceau d'électrons dont la longueur d'onde de l'onde associée est inférieure aux longueurs d'onde des ondes lumineuses. La limite de résolution qui est proportionnelle à la longueur d'onde est ainsi améliorée : on peut distinguer des détails distants de 200 nm avec un microscope optique alors que des détails distants de 0,4 nm peuvent être distingués avec un microscope électronique à balayage (MEB).

Microscope optique et microscope électronique donnent des images de nature différente ; le microscope optique donne une image plane et agrandie de l'objet, le microscope électronique fournit des images reconstituées point par point à partir des informations fournies par différents détecteurs.



Lors de l'interaction entre le faisceau d'électrons et l'échantillon dans un microscope électronique, on étudie essentiellement :

- les électrons secondaires, électrons arrachés à l'échantillon ;
- les électrons rétrodiffusés, électrons primaires qui pénètrent dans l'échantillon puis en ressortent ;
- les photons X produits par désexcitation des atomes.

L'analyse des électrons secondaires fournit une image en relief de la surface de l'échantillon alors que celle des électrons rétrodiffusés renseigne sur la composition chimique de l'échantillon. Le détecteur de rayons X complète l'analyse chimique en identifiant les différents éléments chimiques.

Ainsi, le microscope électronique à balayage réalise des images en relief de la surface des matériaux solides avec une très haute résolution de l'ordre du nanomètre et analyse leur composition. Citons quelques exemples de son utilisation :

- étude des microstructures de matériaux en sciences des matériaux ;
- observation et analyse des minéraux en géologie ;
- observation des microorganismes comme des bactéries ou des virus en biologie ;
- observation des composants en microélectronique et en nanotechnologie.

Thème 2 – Exercices de fin de thème

Manuel pages 416 à 421

Ces exercices concernent les chapitres 8 à 20 du manuel.

1. 1. a. La lumière met 4,5 années pour accomplir le trajet.

À la vitesse $\frac{c}{2}$, le vaisseau mettrait le double soit $\Delta t = 9,0$ années.

b. Dans le référentiel du vaisseau, la durée du trajet est sa durée propre :

$$\Delta t_{\text{propre}} = \frac{\Delta t}{\gamma} = 7,8 \text{ années}$$

2. a. Les deux référentiels sont galiléens. D'après les postulats de la relativité restreinte, la vitesse de propagation des signaux électromagnétiques est c dans les deux référentiels.

b. Pour l'observateur terrestre, les deux signaux doivent parcourir la distance Terre-étoile à la vitesse c . La durée totale écoulée est donc de 9,0 années.

c. Chacun des récepteurs s'éloigne de la source, ce qui provoque une diminution de la fréquence apparente. Les récepteurs doivent être accordés sur une fréquence inférieure à f .

3. a. L'énergie cinétique tend vers l'infini. c est une vitesse limite qui ne peut pas être atteinte par un objet de masse non nulle.

b. On trouve $\mathcal{E}_c = 1,4 \times 10^{20}$ J.

c. Cette énergie est du même ordre de grandeur que la production mondiale actuelle d'énergie en une année. Il est impossible de fournir une telle énergie à un engin.

2. 1. a. Les forces de frottements sont négligées lors du mouvement d'un satellite en orbite.

b. Pour appliquer la loi d'interaction gravitationnelle donnant cette expression, la Terre est supposée être à répartition sphérique de masse et le satellite ponctuel donc de petite taille par rapport à la distance : centre de la Terre – satellite.

c. Le référentiel dans lequel le mouvement du satellite est animé d'un mouvement circulaire est le référentiel géocentrique considéré comme galiléen.

d. D'après la loi d'interaction gravitationnelle :

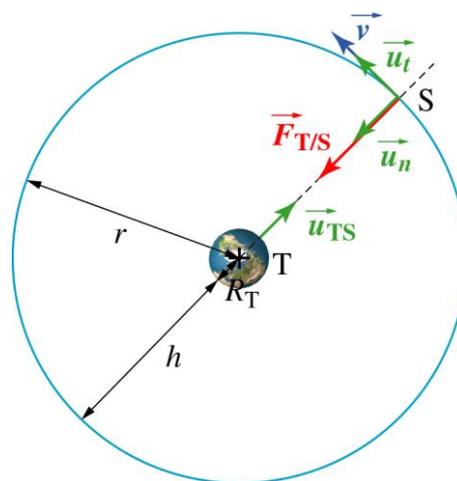
$$\vec{F}_{T/S} = +G \frac{mM_T}{r^2} \vec{u}_n \text{ avec } \vec{u}_n \text{ vecteur unitaire de la base de}$$

Frenet (voir la figure ci-contre).

Le signe « + » met en évidence que $\vec{F}_{T/S}$ et \vec{u}_n sont de même sens.

En considérant que m est constante, l'application de deuxième loi de Newton donne la relation :

$$\vec{F}_{T/S} = m \cdot \vec{a}_S \text{ soit } \vec{a}_S = G \frac{M_T}{r^2} \vec{u}_n \text{ soit } \vec{a}_S = G \frac{M_T}{(R_T + h)^2} \vec{u}_n$$



Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Thème 2. Exercices de fin de thème

Dans le repère de Frenet (S, \vec{u}_t , \vec{u}_n), on peut ainsi écrire :

$$\vec{a} \begin{vmatrix} 0 \\ G \frac{M_T}{r^2} \end{vmatrix} \quad \text{et} \quad \vec{a} \begin{vmatrix} \frac{dv_s}{dt} \\ \frac{v_s^2}{r} \end{vmatrix}$$

L'égalité des coordonnées de \vec{a} sur (S, \vec{u}_t) conduit à la relation $\frac{dv_s}{dt} = 0$ à chaque instant soit $v_s = \text{cte}$: le mouvement du satellite est uniforme.

L'égalité des coordonnées de \vec{a} sur (S, \vec{u}_n) conduit à la relation $G \frac{M_T}{r^2} = \frac{v_s^2}{r}$; soit, après

simplification : $v_s = \sqrt{\frac{GM_T}{R_T + h}}$.

2. Dans le manuel élève, « a. » a été déplacé à la place de « b. », etc. ; car dans le spécimen, a. ne correspondait pas à une question mais à l'énoncé de la partie 2. de l'exercice.

a. $\dim\left(\frac{d\mathcal{E}_p}{dr}\right) = \dim F_{T/S} \Rightarrow \frac{\dim \mathcal{E}_p}{L} = \dim ma \Rightarrow \frac{\dim \mathcal{E}_p}{L} = MLT^{-2} \Rightarrow \dim \mathcal{E}_p = ML^2T^{-2}$

\mathcal{E}_p peut donc s'exprimer en $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$.

b. \mathcal{E}_p augmente si r augmente \Leftrightarrow les expressions c et d ne peuvent pas convenir.

G s'exprime en $\text{N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-2}$ d'où :

$$\begin{aligned} \dim GMmr &= \dim (F \times L^2 \times M^{-2}) \times \dim M \times \dim m \times \dim r \\ &= MLT^{-2} \times L^2 \times M^{-2} \times M \times M \times L = ML^4T^{-2} \end{aligned}$$

$\dim GMmr \neq ML^2T^{-2} \Leftrightarrow$ l'hypothèse a ne convient pas.

$$\begin{aligned} \dim \frac{GMm}{r} &= \dim (F \times L^2 \times M^{-2}) \times \dim M \times \frac{\dim m}{\dim r} \\ &= MLT^{-2} \times L^2 \times M^{-2} \times M \times \frac{M}{L} = M^3L^2T^{-2} \end{aligned}$$

\Leftrightarrow l'hypothèse b convient.

c. $F_{T/S} = G \frac{Mm}{(R_T + h)^2} = G \frac{Mm}{r^2}$ or $\frac{d\mathcal{E}_p}{dr} = F_{T/S}$.

Par intégration : $\mathcal{E}_p = -G \frac{Mm}{r} + C$.

Or, \mathcal{E}_p tend vers 0 quand r tend vers l'infini, ce qui conduit à $C = 0$ dans l'expression précédente.

Finalement : $\mathcal{E}_p = -G \frac{Mm}{r}$.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Thème 2. Exercices de fin de thème

3. 1. a. Si l'on suppose que les concentrations $[AcOH]$ et $[AcO^-]$ dans la solution sont égales aux concentrations apportées en acide éthanoïque et en ion éthanoate, alors le pH est relié à ces concentrations par la relation :

$$pH = pK_a + \log \frac{[AcO^-]}{[AcOH]}$$

Le rapport des concentrations molaires est simplement égal au rapport des quantités de matière :

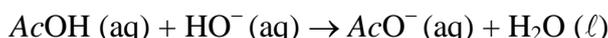
$$pH = 4,7 + \log \frac{0,150}{0,100} = 4,9$$

b. Soient n_{AcOH} et n_{AcO^-} les quantités d'acide éthanoïque et d'ion éthanoate dans la solution S , alors :

$$[AcOH] = \frac{n_{AcOH}}{V} \quad \text{et} \quad [AcO^-] = \frac{n_{AcO^-}}{V} \quad \text{d'où} \quad c = \frac{n_{AcOH}}{V} + \frac{n_{AcO^-}}{V}$$

A.N. : $c = \frac{0,100}{0,500} + \frac{0,150}{0,500} = 0,500 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

2. a. La réaction quasi-totale entre l'acide $AcOH$ et la base HO^- s'écrit :



b. En notant n_1 la quantité d'acide éthanoïque et n_2 la quantité d'hydroxyde de sodium (et donc d'ion hydroxyde) introduites initialement dans la solution, le tableau d'évolution de cette réaction est :

État	avancement	$AcOH(aq) + HO^-(aq) \rightarrow AcO^-(aq) + H_2O(l)$			
initial	0	n_1	n_2	0	excès
en cours	x	$n_1 - x$	$n_2 - x$	x	excès
final	x_f	$n_1 - x_f$	$n_2 - x_f$	x_f	excès

On souhaite que la solution obtenue dans l'état soit la solution S , d'où :

$$n_1 - x_f = n_{AcOH} \quad \text{et} \quad x_f = n_{AcO^-}$$

La réaction est quasi-totale donc le réactif limitant est entièrement consommé. Comme on souhaite qu'il reste du réactif $AcOH$, le réactif limitant doit être l'ion HO^- d'où :

$$n_2 - x_f = 0$$

On en déduit : $n_2 = n_{AcO^-}$ et $n_1 = n_{AcOH} + n_{AcO^-}$

A.N. : $n_2 = 0,150 \text{ mol}$ et $n_1 = 0,150 + 0,100 = 0,250 \text{ mol}$.

c. La masse d'hydroxyde de sodium solide à introduire en solution est $m_2 = n_2 M_2$ où M_2 est la masse molaire de l'hydroxyde de sodium.

A.N. : $m_2 = 0,150 \times 40,0 = 6,00 \text{ g}$.

La masse d'acide éthanoïque liquide à introduire en solution est $m_1 = n_1 M_1$ où M_1 est la masse molaire de l'acide éthanoïque. Le volume correspondant est $V_1 = \frac{m_1}{\rho_1}$ où ρ_1 est la masse

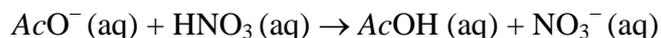
volumique de l'acide éthanoïque. D'où $V_1 = \frac{n_1 M_1}{\rho_1}$.

A.N. : $V_1 = \frac{0,250 \times 60,0}{1050} = 14,3 \text{ mL}$.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Thème 2. Exercices de fin de thème

Protocole : dans une fiole jaugée de 500 mL rincée à l'eau distillée, introduire 6,00 g d'hydroxyde de sodium solide. Ajouter un peu d'eau distillée et 14,3 mL d'acide éthanoïque (volume mesuré par exemple à la burette graduée rincée avec un peu d'acide éthanoïque ou à l'aide d'une pipette graduée de 15 ou 20 mL). Compléter jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée en agitant régulièrement.

3. a. L'acide nitrique réagit avec la base AcO^- présente dans la solution S selon la réaction quasi-totale d'équation :



b. Cette réaction est quasi-totale et la quantité d'acide nitrique est faible donc l'acide nitrique est le réactif limitant.

Le tableau d'évolution de cette réaction est :

État	avancement	$\text{AcO}^- (\text{aq}) + \text{HNO}_3 (\text{aq}) \rightarrow \text{AcOH} (\text{aq}) + \text{NO}_3^- (\text{aq})$			
initial	0	n_{AcO^-}	n	n_{AcOH}	0
en cours	x	$n_{\text{AcO}^-} - x$	$n - x$	$n_{\text{AcOH}} + x$	x
final	$x_f = n$	$n_{\text{AcO}^-} - n$	$n - x_f = 0$	$n_{\text{AcOH}} + n$	n

On déduit qu'à l'état final :

$$[\text{AcOH}] = \frac{n_{\text{AcOH}} + n}{V} \quad \text{et} \quad [\text{AcO}^-] = \frac{n_{\text{AcO}^-} - n}{V}$$

Comme en **1.a.**, on déduit l'expression du pH :

$$\text{pH} = \text{p}K_a + \log \frac{n_{\text{AcO}^-} - n}{n_{\text{AcOH}} + n}$$

c. Dans le volume V de solution préparée :

$$\text{pH} = 4,7 + \log \frac{n_{\text{AcO}^-} - n}{n_{\text{AcOH}} + n}$$

$$\text{pH} = 4,7 + \log \frac{0,150 - 0,01}{0,100 + 0,01} = 4,8$$

d. L'eau pure a initialement un pH de 7,0. Lorsque l'on introduit une quantité n d'acide fort à la solution, la réaction quasi-totale $\text{HNO}_3 (\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} (\ell) \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq}) + \text{NO}_3^- (\text{aq})$ produit une quantité n d'ions H_3O^+ . D'où $[\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{n}{V}$ et $\text{pH} = -\log\left(\frac{n}{V}\right)$.

A.N. : $\text{pH} = -\log\left(\frac{0,010}{0,500}\right) = 1,7$. La variation de pH aurait été de $1,7 - 7 = -5,3$.

Dans la solution S , l'addition d'une même quantité d'acide nitrique ne conduit qu'à une diminution du pH de 0,1 unité. La solution S a donc les qualités d'une solution tampon vis-à-vis de l'addition d'acide.

e. Pour que la solution tampon joue son rôle, c'est-à-dire que le pH ne varie pas beaucoup, il

faut que le pH final $4,7 + \log \frac{n_{\text{AcO}^-} - n}{n_{\text{AcOH}} + n}$ soit proche du pH initial $4,7 + \log \frac{n_{\text{AcO}^-}}{n_{\text{AcOH}}}$, c'est-à-dire

$$n_{\text{AcO}^-} \gg n \quad \text{et} \quad n_{\text{AcOH}} \gg n$$

Il faut donc que les quantités initiales d'acide éthanoïque et d'ion éthanoate soient suffisantes, c'est-à-dire que le tampon soit assez concentré.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Thème 2. Exercices de fin de thème

4. a. La quantité de mouvement s'exprime par la relation $p = mv$.

On a donc : $\dim p = \text{MLT}^{-1}$.

$h\nu$ est une énergie comme mc^2 donc : $\dim(h\nu) = \text{ML}^2\text{T}^{-2}$.

c a la dimension d'une vitesse : $\dim c = \text{LT}^{-1}$.

$$\dim\left(\frac{h\nu}{c}\right) = \frac{\text{ML}^2\text{T}^{-2}}{\text{LT}^{-1}} = \text{MLT}^{-1}$$

La relation est donc bien homogène.

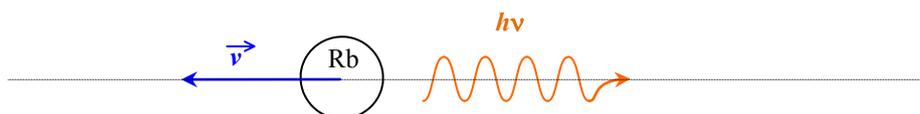
b. L'atome de rubidium constitue un système isolé comme l'indique l'énoncé. La quantité de mouvement d'un système isolé est constante. Avant l'émission, cette quantité de mouvement est nulle puisque l'atome est immobile.

Après la désexcitation de l'atome, le photon émis part avec une quantité de mouvement \vec{p}_{photon} . Pour que la quantité de mouvement de l'ensemble reste nulle, il faut que l'atome

recule avec une quantité de mouvement \vec{p}_{atome} telle que :

$$\vec{p}_{\text{photon}} + \vec{p}_{\text{atome}} = \vec{0}$$

Les deux vecteurs quantité de mouvement sont opposés. L'atome part sur la même direction que le photon mais en sens opposé :



c. En valeur, ces quantités de mouvement sont égales : $p_{\text{photon}} = p_{\text{atome}}$.

$$\frac{h}{\lambda} = mv \text{ donc } v = \frac{h}{m\lambda}$$

$$v = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{1,45 \times 10^{-25} \times 0,78 \times 10^{-6}} = 5,9 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

5. a. Il y a émission de photons car le noyau se désexcite : il perd de l'énergie.

b. Pour le photon associé à la transition (1) :

$$\mathcal{E}_1 = 2,506 - 1,333 = 1,173 \text{ MeV}$$

Pour le photon associé à la transition (2) :

$$\mathcal{E}_2 = 1,333 - 0 = 1,333 \text{ MeV}$$

Pour obtenir ces énergies en joule, il faut multiplier par $1,602 \times 10^{-13}$, ce qui donne :

$$\mathcal{E}_1 = 1,879 \times 10^{-13} \text{ J}$$

$$\mathcal{E}_2 = 2,135 \times 10^{-13} \text{ J}$$

Longueurs d'onde des radiations associées :

$$\lambda_1 = \frac{hc}{\mathcal{E}_1} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{1,879 \times 10^{-13}} = 1,06 \times 10^{-12} \text{ m}$$

$$\lambda_2 = \frac{hc}{\mathcal{E}_2} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{2,135 \times 10^{-13}} = 9,32 \times 10^{-13} \text{ m}$$

c. Ces longueurs d'onde appartiennent au domaine des rayons γ .

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Thème 2. Exercices de fin de thème

6. a. L'énergie emmagasinée \mathcal{E} dans le ressort est dissipée sous forme de travail \mathcal{W} des forces de frottements fluides dans l'eau. Ce travail génère un transfert thermique Q (égal à \mathcal{W} si on admet un rendement de 1) entre les pales de l'hélice et l'eau. Il y a alors échauffement de l'eau.

Pour le système eau + pales, il n'y a pas d'échange d'énergie par travail avec l'extérieur, mais seulement par transfert thermique Q et $\Delta^{\circ}u = C_{\text{eau}} \times \Delta T$.

A. N. :
$$\Delta T = \frac{8000}{4,18 \times 10^3} = 1,9 \text{ }^{\circ}\text{C ou K}$$

b. L'écart relatif e est défini par :

$$e = \frac{|T_{\text{mesurée}} - T_{\text{théorique}}|}{T_{\text{théorique}}} = \frac{0,7}{1,9} = 0,37 \text{ soit } 37 \%$$

Les raisons de cet écart sont, d'une part, les pertes mécaniques lors de la transmission de l'énergie du ressort aux pales de l'hélice et, d'autre part, les pales de l'hélice doivent être considérées comme un système thermodynamique échangeant du transfert thermique avec l'eau. Elles ont une capacité thermique propre et leur énergie interne va varier, utilisant ainsi une partie du travail des forces de frottements fluides. Elles limitent ainsi l'échauffement de l'eau.

7. a. En utilisant les données et notations du DOC 2. : $Q = 0$, le transfert thermique vers l'extérieur est nul puisque l'enceinte est calorifugée. De même, le transfert par travail \mathcal{W} (hors forces conservatives) vers l'extérieur est également nul. En utilisant la relation donnée, la variation d'énergie totale est nulle et :

$$\Delta^{\circ}u + \Delta\mathcal{E}_m = \mathcal{W} + Q = 0$$

b. La variation d'énergie potentielle du solide est :

$$\Delta\mathcal{E}_p = -mgh$$

c. On considère le système {solide de masse m + eau}. Ce système est fermé. On s'intéresse à la situation où le solide de masse m descend en actionnant les pales immergées dans l'eau.

État initial : solide de masse m immobile à la hauteur h , eau à la température initiale T_i .

État final : solide de masse m en bas immobile à la hauteur $h = 0$ m, eau à la température finale T_f .

On utilise alors la relation établie en **a.** : $\Delta^{\circ}u + \Delta\mathcal{E}_m = 0$.

Or, pour l'eau :

$$\Delta^{\circ}u = C_{\text{eau}} \times \Delta T \quad \text{et} \quad \Delta\mathcal{E}_m = -mgh \quad (\text{car } +\Delta\mathcal{E}_c = 0 \text{ J})$$

soit :

$$C_{\text{eau}} \times \Delta T + (-mgh) = 0$$

ce qui entraîne :

$$h = \frac{C_{\text{eau}} \times \Delta T}{mg}$$

d. On peut déduire la capacité thermique de l'eau de la question précédente :

$$C_{\text{eau}} = \frac{mgh}{\Delta T}$$

A. N. :
$$C_{\text{eau}} = \frac{20,0 \times 9,81 \times 10}{0,09} = 21\,800 = 2,2 \times 10^4 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$$

La capacité thermique massique de l'eau vaut alors :

$$c = \frac{C_{\text{eau}}}{M} = 4,4 \times 10^3 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Thème 2. Exercices de fin de thème

8. a. $\mathcal{E}_c = eU = \frac{p^2}{2m}$ d'où $p = \sqrt{2meU}$.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2meU}}$$

A.N. : $\lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 9,11 \times 10^{-31} \times 1,6 \times 10^{-19}}} \times \frac{1}{\sqrt{U}} = \frac{1,23 \times 10^{-9}}{\sqrt{U}}$, λ étant en mètre et U en volt.

b. $U = \left(\frac{1,23 \times 10^{-9}}{\lambda} \right)^2$

A.N. : $U = \left(\frac{1,23 \times 10^{-9}}{0,10 \times 10^{-9}} \right)^2 = 1,5 \times 10^2 \text{ V}$

c. $\lambda = \frac{1,23 \times 10^{-9}}{\sqrt{U}} = \frac{1,23 \times 10^{-9}}{\sqrt{200}} = 87 \times 10^{-12} \text{ m}$

De la relation $\mathcal{E}_c = eU = \frac{1}{2}mv^2$, on déduit l'expression de la vitesse v :

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$$

A.N. : $v = \sqrt{\frac{2 \times 1,60 \times 10^{-19} \times 200}{9,11 \times 10^{-31}}} = 8,4 \times 10^6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

La valeur $8,4 \times 10^3 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ correspond à une vitesse très grande pour un objet ordinaire mais plutôt « faible » pour un électron qui peut atteindre des vitesses beaucoup plus grandes très facilement, ce qui justifie la présence des guillemets dans le texte.

Cap vers LE SUPÉRIEUR

Les exercices « Cap vers le supérieur » font appel à des compétences non exigibles en T^{erm} S : ils ont pour objectif de préparer aux études supérieures.

9. a. Einstein a fait l'hypothèse que les rayons X, comme la lumière visible, transportaient des quanta d'énergie appelés photons. L'effet Compton s'interprète comme un choc entre deux particules : un photon et un électron.

b. Un photon se comporte comme une particule de masse nulle, d'énergie :

$$\mathcal{E} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

et de quantité de mouvement :

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

c. Conservation de la quantité de mouvement du système:

$$\vec{p} + \vec{0} = \vec{p}' + \vec{p}_e \quad (1)$$

Conservation de l'énergie :

$$h\nu + m_e c^2 = h\nu' + \sqrt{p_e^2 c^2 + m_e^2 c^4} \quad (2)$$

ou :

$$\frac{hc}{\lambda} + m_e c^2 = \frac{hc}{\lambda'} + \sqrt{p_e^2 c^2 + m_e^2 c^4}$$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Thème 2. Exercices de fin de thème

d. La relation (1) s'écrit : $\vec{p} - \vec{p}' = \vec{p}_e$. Élevons cette relation au carré :

$$\begin{aligned} (\vec{p} - \vec{p}')^2 &= \vec{p}_e^2 \\ p^2 + p'^2 - 2\vec{p} \cdot \vec{p}' &= p_e^2 \end{aligned}$$

avec $\vec{p} \cdot \vec{p}' = pp' \cos \theta$, la relation devient :

$$p^2 + p'^2 - 2pp' \cos \theta = p_e^2$$

Ou en exprimant la quantité de mouvement du photon en fonction de sa longueur d'onde :

$$\left(\frac{h}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{h}{\lambda'}\right)^2 - 2\left(\frac{h}{\lambda\lambda'}\right)^2 \cos \theta = p_e^2 \quad (3)$$

e. $(\sqrt{p_e^2 c^2 + m_e^2 c^4})^2 = \left(\frac{hc}{\lambda} + m_e c^2 - \frac{hc}{\lambda'}\right)^2$

$$p_e^2 c^2 + m_e^2 c^4 = \left(\frac{hc}{\lambda}\right)^2 + (m_e c^2)^2 + \left(\frac{hc}{\lambda'}\right)^2 + 2\frac{m_e c^3 h}{\lambda} - \frac{2h^2 c^2}{\lambda\lambda'} - 2\frac{m_e c^3 h}{\lambda'}$$

$$p_e^2 = \left(\frac{h}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{h}{\lambda'}\right)^2 + 2\frac{m_e c h}{\lambda} - 2\frac{h^2}{\lambda\lambda'} - 2\frac{m_e c h}{\lambda'} \quad (4)$$

f. $p_e^2 = \left(\frac{h}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{h}{\lambda'}\right)^2 - 2\frac{h^2}{\lambda\lambda'} \cos \theta = \left(\frac{h}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{h}{\lambda'}\right)^2 + 2\frac{m_e c h}{\lambda} - 2\frac{h^2}{\lambda\lambda'} - 2\frac{m_e c h}{\lambda'}$

Après simplification :

$$-\frac{h}{\lambda\lambda'} \cos \theta = \frac{m_e c}{\lambda} - \frac{h}{\lambda\lambda'} - \frac{m_e c}{\lambda'}$$

soit :

$$\frac{m_e c}{\lambda} - \frac{m_e c}{\lambda'} = \frac{h}{\lambda\lambda'} - \frac{h}{\lambda\lambda'} \cos \theta$$

ou encore :

$$\lambda - \lambda' = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

10. a. Le dispositif placé entre la source et les tubes n'introduit pas de déphasage. Comme l'axe SO est axe de symétrie du système, les ondes issues des deux sources secondaires arrivent en phase au point O . La frange observée en O est une frange brillante.

b. $i = 632,8 \times 10^{-9} \times \frac{2,00}{1,00 \times 10^{-2}} = 1,27 \times 10^{-4} \text{ nm.}$

c. La différence de marche entre la source S et chacune des fentes ne provient que des tubes car pour le reste, il y a toujours symétrie. On peut donc écrire :

$$\delta = L_2 - L_1 = n_{\text{air}} L - L = (n_{\text{air}} - 1)L$$

d. Lorsque l'on se place au point M , on introduit un déphasage supplémentaire qui va s'ajouter ou se soustraire au premier suivant le signe de x :

$$\delta = n_{\text{air}} L + S_2 M - L - S_1 M = (n_{\text{air}} - 1)L + \frac{a_{1-2} x}{D}$$

e. La frange brillante initiale correspond à un déphasage nul :

$$(n_{\text{air}} - 1)L + \frac{a_{1-2} x}{D} = 0 \quad \text{ou} \quad x = -\frac{(n_{\text{air}} - 1)LD}{a_{1-2}}$$

x étant négatif, on en déduit que les franges se déplacent vers le bas.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Thème 2. Exercices de fin de thème

$$f. \delta = \frac{(2k+1)\lambda}{2} = (n_{\text{air}} - 1)L.$$

On en déduit : $n_{\text{air}} = 1 + \frac{(2k+1)\lambda}{2L}.$

A. N. : $n_{\text{air}} = 1 + (2 \times 92 + 1) \times \frac{632,8 \times 10^{-9}}{2 \times 0,200} = 1,00029.$

11. a. Dressons le tableau d'évolution de la réaction :

État	avancement	A (g)	→	2P (g)	+	E (g)
initial	0	<i>a</i>		0		0
en cours	<i>x</i>	<i>a-x</i>		2 <i>x</i>		<i>x</i>
final	$x_f = a$	0		2 <i>a</i>		<i>a</i>

b. À la date $t = 0$, la quantité de gaz est a et la pression initiale P_0 vérifie :

$$P_0 = \frac{aRT}{V}$$

Lorsque la réaction est terminée, la quantité de gaz présente est $2a + a = 3a$ et la pression finale P_f vérifie :

$$P_f = \frac{3aRT}{V} = 3P_0 \Rightarrow P_0 = \frac{P_f}{3}$$

c. À la date t , la quantité de gaz présente est $a-x + 2x + x = a + 2x$, et la pression P vérifie :

$$P = \frac{(a+2x)RT}{V} = \frac{aRT}{V} \times \left(1 + \frac{2x}{a}\right) = P_0 \times \left(1 + \frac{2x}{a}\right)$$

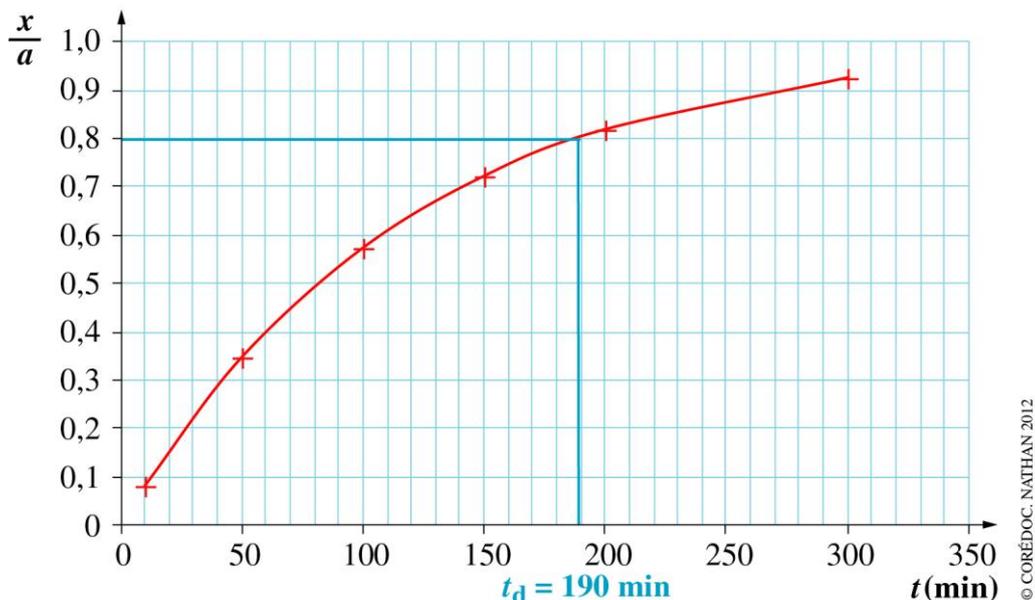
d. De $P = P_0 \times \left(1 + \frac{2x}{a}\right)$, on déduit :

$$\frac{P}{P_0} = 1 + \frac{2x}{a} \Rightarrow \frac{2x}{a} = \frac{P}{P_0} - 1 \Rightarrow \frac{x}{a} = \frac{1}{2} \left(\frac{P}{P_0} - 1 \right)$$

e. La valeur de P_f permet de déterminer $P_0 = \frac{P_f}{3}$. A.N. : $P_0 = \frac{0,718}{3} = 0,239$ bar.

La valeur de la pression P est connue pour différentes dates t , l'expression établie en **d.** permet de calculer $\frac{x}{a}$:

t(min)	10	50	100	150	200	300
P(bar)	0,278	0,405	0,513	0,584	0,63	0,681
x/a	0,082	0,347	0,573	0,722	0,818	0,925



f. 80 % de A a été consommé lorsque $x = 80 \% = 0,8$.

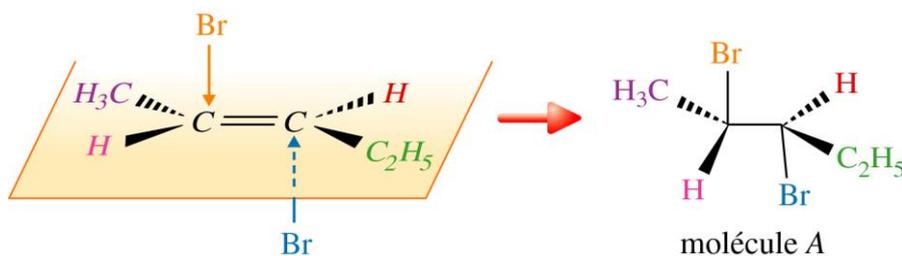
Sur la représentation graphique ci-dessus, on peut évaluer la date correspondante :

$$t_d = 190 \text{ min}$$

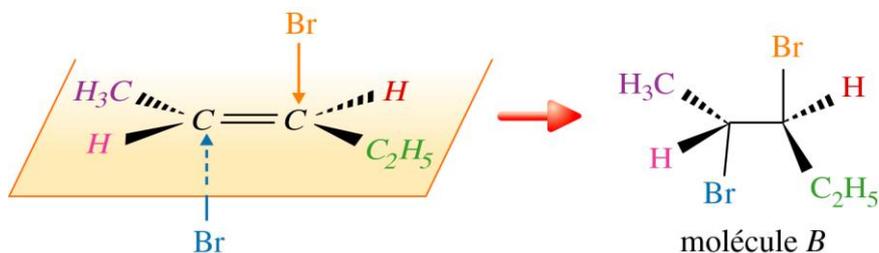
12. a. Une réaction d'addition met en jeu au moins 2 réactifs et conduit à un produit de réaction contenant tous les atomes de tous les réactifs.

La réaction $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2 + \text{Br}_2 \rightarrow \text{BrCH}_2-\text{CH}_2\text{Br}$ répond à cette définition et c'est donc une réaction d'addition.

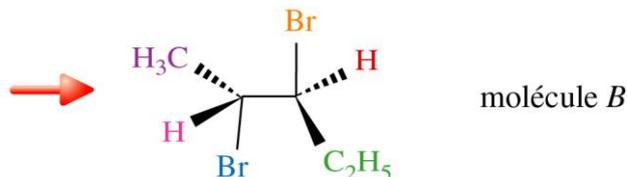
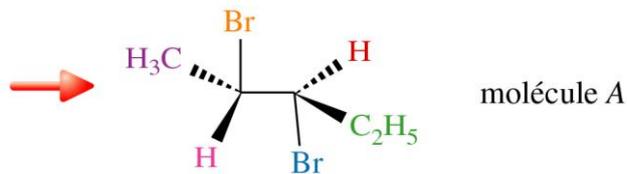
b. Formation du composé A par stéréoaddition de dibrome sur le (E)-pent-2-ène :



Formation du composé B par stéréoaddition de dibrome sur le (E)-pent-2-ène :



c. Relation de stéréochimie entre *A* et *B* :



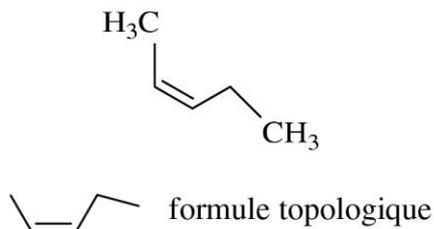
Les molécules *A* et *B* ont chacune deux atomes de carbone asymétriques (voir page 292)

Les molécules *A* et *B* ne sont pas superposables.

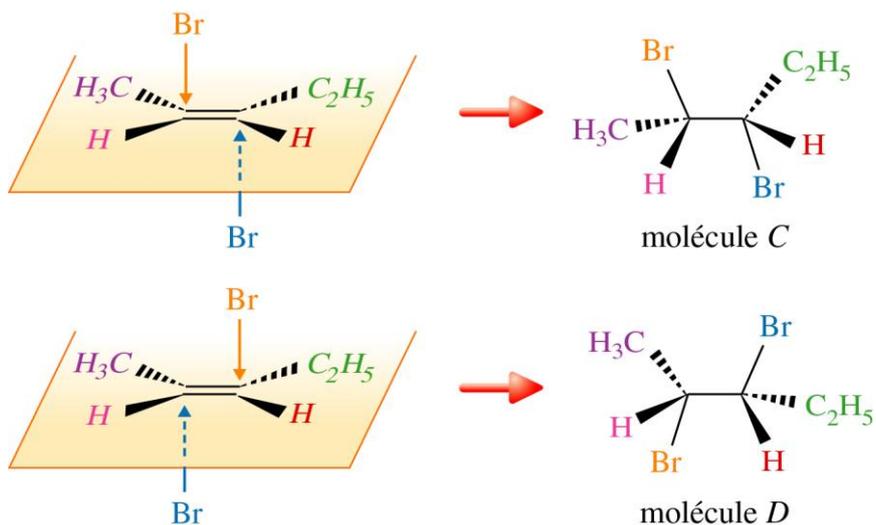
Les molécules *A* et *B* sont images l'une de l'autre dans un miroir (----)

Ces deux molécules sont des énantiomères.

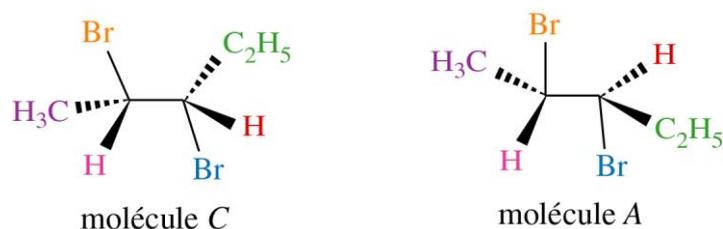
d. Bromation du (*Z*)-pent-2-ène. Formule topologique du (*Z*)-pent-2-ène :



formation des composés d'addition *C* et *D*

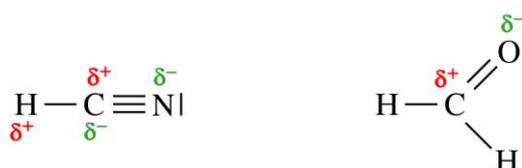


e. Relation stéréochimique entre la molécule A et la molécule C



Les molécules A et C ne sont pas superposables, elles ne sont pas non plus images l'une de l'autre dans un miroir : ce sont des diastéréoisomères (cas particulier de stéréoisomères à deux atomes de carbone asymétriques, voir page 292).

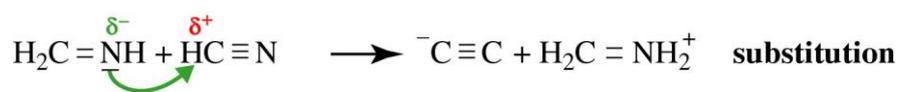
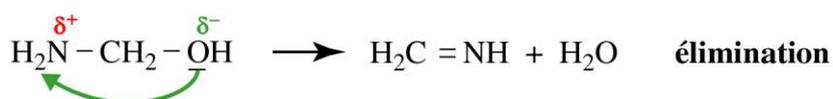
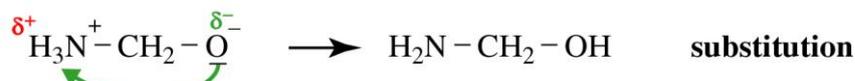
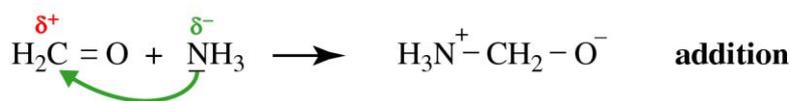
13. 1.



a.

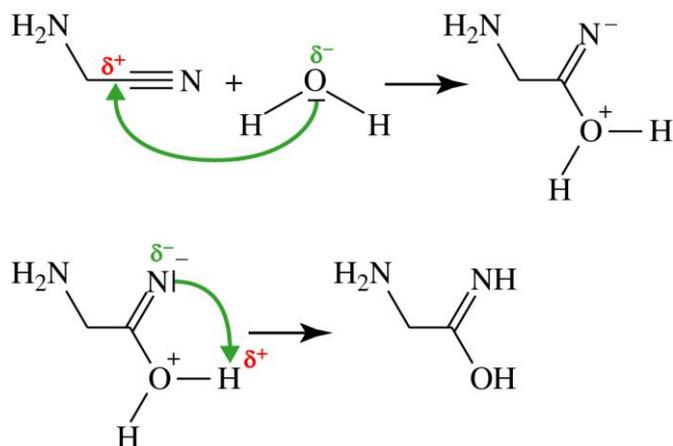


b.



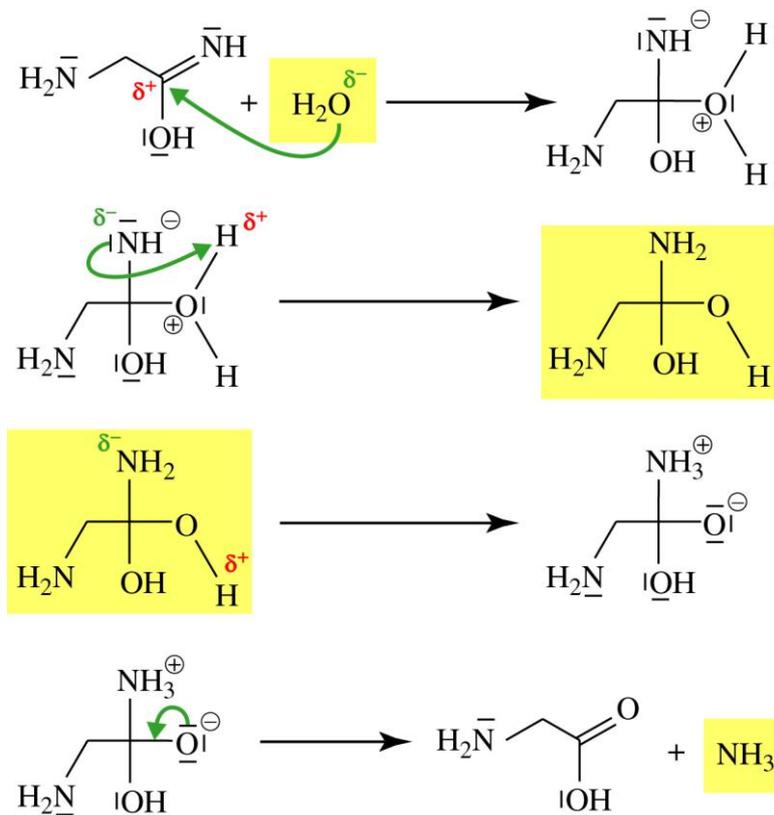
c. $\text{H}_2\text{NCH}_2\text{CN} + 2 \text{H}_2\text{O} = \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{NCH}_2\text{COOH}$.

d. et e.

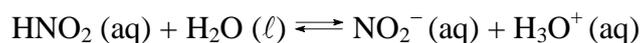


Ces transformations élémentaires appartiennent à la catégorie des additions pour la 1^{re} et des substitutions pour la 2^e.

f.



14. a. L'acide HNO₂ est un acide faible qui réagit de façon équilibrée avec l'eau selon la réaction d'équation :



Le tableau d'évolution de cette réaction est :

État	avancement	$\text{HNO}_2 (\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} (\ell) \rightleftharpoons \text{NO}_2^- (\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq})$			
initial	0	cV	excès	0	0
en cours	x	$cV-x$	excès	x	x
final	x_f	$cV-x_f$	excès	x_f	x_f

b. Les concentrations finales des différentes espèces sont :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{x_f}{V} = h$$

$$[\text{NO}_2^-] = \frac{x_f}{V} = h$$

$$[\text{HNO}_2] = \frac{cV - x_f}{V} = c - \frac{x_f}{V} = c - h$$

Elles sont reliées par l'expression :

$$K_a = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+] \times [\text{NO}_2^-]}{[\text{HNO}_2]} = \frac{h^2}{c - h}$$

c. La relation précédente peut s'écrire :

$$K_a \times (c - h) = h^2 \Rightarrow h^2 + K_a h - K_a c = 0$$

On reconnaît une équation du second degré de discriminant :

$$\Delta = K_a^2 + 4K_a c.$$

$\Delta > 0$ donc l'équation admet deux solutions réelles :

$$\frac{-K_a + \sqrt{K_a^2 + 4K_a c}}{2} > 0 \quad \text{et} \quad \frac{-K_a - \sqrt{K_a^2 + 4K_a c}}{2} < 0$$

Seule la solution positive est retenue puisque l'inconnue h représente la concentration en ions H_3O^+ et doit donc être positive.

D'où :

$$h = \frac{-K_a + \sqrt{K_a^2 + 4K_a c}}{2}$$

d. D'après le tableau d'évolution de la réaction, l'avancement maximal x_m vérifie :

$$cV - x_m = 0, \text{ soit } x_m = cV$$

Le taux d'avancement est donc :

$$\alpha = \frac{x_f}{x_m} = \frac{x_f}{cV} = \frac{h}{c}$$

Si l'acide était fort, la réaction serait totale et l'avancement final x_f serait égal à l'avancement maximal x_m d'où :

$$\alpha = \frac{x_f}{x_m} = 1$$

e. Grâce à la relation $h = \frac{-K_a + \sqrt{K_a^2 + 4K_a c}}{2}$ avec $K_a = 10^{-\text{p}K_a} = 4,0 \times 10^{-4}$, on calcule h .

On en déduit $\text{pH} = -\log h$ et $\alpha = \frac{h}{c}$.

c (mol·L⁻¹)	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-6}$
h (mol·L⁻¹)	$1,8 \times 10^{-3}$	$4,6 \times 10^{-4}$	$8,3 \times 10^{-5}$	$9,8 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-6}$
pH	2,7	3,3	4,1	5,0	6,0
α	0,18	0,46	0,83	0,98	1,00

On constate que plus la concentration apportée est faible, plus le taux d'avancement se rapproche de 1. À très faible concentration, un acide faible a le comportement d'un acide fort.

Chapitre 21 – Enjeux énergétiques et environnementaux

Manuel pages 425 à 444

Choix pédagogiques

Ce chapitre introduit le thème « Enjeux énergétiques et environnementaux » de la troisième partie du programme « Défis du XXI^e siècle ». Il est tout à fait dans l'esprit de la réforme puisque qu'il regroupe physique et chimie. C'est un des chapitres ayant une organisation particulière où les compétences attendues sont essentiellement « Extraire et exploiter des informations ». Notamment, il ne comporte pas de partie cours, mais un plus grand nombre d'activités que les chapitres classiques et les exercices sont de type documentaire. Cette absence de connaissances exigibles souligne l'aspect introductif au thème 3 du chapitre. Ce chapitre est aussi l'occasion d'exercer les élèves à rédiger des synthèses de documents.

Une première activité documentaire portant sur une énergie renouvelable permet de saisir la nécessité de changer la nature des ressources énergétiques.

Une deuxième activité documentaire met l'accent sur la réduction de la consommation d'énergie finale dans le secteur du bâtiment.

Les transports utilisant majoritairement le pétrole comme ressource primaire, la troisième activité documentaire permet d'étudier deux voies d'évolution des véhicules selon le type de moteur choisi ou le carburant utilisé. Elle fait aussi le lien entre physique et chimie.

La quatrième activité documentaire introduit la chimie durable, aussi appelée, selon les auteurs, « chimie verte », en quantifiant la limitation des déchets dans une transformation chimique avec la notion d'économie d'atomes et en proposant une valorisation des sous-produits.

La cinquième activité est un trait d'union entre l'aspect énergétique, du point de vue physique, vu dans les trois premières activités et les économies d'énergie dans l'industrie chimique.

La dernière activité apporte une solution pour limiter l'effet de serre et envisage la valorisation du dioxyde de carbone en tant que réactif chimique.

Des animations et des vidéos documentaires et d'expériences illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et, certaines d'entre elles, sur les sites Internet compagnon Sirius.

Page d'ouverture

Le document d'ouverture peut être l'occasion de poser la question suivante aux élèves : « quel peut être l'intérêt énergétique de la coloration des vitres lorsque la luminosité augmente ? ».

Activités

Activité documentaire 1. Étude d'un projet de parc éolien offshore

Commentaires

La Bretagne est une presqu'île énergétique c'est-à-dire qu'il n'y a aucune centrale nucléaire, et lorsque de gros appels d'électricité se produisent en période de froid rigoureux, EDF est amené à pratiquer des coupures pour délester. Il faut donc que de nouvelles ressources émergent.

Réponses

1. Analyser les documents

1. a. Des exemples d'énergie marine :

- l'énergie marémotrice, due aux mouvements de flux et de reflux des marées ;
- l'énergie hydrolienne, due aux courants marins ;
- l'énergie houlomotrice, due aux vagues.

b. D'après le texte, la Bretagne a produit 6 910 GWh d'énergie pour sa consommation finale en 2010. Or, $1 \text{ Wh} = 3,60 \times 10^3 \text{ J}$ d'où $\mathcal{E} = 6\,910 \text{ GWh} = 6\,910 \times 3,60 \times 10^3 \text{ GJ}$.

De plus, on sait que $1 \text{ tep} = 41,868 \text{ GJ}$.

On en déduit que :

$$\mathcal{E} = \frac{6\,910 \times 3,6 \times 10^3}{41,868}$$

$$\mathcal{E} = 594 \times 10^3 \text{ tep} = 594 \text{ ktep}$$

D'après le graphique, l'énergie produite en 2010 vaut environ 590 ktep.

Les deux valeurs sont cohérentes.

c. La production d'électricité primaire augmente doucement depuis 2001 : entre 2001 et 2010, elle a été multipliée par 2,7. Cette augmentation participe à celle de la production d'énergie totale qui atteint, en 2010, 594 ktep, soit 8,3 % des besoins couverts contre 5,5 % en 2001.

Rappel : l'électricité primaire est l'électricité d'origine nucléaire, hydraulique, éolienne, solaire, photovoltaïque et géothermique.

d. Une éolienne est un dispositif permettant de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique ou électrique. En général, elle a un rendement de conversion d'énergie η égal à 20 %.



\mathcal{E}_c : énergie cinétique du vent
 \mathcal{E} : énergie mécanique ou électrique

2. Interpréter

1. a. Une turbine offshore ayant une puissance moyenne $\mathcal{P} = 5,0$ MW peut produire $\mathcal{E} = 15$ GWh d'énergie électrique par an.

La relation $\mathcal{E} = \mathcal{P} \times \Delta t$ entraîne :

$$\Delta t = \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{P}} = \frac{15 \times 3,6 \times 10^{12}}{5,0 \times 10^6}$$

$$\Delta t = 11 \times 10^6 \text{ s}$$

$$\Delta t = \frac{11 \times 10^6}{3600} \text{ h} = 3055 \text{ h} = 3,0 \times 10^3 \text{ h}$$

mais l'éolienne ne fonctionne à pleine puissance que 45 % du temps d'après le document 2 :

$$\Delta t = 0,45 \times 3,0 \times 10^3 = 1,35 \times 10^3 \text{ h} = 56 \text{ j}$$

Pour qu'une telle éolienne produise 15 GWh d'électricité, il faut qu'elle fonctionne environ 56 jours par an, ce qui est peu ! On peut donc supposer que cette éolienne fonctionnera sur une durée plus longue et permettra de produire davantage d'énergie.

b. En 2010, la Bretagne ne couvrait que 8,3 % de ses besoins en énergie. L'installation des 600 éoliennes offshore doit permettre d'atteindre une puissance de 3 GW soit l'équivalent de deux réacteurs nucléaires. Ce projet devrait aider cette région à obtenir son indépendance énergétique.

3. Conclure

Avantages de l'éolien offshore	Inconvénients de l'éolien offshore
matériel résistant aux contraintes	coût important
durée de vie assez longue	pleine puissance 45% du temps
l'éolien offshore est plus rentable que l'éolien terrestre	gêne les pêcheurs : modification de la zone de pêche
énergie renouvelable	gêne pour la faune et la flore sous-marine
pas d'épuisement des ressources	gêne les oiseaux
pas de pollution	gêne la circulation maritime
	gêne sonore et visuelle : impact sur le tourisme et le paysage
	implantation géographique limitée

Activité documentaire 2. Économies d'énergie dans l'habitat

Commentaires

L'objectif est de diminuer la part du bâtiment dans la consommation d'énergie en améliorant la construction.

Réponses

1. Analyser les documents

a. En 2004, le secteur du bâtiment représente 43,5 % de la consommation d'énergie française, ce qui est énorme ! Le Grenelle de l'environnement impose une réduction de la consommation énergétique des bâtiments.

b. Le solaire, la géothermie, la biomasse, l'éolien sont des ressources d'énergie renouvelables permettant de produire de l'énergie domestique.

c. Un arbre à feuilles caduques renouvelle ses feuilles chaque année. C'est pourquoi un tel arbre peut être utilisé pour réduire l'apport solaire en été ; tandis qu'en hiver, lorsque les feuilles seront tombées, les rayons du soleil pourront venir chauffer le bâtiment. C'est pourquoi un arbre à feuilles caduques doit être planté devant la terrasse, au sud ou à l'ouest de la maison écologique afin que son ombre rafraîchisse le bâtiment en été, aux heures chaudes.

d. Les pièces à vivre (salle à manger, salon) sont orientées au sud pour profiter des apports solaires en hiver et d'une bonne luminosité toute l'année. Un toit débordant limite les surchauffes en été et abrite de la pluie en hiver.

À voir : <http://www.ademe.fr/alsace/pdf/Plaquette-HQE.pdf>

2. Interpréter

a. À partir de 2013, la consommation maximale d'énergie primaire autorisée est de 50 kWh par mètre carré et par an. Pour que l'utilisateur dispose de 1 kWh d'énergie électrique, il faut qu'une centrale électrique produise 2,58 kWh d'énergie primaire. Pour 1 m², l'énergie maximale autorisée vaut :

$$\frac{1 \times 50}{2,58} = 19 \text{ kWh}$$

soit 19 kWh·m⁻²·an⁻¹ autorisé pour une maison neuve « tout » électrique.

b. L'isolation de cette maison semble défailante au niveau des fenêtres puisqu'elles apparaissent en rose sur le document 3: les déperditions thermiques sont importantes puisque la température de la paroi est élevée par rapport à celle des autres zones.

c. Pour la maison du document 2 :

$$\text{énergie produite} = 4\,700 + 3\,300 + 5\,000 = 13\,000 \text{ kWh}$$

$$\text{énergie consommée} = 14\,000 + 500 = 19\,000 \text{ kWh}$$

Sur un an, le bilan énergétique est de :

$$\text{énergie produite} - \text{énergie consommée} = 13\,000 - 19\,000 = -6\,000 \text{ kWh}$$

La maison consomme davantage d'énergie qu'elle n'en produit. Ce n'est pas une construction à énergie positive.

Activité documentaire 3. Économies d'énergie dans les transports

Commentaires

D'après le DOC. 1 de l'activité 2 page 428, les transports représentent près du tiers de la demande énergétique et c'est le pétrole ressource non renouvelable qui en est la principale source. Il faut donc trouver des méthodes alternatives.

Réponses

1. Analyser les documents

- a.** Trois types de moteur sont évoqués dans le document 1 : le moteur thermique, le moteur électrique et le moteur hybride.
- b.** Le moteur thermique a supplanté le moteur électrique du fait de :
- record de vitesse ;
 - meilleur rapport entre la performance mécanique et le coût ;
 - facilité d'usage et d'approvisionnement en carburant.
- c.** Le biocarburant est un carburant produit à partir de matériaux organiques non fossiles, provenant de la biomasse : c'est un agrocarburant. Les agroressources sont les végétaux qui fournissent des composés de base nécessaires à l'énergie, la chimie et les matériaux, ce sont des matières premières renouvelables.
- d.** Les solutions alternatives proposées sont :
- de nouveaux carburants : les biocarburants ;
 - de nouveaux moteurs : les moteurs hybrides.

	Avantages	Inconvénients
Biocarburants	écologiques, cultures dédiées	en concurrence avec les cultures vivrières s'il s'agit du biocarburant de 1 ^{re} génération
	économie d'énergie fossile	
	facile à utiliser	
	limitation des émissions de CO ₂ anthropique	
Moteurs hybrides	adapté au trajet urbain et périurbain	faible autonomie
	la batterie se recharge en phase de décélération et de freinage	manque de bornes pour recharger
	limitation de la pollution	nécessité de produire plus d'énergie électrique.

e. La consommation de carburants devrait diminuer dans les 40 prochaines années. L'utilisation du pétrole comme carburant devrait aussi diminuer, du fait de sa rareté et de son coût. Le moteur thermique sera de moins en moins utilisé au profit du moteur électrique, du moteur hybride ou du moteur utilisant une pile à hydrogène. L'utilisation des biocarburants devrait aussi augmenter.

2. Interpréter

a. Le tep : unité conventionnelle permettant de réaliser des bilans énergétiques multi-énergies avec comme référence l'équivalence en pétrole. Elle vaut par définition 41,868 gigajoules (GJ), ce qui correspond au pouvoir calorifique d'une tonne de pétrole.

$$1 \text{ tep} = 41,868 \text{ GJ et } 1 \text{ Wh} = 3,6 \times 10^3 \text{ J.}$$

$$2,5 \text{ millions de tep} = 2,5 \times 10^6 \text{ tep} = 2,5 \times 10^6 \times 41,868 \times 10^9 \text{ J} = 1,0 \times 10^{17} \text{ J} = 1,0 \times 10^8 \text{ GJ.}$$

$$2,5 \text{ millions de tep} = \frac{1,0 \times 10^{17}}{3,6 \times 10^3} = 2,8 \times 10^{13} \text{ Wh} = 2,8 \times 10^{10} \text{ kWh.}$$

L'énergie économisée grâce aux biocarburants ($1,0 \times 10^8$ GJ) correspond à l'énergie fossile contenue dans 2,5 millions de tonnes de pétrole.

b. Pour recharger la batterie d'une voiture électrique, il faut que de l'électricité soit produite en amont. Les besoins énergétiques sont donc déplacés d'une ressource (le pétrole) vers d'autres (nucléaire, solaire, éolien, hydrolien, etc...).

c. La filière biocarburant est contestée car elle utilise des surfaces de terres qui pourraient être utilisées pour l'alimentation. Or, la population mondiale ne cesse d'augmenter et certains habitants souffrent de la faim.

d. D'après le document 2, les véhicules hybrides pourraient être des véhicules économes en énergie fossile s'ils étaient utilisés uniquement en mode électrique. Donc, pour des trajets inférieurs à 25 km et pour des vitesses inférieures à $25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Activité documentaire 4. Économies d'atomes et limitation des déchets

Commentaires

La chimie est souvent considérée comme une industrie polluante, responsable de bien des problèmes environnementaux. Cependant, la chimie tend toujours à devenir plus propre ; pour quantifier la limitation des déchets, on peut utiliser l'économie d'atomes.

Réponses

1. Comprendre les documents

a. Le rendement d'une transformation chimique est le rapport de la quantité de matière obtenue du produit d'intérêt sur la quantité de matière attendue.

Le rendement d'une transformation chimique est insuffisant pour rendre compte de l'efficacité d'un procédé industriel car il ne tient pas compte des autres produits obtenus, dont notamment des déchets et de la pollution occasionnés.

b. Les objectifs de la chimie durable sont :

- minimiser les quantités d'espèces chimiques introduites ;
- rendre les procédés de synthèse moins polluants ;
- consommer moins d'énergie que par le passé ;
- limiter les déchets.

c. Les matériaux composites sont plus légers que des métaux ; ils nécessitent donc moins d'énergie pour leur transport.

d. Le nouvel émulsifiant utilisé pour fluidifier les bitumes est « biodégradable, moins toxique, obtenu par un procédé qui ne nécessite pas de solvant, qui ne produit pas de rejet et qui utilise des matières premières végétales naturelles jusqu'alors non ou peu valorisées, en particulier hors du domaine alimentaire ».

2. Interpréter

a. Les valeurs de l'économie d'atomes, puisque $m_A + m_B = m_P + m_Q$, sont telles que :

$$m_P < m_A + m_B$$

$$0 < E_{\text{at}} = \frac{m_P}{m_A + m_B} < 1$$

$$0 < E_{\text{at}} < 1$$

Si $E_{\text{at}} \approx 0$, la synthèse n'est pas économe.

Si $E_{\text{at}} \approx 1$, la synthèse est très économe.

b. Pour la première synthèse historique :

$$E_{\text{at}} = \frac{M(\text{aspartame})}{\sum M(\text{réactifs})}$$

$$E_{\text{at}} = \frac{294}{133 + 165 + 2 \times 40 + 23,9 + 2 + 170,5 + 2 \times 108 + 197,5 + 2 \times 32 + 206 + 2 \times 2}$$

$$E_{\text{at}} = \frac{294}{1261,9} = 0,233$$

Pour la synthèse enzymatique :

$$E_{\text{at}} = \frac{M(\text{aspartame})}{\sum M(\text{réactifs})}$$

$$E_{\text{at}} = \frac{294}{223+179+2} = 0,728$$

La synthèse enzymatique est plus économe en atomes et respecte donc mieux ce critère de la chimie durable.

c. Une réaction chimique exothermique permet de « consommer » moins d'énergie que par le passé.

d. Un co-produit peut être réutilisé tandis qu'un sous-produit est un déchet inutilisable.

3. Conclusion

L'économie d'atomes permet de quantifier deux objectifs de la chimie durable cités précédemment :

- minimiser les quantités d'espèces chimiques introduites ;
- limiter les déchets.

Activité documentaire 5. Chimie douce et respect de l'environnement

Commentaires

Quels sont les enjeux d'une chimie verte conforme au développement durable ? Il faut limiter la consommation énergétique lors des procédés chimiques.

Réponses

1. Comprendre les documents

- a.** Pour que le dioxyde de carbone soit à l'état supercritique, il faut que la pression soit supérieure à 73 bar.
- b.** Dans l'extracteur (étape 1), le dioxyde de carbone est à l'état de fluide supercritique. Puis lorsqu'il est détendu (étape 2), il devient gazeux ; le recyclage nécessite de le porter à nouveau à l'état supercritique.
- c.** L'extraction au dioxyde de carbone est efficace et ne dénature pas le goût. Cette méthode ne laisse pas de traces résiduelles de solvants et a un bon impact sur l'environnement (utilisation d'un gaz à effet de serre) à un coût raisonnable.
- d.** Travailler à température ambiante permet de faire des économies d'énergie.

2. Interpréter

- a.** Une extraction a pour but la séparation de diverses espèces d'un milieu réactionnel. Au lycée, le plus souvent, on veut séparer le produit d'intérêt des autres espèces du milieu : pour cela, on réalise une extraction par solvant : une extraction liquide-liquide.
- b.** L'extraction au dioxyde de carbone supercritique nécessite de fortes pressions, elle n'est pas très économe en énergie. Cependant, elle préserve l'environnement puisque le dioxyde de carbone n'est pas toxique et est même un gaz à effet de serre.
- c.** L'utilisation des microorganismes pour réaliser cette réaction dans le domaine de l'architecture permet de protéger les façades.
- d.** Il est intéressant de contrôler la viscosité d'un gel pour le traitement des surfaces, afin de pouvoir déposer un film d'épaisseur faible et régulière.

3. Conclure

Les trois objectifs de la chimie douce présentés dans ces documents sont :

- les économies d'énergie ;
- la protection de l'environnement ;
- tenter de travailler dans des conditions proches de celles de la nature.

Activité documentaire 6. Valorisation du dioxyde de carbone

Commentaires

Pour limiter les effets du dioxyde de carbone sur l'effet de serre, il faut tendre vers sa valorisation car le stockage comporte des risques.

Réponses

1. Comprendre les documents

a. Il est intéressant de valoriser le dioxyde de carbone, car c'est un gaz à effet de serre qui est fabriqué dans les centrales de production d'électricité, les raffineries, les cimenteries, les usines sidérurgiques.

b. Les disciplines concernées par les trois méthodes de valorisation du CO₂ sont la physique, la chimie et la géologie.

c. La masse de dioxyde de carbone valorisée par an lors la synthèse industrielle de l'acide salicylique.

La masse molaire de l'acide salicylique est $M(C_7H_6O_3) = 138 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

La quantité de matière produite est donc :

$$n = \frac{7 \times 10^{10}}{138} = 5,07 \times 10^8 \text{ mol}$$

Il faut la même quantité de matière en dioxyde de carbone, d'après la stœchiométrie de l'équation.

$$M(\text{CO}_2) = 44 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1} \quad ; \quad m(\text{CO}_2) = 22,3 \text{ tonnes}$$

2. Interpréter

a. La masse de dioxyde de carbone produite annuellement dans le monde est de 49 milliards de tonnes.

En comparaison avec la masse de CO₂ valorisée actuellement (153,5 millions de tonnes), cela représente un pourcentage de :

$$\frac{153,5 \times 100}{49 \times 1000} = 0,31 \%$$

b. La valorisation du CO₂ permet sa transformation, tandis que le stockage géologique n'est qu'une étape intermédiaire qui remet à une date ultérieure le problème de l'élimination du dioxyde de carbone.

c. Les différentes utilisations industrielles de l'urée :

- les engrais ;
- l'alimentation animale ;
- les matières plastiques ;
- en tant qu'agent de réduction des oxydes d'azote ;
- en biochimie ;
- en tant qu'additif alimentaire.

Les différentes utilisations industrielles de l'acide salicylique : l'acide salicylique est utilisé dans les domaines de la pharmacie et de la cosmétique comme agent kératolytique pour soigner les problèmes de cuir chevelu (pellicules) et comme agent comédolytique pour la peau (acné, verrues, eczéma).

L'acide salicylique est aussi utilisé pour la synthèse de produits pharmaceutiques, agents antiseptiques et arômes chimiques. On trouve aussi l'acide salicylique comme additif dans l'industrie alimentaire (conservateur), les produits d'entretien (maison) et l'industrie chimique (colorants, résines, vulcanisation du caoutchouc).

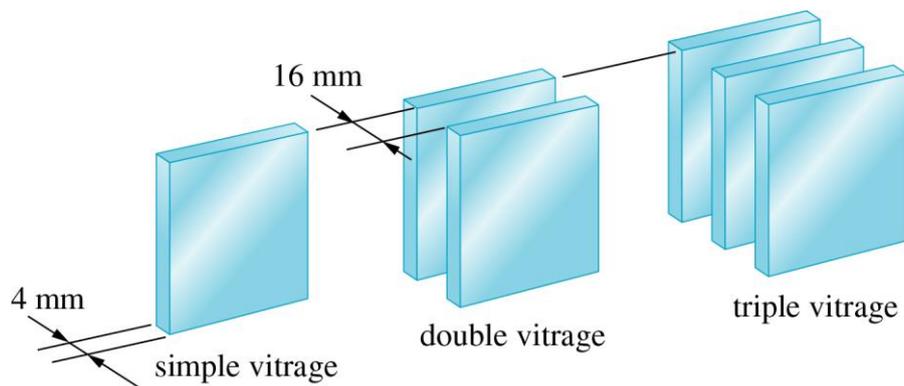
3. Conclure

Il existe différentes manières de valoriser le dioxyde de carbone :

- sans transformation, le dioxyde de carbone est utilisé pour ses propriétés physiques, comme solvant ou comme réfrigérant par exemple ;
- par réaction chimique avec une autre espèce chimique fortement réactive, le dioxyde de carbone peut mener à la synthèse d'un produit chimique de base ou d'un produit à valeur énergétique plus forte que celle du dioxyde de carbone ;
- par l'intermédiaire de la photosynthèse au sein d'organismes biologiques, telles que les algues, le dioxyde de carbone peut être utilisé pour synthétiser des produits d'intérêt.

Exercices documentaires

1. L'unité SI de la résistance thermique est en $K \cdot W^{-1}$.
2. a. Un bon isolant thermique s'oppose au transfert thermique (R_{th} grande, λ faible), il nécessite peu d'énergie grise pour sa fabrication et a un faible impact environnemental.
b. Laine de verre > polystyrène expansé > ouate de cellulose > paille > air.
c. Laine de verre \approx polystyrène expansé > ouate de cellulose > air > paille.
3. Schéma du triple vitrage (4-16-4-16-4) :



Calculons la résistance thermique pour 1 m^2 de vitrage :

- Double vitrage (4-16-4) :

$$R_{th} = R_{th}(\text{verre}) + R_{th}(\text{air}) + R_{th}(\text{verre}) = 2 R_{th}(\text{verre}) + R_{th}(\text{air})$$
$$R_{th} = 2 \times \frac{4,0 \times 10^{-3}}{1,2} + \frac{16 \times 10^{-3}}{0,026} = 0,62 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

- Triple vitrage (4-16-4-16-4) :

$$R_{th} = 3R_{th}(\text{verre}) + 2R_{th}(\text{air}) = 1,24 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Le triple vitrage offre bien une meilleure isolation puisque la résistance thermique R_{th} est plus élevée.

2. a. Chauffage, ascenseurs, éclairage...

b. La consommation d'énergie théorique est de $15,1 \text{ kWep/m}^2/\text{an}$ alors que la consommation réelle est de $49,6 \text{ kWep/m}^2/\text{an}$. Les mesures montrent une différence de $34,5 \text{ kWep/m}^2/\text{an}$ soit une consommation réelle environ trois fois plus grande que celle estimée. Si l'on compare poste par poste, on s'aperçoit que la consommation réelle :

- du chauffage est environ 3 fois plus grande ;
- des pompes et auxiliaires est environ 2 fois plus grande ;
- de l'activité professionnelle est environ 2 fois plus grande.

La différence s'explique par une consommation d'énergie excessive au niveau de ces postes.

Par contre, certains postes consomment moins ou sont conformes aux prévisions.

Quant à la production d'énergie photovoltaïque, elle est aussi conforme aux estimations.

Le comportement des usagers permettra de réduire les consommations et les dépenses énergétiques. Le bâtiment sera peut-être alors considéré comme à « énergie positive ».

3. 1. Équivalent CO₂ : il existe plusieurs gaz à effet de serre. Le dioxyde de carbone (CO₂) est le plus connu et le plus courant, il sert de référence. Par exemple, 1 kg de méthane agit comme l'équivalent de 21 kg de CO₂.

2. Une maison individuelle de surface habitable égale à 110 m² consomme par an 3,5×10¹⁰ J pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire.

L'énergie consommée en kWh vaut :

$$\mathcal{E} = \frac{3,5 \times 10^{10}}{3,6 \times 10^6} = 9\,722 \text{ kWh}$$

Soit une énergie consommée de 9,7×10³ kWh par an et pour une maison de 110 m².

On préfère utiliser cette unité plutôt que le joule car cela donne des valeurs plus appréhendables et c'est une unité plus facile à utiliser.

Il s'agit d'une énergie finale car utilisée par le consommateur.

La maison consomme une énergie finale de 9,7×10³ kWh par an et pour une surface de 110 m² :

$$\text{soit } \frac{9,7 \times 10^3}{110} \text{ kWh par m}^2 \text{ et par an, c'est-à-dire } 88 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$$

a. Tout électrique.

Pour que l'utilisateur dispose de 1 kWh d'énergie électrique, il faut qu'une centrale électrique produise 2,58 kWh.

$$\frac{9,7 \times 10^3}{110} \times 2,58 = 227 = 2,3 \times 10^2 \text{ soit } 2,3 \times 10^2 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$$

Soit une consommation d'énergie primaire de 227 kWh·m⁻²·an⁻¹, correspondant à un classement D.

b. D'une chaudière à gaz.

Soit une consommation d'énergie primaire de 88 kWh·m⁻²·an⁻¹, correspondant à un classement B.

c. D'un chauffage au bois.

Soit une consommation d'énergie primaire de 88 kWh·m⁻²·an⁻¹, correspondant à un classement B.

Pour le classement relatif à l'émission de gaz à effet de serre, on utilise l'équivalence entre la quantité de CO₂ émise par un combustible et la consommation d'énergie primaire.

a. Tout électrique.

227 × 90 = 20 430 g = 20 kg soit 20 kg de CO_{2eq}·m⁻²·an⁻¹ correspondant à un classement C.

b. D'une chaudière à gaz.

88 × 234 = 20 592 g = 21 kg soit 21 kg de CO_{2eq}·m⁻²·an⁻¹ correspondant à un classement D.

c. D'un chauffage au bois.

88 × 13 = 1 144 g = 1,1 kg soit 1,1 kg de CO_{eq}·m⁻²·an⁻¹ correspondant à un classement A.

C'est le chauffage au bois qui a la meilleure performance énergétique.

4. a. AGV signifie Automotrice à Grande Vitesse.

b. Un train de 200 m de long a une masse de 410 tonnes au lieu de 480 tonnes, soit un gain de 70 tonnes par rapport aux trains concurrents :

$$\frac{70}{410} = 0,17 \text{ soit } 17 \% \text{ de gain sur la masse}$$

c. Le freinage électrodynamique par récupération permet d'économiser de l'énergie en restituant en priorité l'énergie sur le réseau lors des phases de ralentissement et d'arrêt.

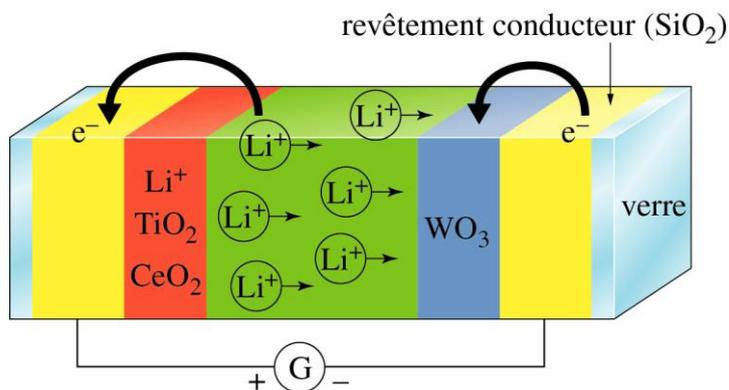
d. L'« électricité sans carbone » est l'électricité produite sans émission de dioxyde de carbone.

e. Les atouts de l'AGV du point de vue du respect de l'environnement sont :

- pas d'émission de CO₂ ;
- 90 % des matériaux utilisés sont recyclables ;
- économie d'énergie de 15 % ;
- peu d'émission sonore.

5. a. La réaction de formation du « bronze de tungstène » est une réduction car c'est un gain d'électrons. WO₃ oxydant.

b. *Dans le manuel élève, les flèches représentant le sens de migration des cations Li⁺ ont été supprimées, car elles indiquaient évidemment la réponse à cette question b.*



c. Ces vitrages permettent d'économiser sur la climatisation sans rien perdre au niveau de l'éclairage et du chauffage. Par conséquent, ils permettent de faire des économies d'énergie.

6. Le transport fluvial est l'un des modes de transport alternatif au transport routier, transport qui va se développer dans les prochaines années du fait du Grenelle de l'environnement.

En effet, le transport fluvial est 3,7 fois plus efficace que le transport routier en équivalent pétrole, consommé par tonne de marchandise transportée. Il permet de transporter aussi bien des passagers que des marchandises, matières premières ou produits finis. Son développement doit permettre de multiplier par quatre environ le transport de marchandises par voie fluviale d'ici 2020. Il sera rendu possible grâce à la nouvelle liaison entre la Seine et le nord de l'Europe (canal Seine-Nord-Europe).

L'avantage majeur du transport fluvial réside dans le fait qu'un convoi fluvial équivaut à 250 camions de 20 tonnes ou à 125 wagons pour une même quantité de marchandises transportée. Certes, le transport fluvial émet deux fois plus de dioxyde de carbone et consomme environ six fois plus d'énergie par tonne de marchandises transportée et par kilomètre parcouru que le transport ferroviaire, mais il reste très compétitif par rapport aux autres modes de transport.

7. a. $M(H) = 1 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $M(C) = 12 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $M(O) = 16 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $M(Na) = 23 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $M(Br) = 80 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

b. Le produit d'intérêt est C₄H₈ :

$$M(C_4H_8) = 4M(C) + 8M(H) = (48 + 8) = 56 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$$

Les réactifs :

$$M(C_4BrH_9) = 4M(C) + 9M(H) + M(Br) = (48 + 9 + 80) = 137 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$$

$$M(NaOC_2H_5) = 2M(C) + M(Na) + 5M(H) + M(O) = 24 + 23 + 5 + 16 = 68 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$$

$$E_{\text{at}} = \frac{M(\text{C}_4\text{H}_8)}{M(\text{NaOC}_2\text{H}_5) + M(\text{C}_4\text{BrH}_9)} = 0,27$$

c. Cette synthèse n'est pas économe en atomes car E_{at} doit être proche de 1 pour que la synthèse soit économe.

d.
$$E_{\text{at}} = \frac{M(\text{C}_4\text{H}_8)}{M(\text{C}_4\text{H}_9\text{Br})} = 0,41$$

Cette synthèse est plus économe en atomes que la précédente, mais elle n'est pas économe en énergie thermique, c'est pourquoi elle n'est pas intéressante du point de vue de la chimie durable.

8. a. Le solvant permet la mise en contact des réactifs.

L'éthanol, l'hexane, le cyclohexane et le dichlorométhane sont des solvants utilisés au lycée.

b. Des solides ne peuvent entrer en contact sans solvant.

c. Le chlorure de sodium ne satisfait pas au critère nécessaire à une bonne solvatisation : « mise en contact effectif des molécules réactives ». Il n'ajuste pas la viscosité du milieu réactionnel et il ne peut pas assurer le rôle de tampon thermique.

d. La vaporisation des solvants traditionnels est l'une des sources de pollution de l'air.

9. 1^{re} proposition de correction

Voyons, pour chaque procédé, quels sont :

- les principes de la chimie verte qui sont appliqués :

- la synthèse au lycée est réalisée à pression atmosphérique ;
- la synthèse industrielle utilise un catalyseur ; elle satisfait à l'économie d'atomes puisque la seule molécule produite hors le produit d'intérêt est H₂O. Le toluène qui n'a pas réagi est recyclé. Les impuretés sont facilement éliminées car présentes dans le sous-produit.

- les principes qui ne sont pas appliqués :

- la synthèse au lycée n'est pas économe en atomes, notamment elle produit de l'oxyde de manganèse MnO₂ qui contient un métal « lourd », donc polluant. Elle nécessite un chauffage et n'est donc pas très économe en énergie. Elle consomme beaucoup d'eau (chauffage à reflux, rinçage) ;
- la synthèse industrielle nécessite une pression de 2,5 bar.

2^e proposition de correction

L'acide benzoïque est un produit utilisé dans l'industrie agroalimentaire. Il peut être synthétisé en petites quantités au laboratoire ou en plus grande quantité dans l'industrie.

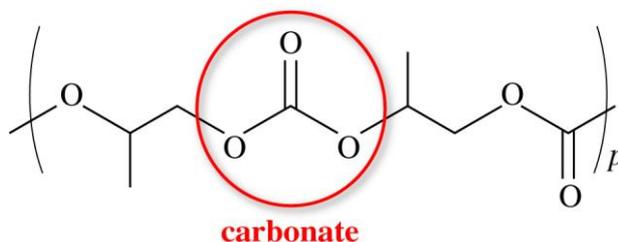
L'équation de la réaction réalisée au lycée met en évidence la formation de sous-produits comme le dioxyde de manganèse. De manière moins évidente, les ions permanganate sont apportés par le sel de potassium correspondant. Puis l'acidification est réalisée par de l'acide chlorhydrique ; on forme donc aussi comme sous-produit de chlorure de potassium KCl. Par contre, la synthèse industrielle ne fait mention que d'eau comme sous-produit.

La synthèse industrielle semble donc réaliser une plus forte économie d'atomes.

Lors de la synthèse au lycée, un auxiliaire de synthèse est utilisé : de l'acide chlorhydrique. La synthèse industrielle fait mention de l'utilisation de charbon actif, mais celui-ci est recyclé. La synthèse au lycée utilise un chauffage à reflux (environ 100 °C puisque le solvant est l'eau) à pression atmosphérique tandis que la synthèse industrielle nécessite une température et une pression plus élevées, ce qui est coûteux d'un point de vue énergétique. Enfin, la synthèse industrielle utilise un catalyseur, ce qui n'est pas le cas de la synthèse au lycée.

Ainsi, la synthèse industrielle respecte mieux les points 1, 2, 5 et 9 des principes de la chimie verte, tandis que la synthèse au lycée respecte mieux le point 6. L'impact environnemental de la synthèse industrielle est moindre que celle au lycée.

10. a. Dans le polymère, le carbone doublement lié à l'oxygène va bien être lié par ailleurs avec 2 atomes d'oxygène. Ci-contre un exemple avec deux motifs consécutifs du polymère.



b. Danger du phosgène (COCl_2) :

à température ambiante, c'est un gaz, volatile mais plus lourd que l'air. Son odeur de foin est relativement discrète et permet mal de détecter sa présence. En cas d'inhalation, le phosgène réagit avec l'eau contenue dans les poumons pour former de l'acide chlorhydrique qui attaque l'organisme. Selon la quantité de gaz inhalé, les conséquences peuvent aller de troubles respiratoires à l'œdème pulmonaire et à la mort.

c. Le dioxyde de carbone est un produit de transformations chimiques dont les molécules carbonées sont les réactifs, le dioxyde de carbone n'est donc pas réactif avec les molécules carbonées car cette transformation correspond à la réaction inverse de la précédente.

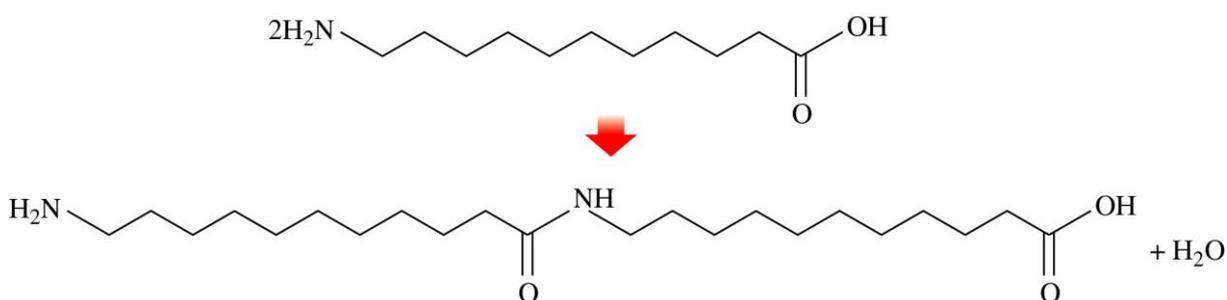
d. Le dioxyde de carbone est un gaz à effet de serre dont il faut se débarrasser, tandis que les polycarbonates possèdent de nombreuses applications dont voici certains exemples sur le site Internet de la société Novomer : http://www.novomer.com/?action=CO2_commercialization

11. a. Le ricin n'entre pas en compétition avec les cultures alimentaires et demande peu d'eau.

b. Pharmacie, automobile, ameublement, bâtiment.

c. Elle a une grande affinité pour les surfaces métalliques (qualités de mouillage). Son point éclair est de seulement de $229\text{ }^\circ\text{C}$, alors qu'elle ne s'enflamme qu'à $449\text{ }^\circ\text{C}$. L'huile de ricin améliore son pouvoir lubrifiant quand sa température augmente : elle polymérise rapidement lorsque cette température s'élève et donne une huile de plus en plus chargée en esters ; ces esters ne commencent à se décomposer qu'autour de $343\text{ }^\circ\text{C}$.

d. Il se forme de l'eau.



12. a. Le TMDS est un sous-produit de l'industrie du silicone, son utilisation permet donc de faire du recyclage dans l'industrie chimique.

b. Le sous-produit obtenu en fin de réaction peut être valorisé (notamment pour le traitement hydrofuge des matériaux).

c. Dans le texte il est dit : « Le TMDS est facile à travailler dans des conditions proches de la stoechiométrie. »

Il faut une mole de TMDS pour réduire une mole d'amide.

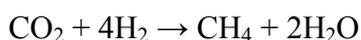
13. a. Les conditions opératoires (catalyseur, température et pression) ne sont pas mentionnées.

b. Le méthanol est utilisé essentiellement dans la production de produits chimiques et comme combustible (carburant : pile à combustible au méthanol). C'est un bon solvant.

Il est utilisé de plus en plus dans le traitement des eaux usées et dans la production du biodiesel.

Le méthanol intervient dans la production du formaldéhyde, de l'acide acétique et de toute une gamme de produits intermédiaires qui serviront à créer d'autres dérivés chimiques (estérification...). Ces dérivés sont utilisés dans un vaste éventail de produits dont le contreplaqué, les panneaux de particules, les mousses, les résines et les plastiques.

c. Méthode de Sabatier :



Une température et une pression élevées sont nécessaires, ce qui rend la synthèse coûteuse énergétiquement. Le catalyseur (nickel) est un métal rare et coûteux.

d. Cette synthèse du méthane nécessite de l'énergie électrique.

e. Le monoxyde de carbone permet de synthétiser des hydrocarbures autres que le méthane.

14. Les documents 2, 3 et 4 permettent d'illustrer principalement les points 1 (éviter les rejets plutôt que d'avoir à les traiter), 2 (économie d'atomes), 5 (limiter les auxiliaires de synthèse) et 9 (rechercher les solutions catalytiques) du premier document.

Selon le deuxième document, l'utilisation des agroressources a fait considérablement augmenter la production d'un sous-produit, le glycérol. Des chimistes ont alors développé des synthèses de molécules tensioactives (de type étheroxyde) à partir de ce glycérol. Historiquement, la synthèse d'étheroxydes se faisait par la synthèse de Williamson, générant des quantités stœchiométriques de sels. La méthode développée par les auteurs de l'article est une synthèse catalysée, utilisable dans l'industrie, utilisant presque tous les atomes des réactifs, et ne formant que de l'eau comme sous-produit. D'autre part, le glycérol étant à la fois le réactif et le solvant de la réaction, cette méthode limite les auxiliaires de synthèse.

Le deuxième document présente une réaction dont l'économie d'atomes est optimisée puisqu'elle ne génère aucun sous-produit : la synthèse des esters symétriques de Tishchenko se fait par dimérisation des aldéhydes. Cette réaction se fait grâce à l'utilisation de catalyseurs adaptés à base de ruthénium.

Enfin, le quatrième document montre comment le chimiste contribue à la dépollution de la nature au travers de deux exemples : la dépollution des gaz d'échappements dans les pots catalytiques et le traitement des eaux usées par une méthode photochimique.

Il est marquant de constater que l'ensemble des méthodes décrites utilisent des catalyseurs. Il semble donc qu'un des enjeux majeurs de la chimie moderne soit de développer des catalyseurs toujours plus efficaces et plus spécifiques.

Chapitre 22 – Contrôle de la qualité : dosages par étalonnage

Manuel pages 445 à 462

Choix pédagogiques

Ce chapitre a pour objectifs d'aborder (ou de revoir) :

- le dosage par étalonnage ;
- la conductimétrie ;
- la spectrophotométrie et la loi de Beer-Lambert.

Les activités de ce chapitre permettent de découvrir la conductimétrie et d'appliquer cette technique, ainsi que la spectrophotométrie, à des dosages par étalonnage.

Des animations, des vidéos documentaires et d'expériences illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et, certaines d'entre elles, sur les sites Internet compagnon Sirius.

Page d'ouverture

La photographie montre un homme en train de traire une vache à la main.

Les élèves peuvent alors évoquer les conditions d'hygiène, et se demander si le lait est consommable ou pas. On peut alors introduire la notion de contrôle de qualité.

Cette photographie permet ainsi d'introduire la première activité qui porte justement sur le contrôle de qualité du lait.

Activités

Activité documentaire 1. Contrôle de qualité du lait

Commentaires

Cette activité permet d'introduire la notion de contrôle de qualité, en particulier dans le domaine de l'alimentaire. Elle permet également d'introduire la notion de conductivité, notion qui est développée dans la partie « Cours » de ce chapitre. Par ailleurs, les élèves peuvent commencer à faire le lien entre les pratiques chimiques vues au lycée, et leurs applications dans le domaine de l'industrie.

Réponses

1. Faire une recherche

a. Germe : organisme microscopique susceptible d'entraîner une infection.

Cellule somatique : toutes les cellules animales à l'exception des cellules sexuelles (ou germinales). Dans le cas de la vache, les cellules somatiques présentes dans son lait sont essentiellement des globules blancs.

Organoleptique : se dit d'une substance perceptible par les organes des sens (vue, odorat, goût, toucher).

b. Le contrôle du lait commence dès la traite. Il est ensuite analysé à son arrivée à la laiterie, puis tout au long de sa transformation (fromage, yaourt, beurre, crème, etc.)

2. Analyser les documents

a. Les critères de qualité répondent à des normes bien définies ; il est donc indispensable de faire appel à des personnes qualifiées pour effectuer ces contrôles.

b. Les critères de qualité ne sont pas uniquement « chimiques », en atteste le document 2.

Critères chimiques	Critères physiques	Critères biologiques
- le pH	- la densité - la température d'ébullition - la température de fusion	- les germes totaux - les cellules somatiques

c. Le lait analysé dans le document 2 n'est pas consommable car le nombre de germes totaux dépasse 100 000 par mL de lait.

3. Rédiger une synthèse de documents

Lors du contrôle de la qualité du lait, divers critères sont analysés. Ces critères sont définis par des normes quantitatives. Pour déterminer des quantités de matières d'espèces chimiques dans le lait, on fait appel à des chimistes. Lorsque l'on a besoin de déterminer des concentrations de bactéries ou de germes dans le lait, on fait alors appel à un biologiste.

Le scientifique est donc indispensable lors du contrôle de qualité.

Activité expérimentale 2. Mesures de conductivité

Commentaires

Au cours de la première expérience, les élèves découvrent le conductimètre, la cellule de conductimétrie et apprennent à faire des mesures de conductivité. L'analyse des mesures permet de constater que la nature des ions influence la conductivité. Lors de la deuxième expérience, les élèves doivent réaliser des dilutions et choisir la bonne pipette jaugée.

À l'issue des dilutions, les mesures des conductivités des solutions filles doivent amener les élèves à conclure à une relation de proportionnalité entre la conductivité et la concentration.

Liste du matériel : une cellule de conductimétrie reliée à un conductimètre ; au moins trois béchers de prélèvement ; deux fioles jaugées de 100 mL ; deux fioles jaugées de 50,0 mL ; une pipette jaugée de 25,0 mL ; deux pipettes jaugées de 20,0 mL ; une pipette jaugée de 10,0 mL.

Liste des solutions : eau ; acide chlorhydrique à $1,0 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$; solution de chlorure de sodium à $1,0 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

Réponses

Expérience 1

Solution	S	S'
$\sigma \text{ (mS}\cdot\text{m}^{-1}\text{)}$	43,1	12,8

1. Observer

a. Les solutions S et S' , de même concentration en soluté apporté, ont des conductivités différentes. Celle de l'acide chlorhydrique est supérieure à celle de la solution de chlorure de sodium.

b. Les solutions S et S' diffèrent par la nature de leurs cations.

2. Interpréter

Les solutions S et S' ont la même concentration molaire en soluté apporté. Elles contiennent l'ion chlorure Cl^- , dont la concentration est identique dans les deux solutions.

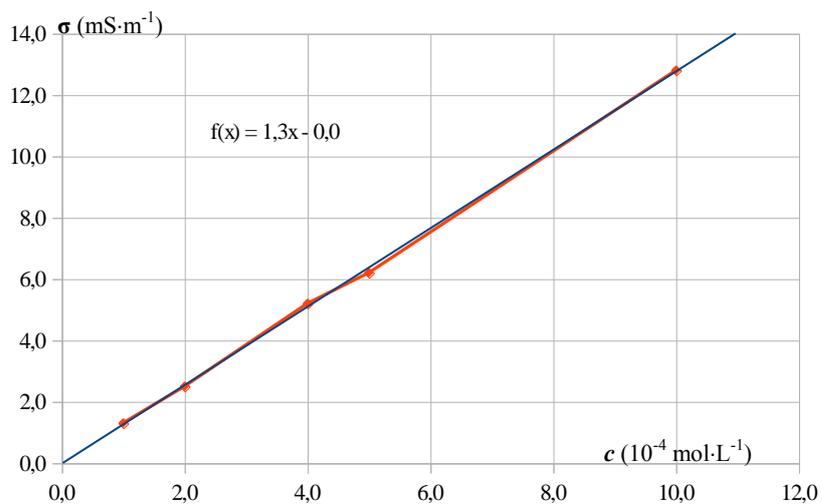
La concentration molaire en cation (ion sodium et ion oxonium) est également la même dans les deux solutions, seule la nature du cation change. Les solutions S et S' n'ayant pas les mêmes valeurs de conductivités, on peut en déduire que la nature de l'ion influence la conductivité.

Expérience 2

Solution	S'	S_1	S_2	S_3	S_4
Concentration c (en $10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	10	5,0	4,0	2,0	1,0
Volume de la fiole jaugée utilisée (mL)	-	50,0	50,0	100	100
Volume V de l'échantillon à prélever (mL)	-	25,0	20,0	20,0	10,0
Conductivité σ (mS \cdot m $^{-1}$)	12,8	6,3	5,1	2,5	1,3

3. Interpréter et conclure

a. et b.



c. L'équation de la courbe de tendance est :

$$\sigma = 1,3 \times c$$

Attention : σ est en $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$ et c est en $10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

d. La courbe obtenue est une droite passant par l'origine du repère. La conductivité et la concentration d'une solution ionique sont proportionnelles.

Activité expérimentale 3. Dosage du fer dans un médicament

Commentaires

Cette activité permet d'effectuer un contrôle de qualité sur un médicament. Elle repose sur une méthode de dosage par étalonnage, méthode déjà mise en place en classe de 1^{re} S (page 118 du livre Sirius 1^{re} S). Toutefois, bien qu'il s'agisse encore d'un dosage spectrophotométrique, le protocole expérimental est un peu plus élaboré, et l'exploitation des résultats demande plus de réflexion.

Liste du matériel : un spectrophotomètre ; sept cuves (dont une pour « le blanc ») ; six tubes à essais ; trois pipettes graduées de 5 mL ; une pipette graduée de 2 mL ; une pipette graduée de 1 mL.

Liste des solutions : eau ; solution d'éthanoate de sodium à 180 g·L⁻¹ ; solution de sulfate d'hydroxylammonium à 1 g·L⁻¹ ; solution d'orthophénantroline à 10 g·L⁻¹ ; solution à doser obtenue par dissolution d'une gélule de TimoFero^l® dans 2,00 L d'eau ; solution de sel de Mohr à 0,35 g·L⁻¹ (*dans le spécimen, il est écrit aussi « en ions Fe²⁺ » : c'est une erreur qui a été corrigée dans le manuel élève*).

Remarque : pour faciliter la dissolution de la gélule de TimoFero^l®, on ajoute 50 mL d'acide sulfurique à 1 mol·L⁻¹ dans la fiole jaugée. Il faut agiter la solution pendant au moins 15 minutes.

Réponses

1. Comprendre le protocole

Les ions Fe²⁺ réagissent avec l'orthophénantroline selon une réaction quasi-totale pour former une espèce colorée : l'ion triorthophénantroline fer (II). L'absorbance mesurée est proportionnelle à la concentration en ions triorthophénantroline fer (II). Afin d'être certain que la quantité d'ions triorthophénantroline fer (II) présente dans un tube à essais corresponde bien à la quantité d'ions Fe²⁺ initialement introduit, on ajoute l'orthophénantroline en excès.

2. Exploiter les résultats

$$a. [\text{Fe}^{2+}]_{\text{Mohr}} = c_{\text{Mohr}} = \frac{c_{\text{m, Mohr}}}{M_{\text{Mohr}}} = \frac{0,35}{392,1} = 8,9 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

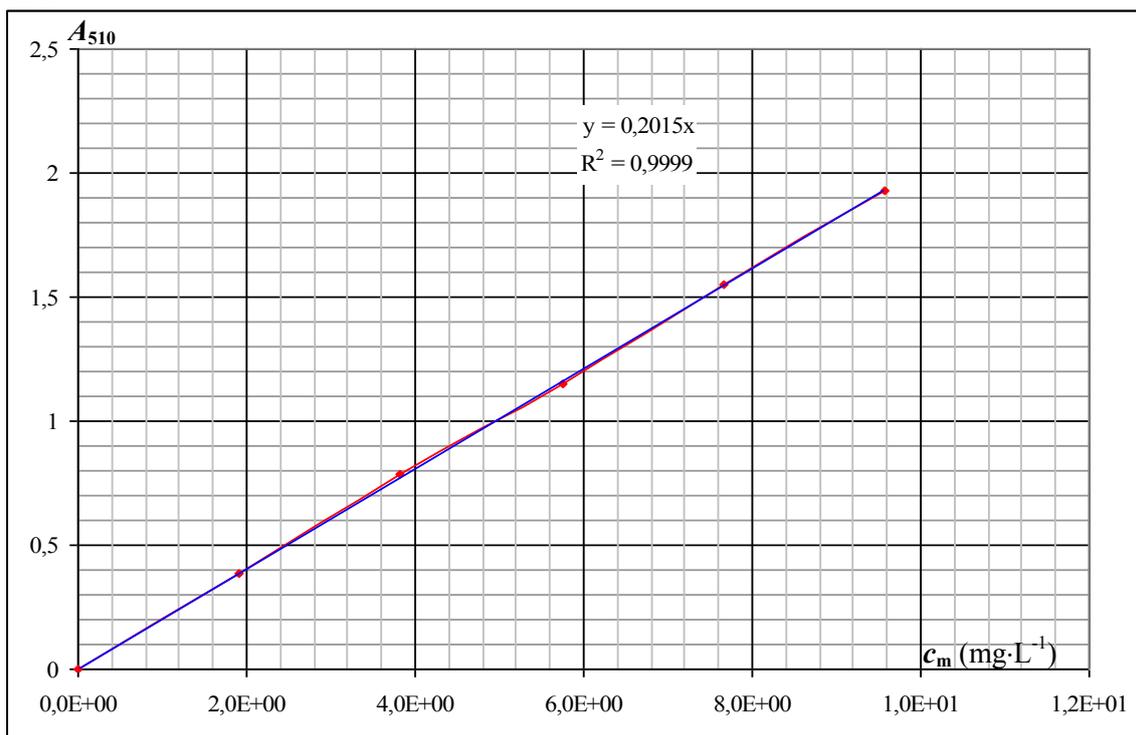
$$c_{\text{m}, i} = \frac{[\text{Fe}^{2+}]_{\text{Mohr}} \times M(\text{Fe}) \times V_{S, i}}{V_{\text{T}}} = \frac{4,98 \times 10^{-2} \times V_{S, i}}{13} \text{ avec } V_{S, i} \text{ en mL.}$$

Tube à essais	1	2	3	4	5
c_{m} (en mg·L ⁻¹)	1,9	3,8	5,7	7,7	9,6
$A_{510, i}$	0,3845	0,7837	1,1502	1,5489	1,9258

Pour le tube à essais n°6, l'absorbance est :

$$A_{510, 6} = 0,9492$$

b. et c.



d. L'équation de la droite obtenue est :

$$A_{510} = 0,2015 \times c_m \quad (c_m \text{ en } \text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$$

La concentration $c_{m,6}$ en ions fer (II) dans la solution du tube à essais n°6 est donnée par la relation :

$$c_{m,6} = \frac{A_{510,6}}{0,2015} = \frac{0,9492}{0,2015} = 4,7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$$

3. Conclusion

a. La solution du tube à essais n°6 a été préparée en ajoutant 2,5 mL de solution S_0 , le volume final de ce tube étant de 13 mL.

D'où :

$$[\text{Fe}^{2+}]_{S_0} = \frac{V_T \times c_{m,6}}{V_{S,6}} = \frac{13 \times 4,7}{2,5} = 24 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$$

b. La solution S_0 a été préparée en dissolvant le contenu d'une gélule dans 2,00 L d'eau :

$$[\text{Fe}^{2+}]_{S_0} = \frac{m_{\text{fer}}}{2,00}$$

D'où :

$$m_{\text{fer}} = 24 \times 2,00 = 48 \text{ mg}$$

Une gélule de TimoFero^l® contient donc 48 mg de fer.

c. La masse de fer trouvée expérimentalement correspond bien à l'indication portée sur la boîte de TimoFero^l® (50 mg de fer). L'écart obtenu est dû à l'incertitude :

- sur le volume de la fiole jaugée lors de la préparation de la solution S_0 ;
- sur les volumes prélevés lors de la préparation de la gamme étalon ;
- sur la concentration de la solution de sel de Mohr.

Activité expérimentale 4. Quelle utilisation pour ce bidon ?

Commentaires

Cette activité est une démarche d'investigation. Les élèves doivent déterminer la concentration d'une solution de lessive Saint-Marc[®] en réalisant un dosage par étalonnage.

À la différence des autres dosages par étalonnage où le protocole est donné, les élèves doivent eux-mêmes déterminer les concentrations des solutions étalons. Compte tenu du matériel mis à disposition, ils doivent préparer quatre solutions étalons.

Une fois la gamme prête, il ne reste plus qu'à effectuer des mesures de conductivités et à exploiter la droite d'étalonnage.

Liste du matériel : une cellule de conductimétrie reliée à un conductimètre ; deux béchers de prélèvement ; deux fioles jaugées de 100 mL ; deux fioles jaugées de 50,0 mL ; une pipette graduée de 10,0 mL.

Liste des solutions : eau ; solution Saint-Marc[®] du bidon diluée cent fois (solution obtenue par dissolution d'environ 80 g de Saint-Marc Cristaux de soude[®] dans un litre d'eau) ; solution de carbonate de sodium hydraté à 50 mmol·L⁻¹ (*dans le spécimen, il est écrit « solution de carbonate de sodium hydraté à 5,0 mmol·L⁻¹ » : c'est une erreur qui a été corrigée dans le manuel élève en « 50 mmol·L⁻¹ »*).

Réponses

1. Formuler des hypothèses

La solution contenant des ions, on peut envisager une méthode conductimétrique pour déterminer sa concentration. La présence de la cellule de conductimétrie et du conductimètre confirme cette idée.

2. Débattre

On peut envisager dans un premier temps de faire une mesure directe de la conductivité de la solution diluée et d'utiliser la relation de proportionnalité entre la conductivité et la concentration. Toutefois, l'incertitude sera élevée dans ce cas.

On peut alors envisager de faire un dosage par étalonnage pour diminuer cette incertitude.

Il faut également déterminer les concentrations des solutions étalons, en s'aidant de la verrerie mise à disposition.

3. Expérimenter pour conclure

a. Protocole à réaliser :

- Préparer quatre solutions étalons, à partir de la solution S_0 , en respectant les volumes donnés dans le tableau ci-dessous.

Solution fille S_i	1	2	3	4
V_S (en mL)	2,0	8,0	7,0	10
V_{fiole} (en mL)	100	100	50	50
c_i (en mmol·L ⁻¹)	1,0	4,0	7,0	10

- Mesurer la conductivité σ_i des solutions étalons S_i , puis celle de la solution Saint-Marc[®] diluée cent fois.

- À l'aide d'un tableau-grapheur, placer les points d'abscisses c_i et d'ordonnée σ_i .

- En utilisant l'outil « courbe de tendance », tracer la courbe d'étalonnage et noter l'équation de cette courbe.

- En déduire la concentration de la solution diluée, puis celle du bidon.

b. Une fois que l'on connaît la concentration molaire de la solution du bidon, il faut calculer la concentration massique de cette même solution :

$$c_m = M (\text{carbonate de sodium hydraté}) \times c = 286,14 \times c$$

Cette concentration étant comprise entre $50 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ et $100 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, on en conclut que le bidon a été préparé pour faire la vaisselle ou pour lessiver les murs.

Exercices d'application

5 minutes chrono !

1. Mots manquants

- conductivité
- conduire le courant électrique
- élevée / grande
- d'étalonnage
- Beer-Lambert

2. QCM

- Ions.
- Conduire le courant électrique.
- $S \cdot m^{-1}$.
- $mol \cdot m^{-3}$.
- D'une même solution ionique à des concentrations différentes.
- $1,1 \times 10^{-1}$. *Dans le spécimen, la bonne réponse n'apparaît pas parmi les trois propositions du QCM. Cette erreur a été corrigée dans le manuel élève, aussi bien dans la question f. que dans les corrigés, page C-4. La deuxième proposition, et la bonne réponse, est donc bien « $1,1 \times 10^{-1}$ ».*

Compétences exigibles

3. La conductivité σ de la solution est donnée par la relation :

$$\sigma = \lambda_{Ag^+}[Ag^+] + \lambda_{NO_3^-}[NO_3^-]$$

Les concentrations molaires en ions doivent être exprimées en $mol \cdot m^{-3}$.

D'où :

$$[Ag^+] = [NO_3^-] = c = 2,0 \text{ mol} \cdot m^{-3}$$
$$\sigma = (6,19 \times 10^{-3} \times 2,0) + (7,14 \times 10^{-3} \times 2,0) = 2,7 \times 10^{-2} \text{ S} \cdot m^{-1}$$

4. La conductivité σ de la solution est donnée par la relation :

$$\sigma = \lambda_{Na^+}[Na^+] + \lambda_{SO_4^{2-}}[SO_4^{2-}]$$

Les concentrations doivent être exprimées en $mol \cdot m^{-3}$:

$$[Na^+] = 4,8 \text{ mol} \cdot m^{-3} \quad \text{et} \quad [SO_4^{2-}] = 2,4 \text{ mol} \cdot m^{-3}$$

D'où :

$$\sigma = (5,01 \times 10^{-3} \times 4,8) + (16,0 \times 10^{-3} \times 2,4) = 6,2 \times 10^{-2} \text{ S} \cdot m^{-1}$$

5. La conductivité σ de la solution est donnée par la relation :

$$\sigma = \lambda_{Na^+}[Na^+] + \lambda_{HO^-}[HO^-] = (\lambda_{Na^+} + \lambda_{HO^-}) \times c \quad \text{car} \quad [Na^+] = [HO^-] = c$$

D'où :

$$c = \frac{\sigma}{\lambda_{Na^+} + \lambda_{HO^-}} = \frac{0,144}{5,01 \times 10^{-3} + 19,9 \times 10^{-3}} = 5,78 \text{ mol} \cdot m^{-3}$$

Soit :

$$c = 5,78 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot L^{-1} = 5,78 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$$

6. Les conductivités σ_1 et σ_2 des deux solutions ioniques sont données par les relations :

$$\sigma_1 = \lambda_{Fe^{2+}}[Fe^{2+}] + \lambda_{SO_4^{2-}}[SO_4^{2-}] \quad \text{et} \quad \sigma_2 = \lambda_{Pb^{2+}}[Pb^{2+}] + \lambda_{SO_4^{2-}}[SO_4^{2-}]$$

Or :

$$[Fe^{2+}] = [SO_4^{2-}] = [Pb^{2+}] = [SO_4^{2-}] = c$$

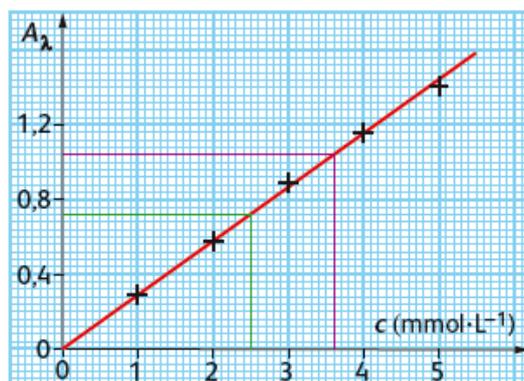
D'où : $\sigma_1 = (\lambda_{\text{Fe}^{2+}} + \lambda_{\text{SO}_4^{2-}}) \times c$ et $\sigma_2 = (\lambda_{\text{Pb}^{2+}} + \lambda_{\text{SO}_4^{2-}}) \times c$

La conductivité σ_2 étant plus grande que la conductivité σ_1 , la conductivité ionique molaire de l'ion plomb Pb^{2+} : $\lambda_{\text{Pb}^{2+}}$ est donc supérieure à celle de l'ion fer II Fe^{2+} .

L'ion plomb Pb^{2+} conduit plus facilement le courant électrique que l'ion fer II Fe^{2+} .

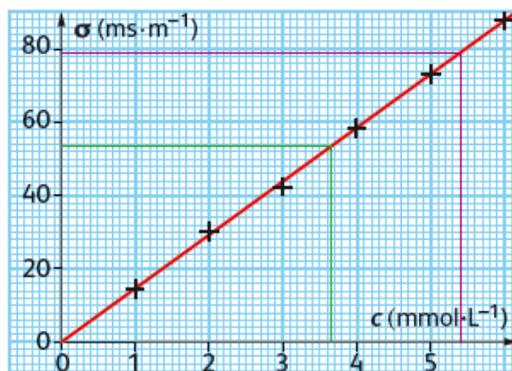
7. a. Par lecture graphique, on trouve $c = 3,6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$.

b. Par lecture graphique, on trouve $A'_{400} = 0,72$.



8. a. Par lecture graphique, on trouve : $c = 3,7 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$.

b. Par lecture graphique, on trouve : $\sigma' = 79 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$.



9. a. La grandeur σ est la conductivité d'une solution et la grandeur λ est la conductivité ionique molaire.

b. La grandeur A_λ est l'absorbance (à la longueur d'onde λ) d'une solution.

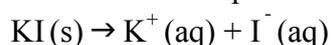
c. La grandeur $(\epsilon_\lambda \ell)$ représente l'absorbance ionique molaire.

Compétences générales

10. $\sigma_1 = 0,059 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1} = 5,9 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$;
 $\sigma_2 = 0,706 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1} = 0,0706 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$;
 $\sigma_3 = 0,340 \text{ mS}\cdot\text{mm}^{-1} = 0,340 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$.

11. Solution d'iodure de potassium :

a. Équation de dissolution dans l'eau de l'iodure de potassium :



b. D'après l'équation de dissolution :

$$[K^+] = [I^-] = c = 2,00 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} = 2,00 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$$

c. La conductivité σ de la solution est donnée par la relation :

$$\sigma = \lambda_{K^+}[K^+] + \lambda_{I^-}[I^-]$$

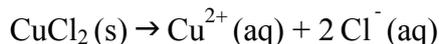
$$\sigma = (\lambda_{K^+} + \lambda_{I^-}) \times c$$

$$\sigma = (7,35 \times 10^{-3} + 7,70 \times 10^{-3}) \times 2,00 = 0,0301 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\sigma = 30,1 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$$

Solution de chlorure de cuivre :

a. Équation de dissolution dans l'eau du chlorure de cuivre :



b. D'après l'équation de dissolution :

$$[\text{Cu}^{2+}] = c = 2,00 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} = 2,00 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$[\text{Cl}^-] = 2c = 4,00 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} = 4,00 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$$

c. La conductivité σ de la solution est donnée par la relation :

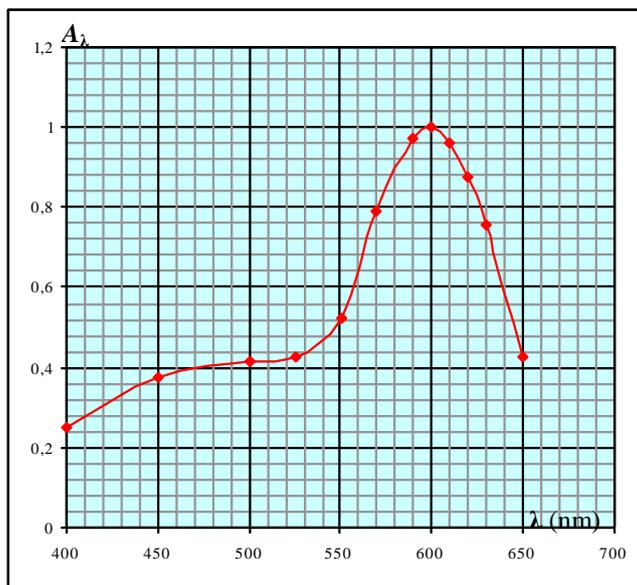
$$\sigma = \lambda_{\text{Cu}^{2+}}[\text{Cu}^{2+}] + \lambda_{\text{Cl}^-}[\text{Cl}^-]$$

$$\sigma = (\lambda_{\text{Cu}^{2+}} + 2\lambda_{\text{Cl}^-}) \times c$$

$$\sigma = (10,7 \times 10^{-3} + 2 \times 7,63 \times 10^{-3}) \times 2,00 = 0,0519 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\sigma = 51,9 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$$

12. a.



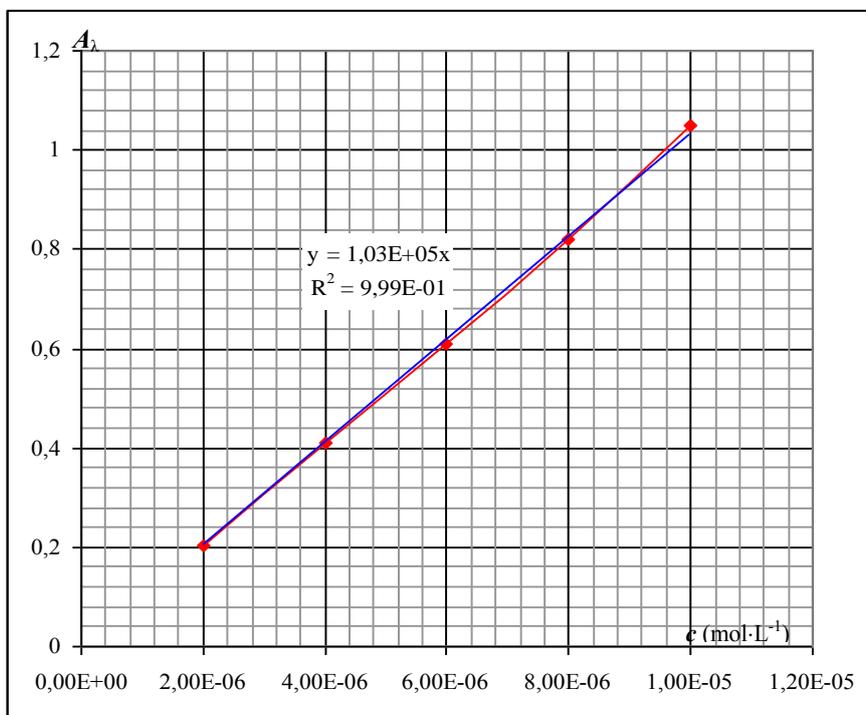
b. Afin d'avoir des incertitudes de mesure les plus faibles possibles, on réalise les mesures d'absorbance à la longueur d'onde λ_{max} correspondant au maximum d'absorption.

c. Sur le graphique, on repère l'absorbance maximale pour la longueur d'onde $\lambda_{\text{max}} = 600 \text{ nm}$.

Exercices de méthode

13. Exercice résolu.

14. a. b. et c.



d. La droite obtenue passe près des points car le coefficient de détermination R^2 est très proche de 1 ($R^2 = 0,999$).

e. L'équation de la droite obtenue est :

$$A_\lambda = 1,03 \times 10^5 \times c$$

f. D'après la loi de Beer-Lambert :

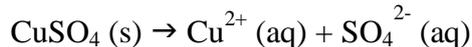
$$\epsilon_\lambda \ell = \frac{A_\lambda}{c} = 1,03 \times 10^5 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$$

g. D'après la loi de Beer-Lambert :

$$c' = \frac{A_\lambda'}{\epsilon_\lambda \ell}$$

$$c' = \frac{0,530}{1,03 \times 10^5} = 5,15 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

15. a. Équation de dissolution dans l'eau du sulfate de cuivre :



D'après l'équation de dissolution :

$$[\text{Cu}^{2+}] = [\text{SO}_4^{2-}] = c$$

b. La conductivité σ de la solution est donnée par la relation :

$$\sigma = \lambda_{\text{Cu}^{2+}} [\text{Cu}^{2+}] + \lambda_{\text{SO}_4^{2-}} [\text{SO}_4^{2-}]$$

soit :

$$\sigma = (\lambda_{\text{Cu}^{2+}} + \lambda_{\text{SO}_4^{2-}}) \times c \quad \text{car} \quad [\text{Cu}^{2+}] = [\text{SO}_4^{2-}]$$

D'où :
$$c = \frac{\sigma}{\lambda_{\text{Cu}^{2+}} + \lambda_{\text{SO}_4^{2-}}} = \frac{67}{11+16} = 2,5 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$$

Soit :
$$c = 2,5 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} = 2,5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$$

c. La concentration vaut $2,5 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, on a donc dissous une quantité $n = 2,5 \times 10^{-3} \text{ mol}$ de sulfate de cuivre dans un volume $V = 1,0 \text{ L}$ d'eau.

Or :
$$m = n \times M = n \times (M(\text{Cu}) + M(\text{S}) + 4 \times M(\text{O}))$$

$$m = 2,5 \times 10^{-3} \times (63,5 + 32 + 4 \times 16) = 0,40 \text{ g}$$

Exercices d'entraînement

16. a. Les ions présents dans le mélange sont les ions potassium K^+ , les ions sodium Na^+ et les ions chlorure Cl^- .

b.
$$[\text{K}^+] = \frac{c_1 \times V_1}{V_1 + V_2} = \frac{3,50 \times 10^{-3} \times 30,0}{30,0 + 20,0} = 2,10 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} = 2,10 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$[\text{Na}^+] = \frac{c_2 \times V_2}{V_1 + V_2} = \frac{5,00 \times 10^{-3} \times 20,0}{30,0 + 20,0} = 2,00 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} = 2,00 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$[\text{Cl}^-] = \frac{c_1 \times V_1 + c_2 \times V_2}{V_1 + V_2} = \frac{(3,50 \times 10^{-3} \times 30,0) + (5,00 \times 10^{-3} \times 20,0)}{30,0 + 20,0} = 4,10 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$[\text{Cl}^-] = 4,10 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$$

c. La conductivité σ du mélange obtenu est donnée par la relation :

$$\sigma = \lambda_{\text{K}^+}[\text{K}^+] + \lambda_{\text{Na}^+}[\text{Na}^+] + \lambda_{\text{Cl}^-}[\text{Cl}^-]$$

$$\sigma = (7,35 \times 10^{-3} \times 2,10) + (5,01 \times 10^{-3} \times 2,00) + (7,63 \times 10^{-3} \times 4,10)$$

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-2} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$$

17. a. Le dosage peut être réalisé par spectrophotométrie car l'espèce à doser, le bleu de méthylène, est une espèce colorée.

b. Par lecture graphique : $c_m = 4,0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

c. Le collyre a été dilué 50 fois ; d'où :

$$c_{m,B} = 50 \times c_m = 50 \times 4,0 = 2,0 \times 10^2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$$

d. $m_B = c_{m,B} \times V = 2,0 \times 10^2 \times 0,100 = 20 \text{ mg}$.

e. Cette valeur correspond bien à celle indiquée sur l'étiquette du flacon.

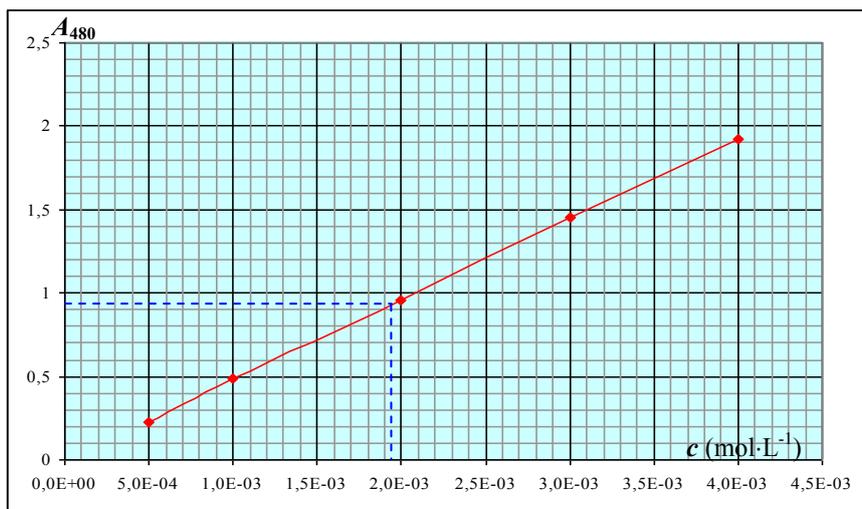
18. 1. a. Au cours d'une dilution, il y a conservation de la quantité de matière :

$$c_0 \times V_i = c_i \times V$$

b.

Solution S_i	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
Volume V_i (mL)	1,0	2,0	4,0	6,0	8,0
Concentration c_i ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	$5,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-3}$	$3,0 \times 10^{-3}$	$4,0 \times 10^{-3}$
Absorbance $A_{480,i}$	0,23	0,49	0,96	1,45	1,92

c.



2. a. Par lecture graphique, on trouve : $c = 1,95 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

La solution de Lugol[®] a été diluée 20 fois d'où :

$$c_L = 20 \times c = 20 \times 1,95 \times 10^{-3} = 3,90 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

b. $n_L = c_L \times V = 3,90 \times 10^{-2} \times 0,100 = 3,90 \times 10^{-3} \text{ mol}$.

$m_L = n_L \times M(\text{I}_2) = 3,90 \times 10^{-3} \times (2 \times 126,9) = 0,990 \text{ g}$.

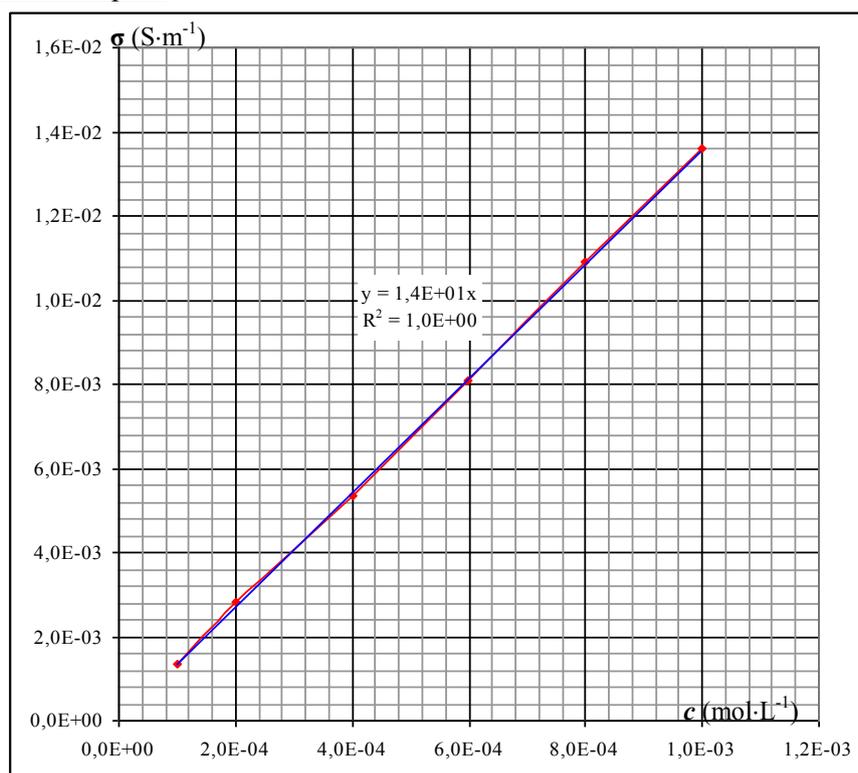
c. Écart relatif :

$$\frac{|1 - 0,99|}{1} \times 100 = 1 \%$$

La valeur de m_L trouvée correspond à celle écrite dans la composition de la solution de Lugol[®].

19. a. et b.

Dosage conductimétrique :

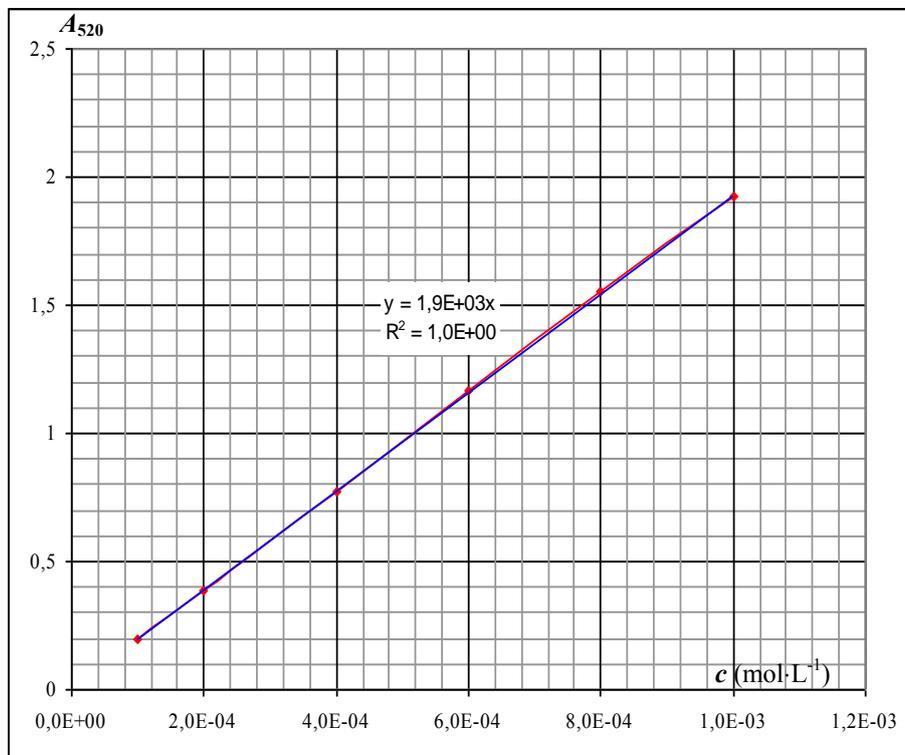


Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 22. Contrôle de la qualité : dosages par étalonnage

L'équation de la droite obtenue est :

$$\sigma = 1,4 \times 10^1 \times c$$

Dosage spectrophotométrique :



L'équation de la droite obtenue est :

$$A_{520} = 1,9 \times 10^3 \times c$$

c. Pour le dosage conductimétrique, la concentration en soluté apporté c_0 est donnée par la relation :

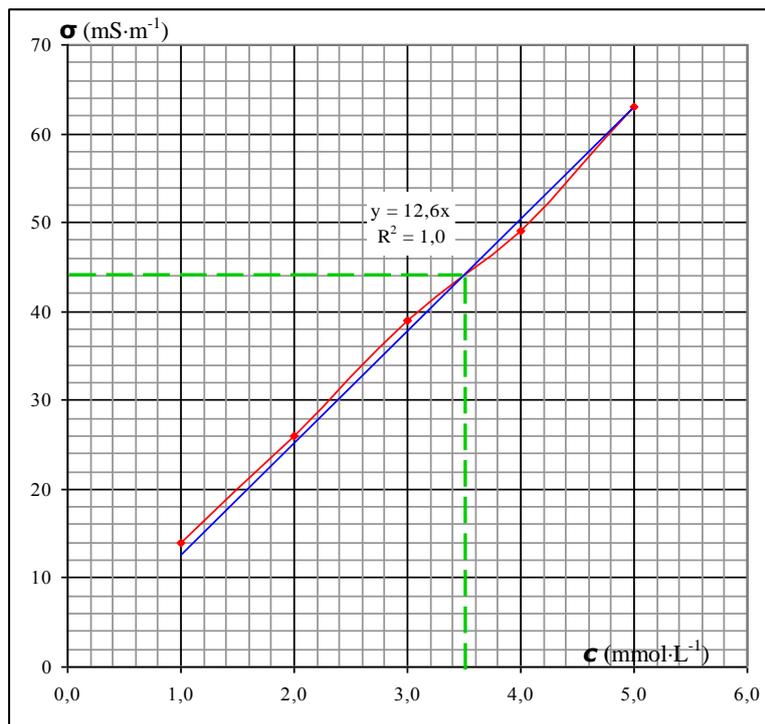
$$c = \frac{\sigma}{1,4 \times 10^1} = \frac{7,40 \times 10^{-3}}{1,4 \times 10^1} = 5,3 \times 10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

Pour le dosage spectrophotométrique, d'après la loi de Beer-Lambert :

$$c_0 = \frac{A_{520,0}}{\epsilon_\lambda \ell}$$
$$c_0 = \frac{1,080}{1,9 \times 10^3} = 5,7 \times 10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

Les valeurs obtenues sont proches l'une de l'autre. L'écart observé est dû à l'incertitude sur la lecture des grandeurs physiques, à savoir la conductivité et l'absorbance.

20. a. et b.



L'équation de la droite obtenue est : $\sigma = 12,6 \times c$ (σ en $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$ et c en $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$).

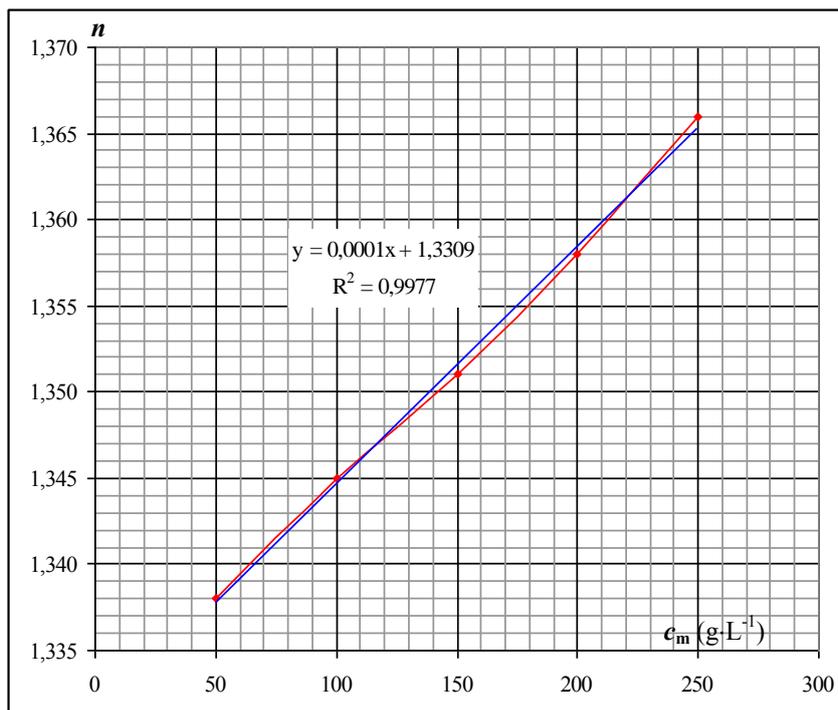
c. Par lecture graphique, on trouve : $c_F = 3,5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$.

La concentration c_F de la solution F est également donnée par la relation :

$$c_F = \frac{\sigma}{12,6} = \frac{44}{12,6} = 3,5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$$

Les résultats obtenus par lecture graphique et par le calcul sont identiques.

21. a.



Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 22. Contrôle de la qualité : dosages par étalonnage

b. L'équation de la droite passant au plus près des points est :

$$n = 0,0001 \times c + 1,3309$$

c. La concentration massique en sucre d'un jus de raisin est donnée par la relation :

$$c_m = \frac{n - 1,3309}{0,0001}$$

Jus de raisin A :

$$c_{m,A} = \frac{1,347 - 1,3309}{0,0001} = 161 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$$

Jus de raisin B :

$$c_{m,B} = \frac{1,360 - 1,3309}{0,0001} = 291 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$$

Le raisin A n'est pas mûr alors que le raisin B est arrivé à maturité.

d. Le raisin vendangé est le raisin B. Pour déterminer le degré d'alcool du vin obtenu, on effectue le calcul suivant :

$$\frac{291 \times 1}{16,83} = 17,3^\circ$$

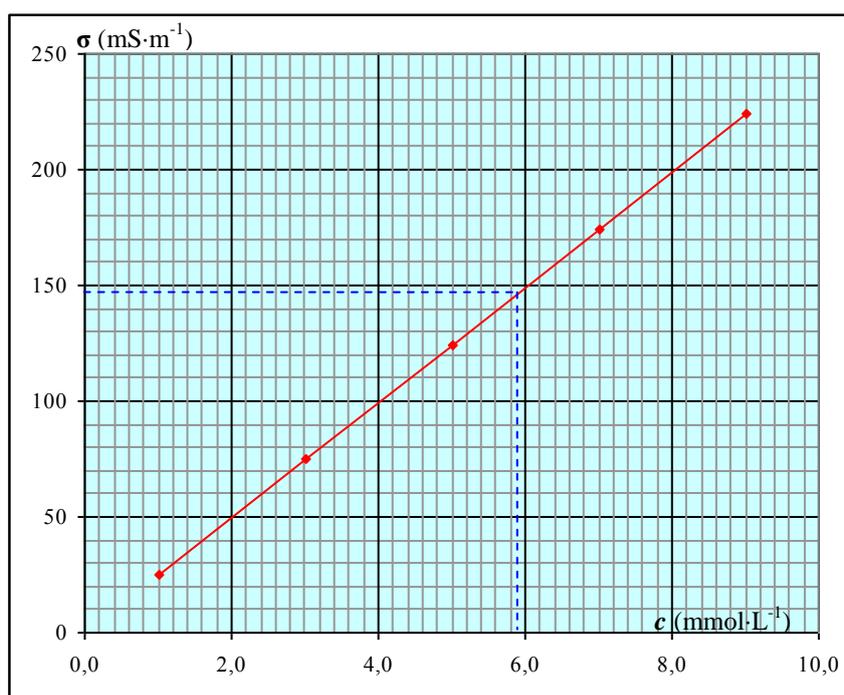
22. a. Matériel : un bécher de prélèvement ; cinq fioles jaugées de 50,0 mL ; une pipette graduée de 5 mL.

On prélève un volume V_i de solution mère S_0 à l'aide de la pipette graduée, et on verse ce prélèvement dans une fiole jaugée de 50,0 mL. On complète la fiole avec de l'eau distillée jusqu'aux $\frac{2}{3}$. On bouche et on agite. On finit de compléter la fiole jusqu'au trait de jauge et on homogénéise à nouveau.

b.

Solution S_i	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
Volume V_i (mL)	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5
c_i (mmol·L ⁻¹)	1,0	3,0	5,0	7,0	9,0
σ (mS·m ⁻¹)	24,8	75,0	124,0	174,5	224,1

c.



d. Par lecture graphique, on trouve :

$$c' = 5,90 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$$

e. La solution de déboucheur liquide a été diluée 50 fois.

D'où : $c = 500 \times c' = 500 \times 5,90 \times 10^{-3} = 2,95 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$

f. La masse molaire de l'hydroxyde de sodium est :

$$M(\text{NaOH}) = 40,0 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$$

La concentration massique c_m du déboucheur liquide est :

$$c_m = c \times M(\text{NaOH}) = 118 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$$

Le pourcentage en masse d'hydroxyde de sodium est :

$$P = \frac{c_m}{\rho} = \frac{118}{1,2 \times 10^3} \times 100 = 9,8 \%$$

Cette valeur correspond à celle indiquée sur l'étiquette.

23. a. Pour réaliser la dilution, il faut utiliser une pipette jaugée de 5,0 mL, une fiole jaugée de 1,0 L et un bécher de prélèvement de 50 mL.

b. On verse un peu de la solution commerciale dans le bécher et on prélève 5,0 mL de cette solution à l'aide de la pipette jaugée. On introduit le prélèvement dans la fiole jaugée, que l'on remplit aux 2/3 avec de l'eau distillée. On bouche la fiole et on l'agite. On finit de compléter la fiole avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge et on homogénéise à nouveau.

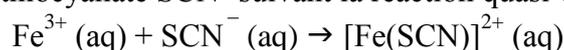
c. Le détartrant contenant de l'acide chlorhydrique, le pictogramme ☹ (produit corrosif) doit figurer sur la bouteille.

24. a. Les dosages des solutions utilisent la conductimétrie.

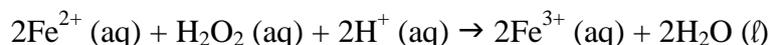
b. La valeur trouvée doit tenir compte de l'incertitude sur la concentration de la solution d'étalonnage, et de l'incertitude sur la mesure faite par le conductimètre.

c. La dilution est faite avec une éprouvette graduée, et non avec une verrerie de précision (verrerie jaugée de préférence).

25. En ajoutant du thiocyanate de potassium au vin, les ions fer (III) Fe^{3+} contenus dans le vin vont réagir avec les ions thiocyanate SCN^- suivant la réaction quasi-totale d'équation :

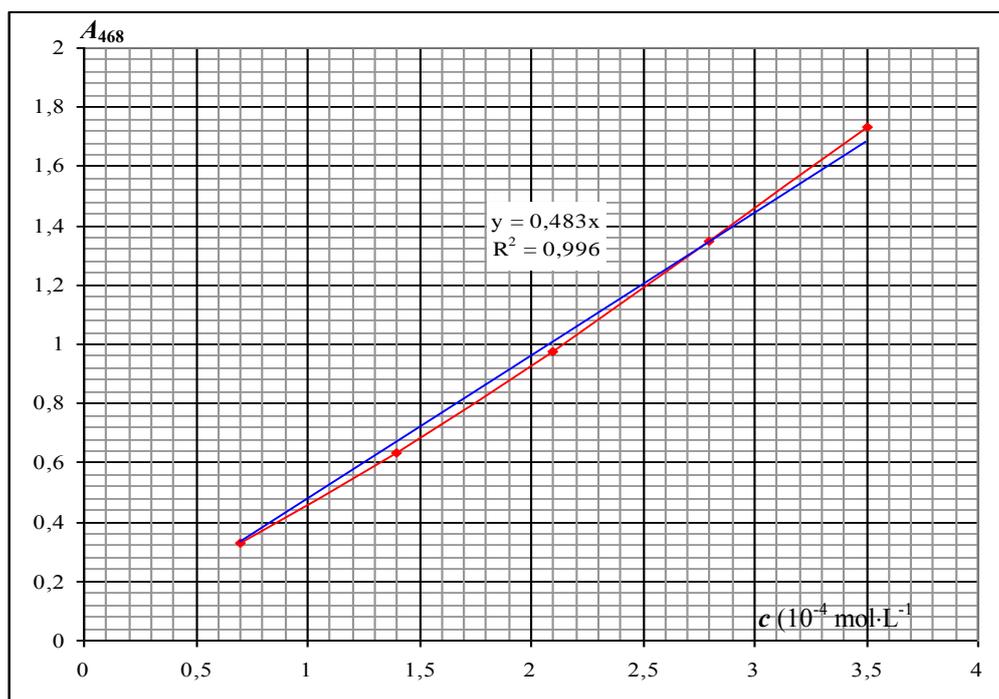


Pour que tout le fer présent dans le vin soit dosé, on y ajoute de l'eau oxygénée pour oxyder les ions fer (II) Fe^{2+} présents en ion fer (III) Fe^{3+} . L'équation de la réaction d'oxydoréduction qui a lieu est :



Dans cette équation apparaissent les ions oxonium $\text{H}^+(\text{aq})$: la réaction doit donc avoir lieu en milieu acide. Ce qui explique l'ajout d'acide sulfurique dans l'échantillon de vin que l'on dose.

L'ion thiocyanatofer (III) est une espèce de couleur rouge orangé ; il est donc possible de déterminer la concentration de cet ion, et par conséquent celle de l'ion Fe^{3+} , par une mesure d'absorbance. Il faut donc, au préalable, tracer une droite d'étalonnage.



L'équation de la droite obtenue est :

$$A_{468} = 0,483 \times c \quad \text{où } c \text{ est en } 10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

La concentration en ions Fe^{3+} dans la solution S_{vin} est donnée par la relation :

$$c_{\text{vin}} = \frac{0,854}{0,483} = 1,77 \times 10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

La solution S_{vin} , de volume 12 mL, a été préparée avec 7,5 mL de vin blanc.

La concentration en ions Fe^{3+} dans le vin blanc est donc égale à :

$$c_{\text{v}} = \frac{1,77 \times 10^{-4} \times 12}{7,5} = 2,8 \times 10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

Pour obtenir la concentration massique en ions Fe^{3+} dans le vin blanc, on effectue le calcul suivant :

$$c_{\text{m,v}} = c_{\text{v}} \times M(\text{Fe}) = 2,8 \times 10^{-4} \times 55,8 = 0,016 \text{ g} = 16 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$$

La concentration massique en ions Fe^{3+} étant supérieure à $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, le vin analysé présente donc un risque de casse ferrique.

Exercices de synthèse

26. D'après l'énoncé : $V_2 = 2 \times V_1$ et $c_1 = 3 \times c_2$.

De plus : $V_1 + V_2 = 3 \times V_1 = 600$ mL.

D'où : $V_1 = 200$ mL et $V_2 = 400$ mL.

$\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+] \Rightarrow [\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}} = 10^{-11,4} = 3,98 \times 10^{-12} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

$$[\text{H}_3\text{O}^+] \times [\text{HO}^-] = K_e \Rightarrow [\text{HO}^-] = \frac{K_e}{[\text{H}_3\text{O}^+]} = \frac{10^{-14}}{3,98 \times 10^{-12}} = 2,51 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

La concentration en ions oxonium est également donnée par la relation :

$$[\text{HO}^-] = \frac{c_1 \times V_1 + c_2 \times V_2}{V_1 + V_2} = \frac{3 \times c_2 \times V_1 + c_2 \times 2 \times V_1}{3 \times V_1} = \frac{5 \times c_2 \times V_1}{3 \times V_1} = \frac{5}{3} \times c_2$$

D'où : $c_2 = \frac{3}{5} \times [\text{HO}^-] = \frac{3}{5} \times 2,51 \times 10^{-3} = 1,51 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$

Et : $c_1 = 3 \times c_2 = 3 \times 1,51 \times 10^{-3} = 4,53 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$

$$[\text{Na}^+] = \frac{c_1 \times V_1}{V_1 + V_2} = \frac{4,53 \times 10^{-3} \times 0,200}{0,600} = 1,51 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

$$[\text{K}^+] = \frac{c_2 \times V_2}{V_1 + V_2} = \frac{1,51 \times 10^{-3} \times 0,400}{0,600} = 1,01 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

La conductivité σ du mélange obtenu est donnée par la relation :

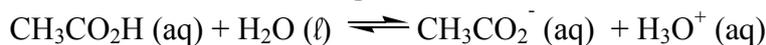
$$\sigma = \lambda_{\text{K}^+}[\text{K}^+] + \lambda_{\text{Na}^+}[\text{Na}^+] + \lambda_{\text{HO}^-}[\text{HO}^-] \quad \text{où les concentrations sont en mol}\cdot\text{m}^{-3}$$

$$\sigma = (7,35 \times 10^{-3} \times 1,01) + (5,01 \times 10^{-3} \times 1,51) + (19,9 \times 10^{-3} \times 2,51) = 64,9 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$$

27. Dans le manuel élève, une donnée a été rajoutée :

« **Donnée** : $\lambda_{\text{CH}_3\text{CO}_2^-} = 4,09 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ »

a. Équation de la réaction de l'acide éthanoïque avec l'eau :



b. $K_a = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{CH}_3\text{CO}_2^-]}{[\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}]}$.

c. La conductivité σ de la solution est donnée par la relation :

$$\sigma = \lambda_{\text{H}_3\text{O}^+}[\text{H}_3\text{O}^+] + \lambda_{\text{CH}_3\text{CO}_2^-}[\text{CH}_3\text{CO}_2^-]$$

d. En conductimétrie, la concentration molaire est exprimée en $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$.

e. On a : $[\text{H}_3\text{O}^+] = [\text{CH}_3\text{CO}_2^-] = c_f$. D'où :

$$\sigma = (\lambda_{\text{H}_3\text{O}^+} + \lambda_{\text{CH}_3\text{CO}_2^-}) \times [\text{H}_3\text{O}^+] = (\lambda_{\text{H}_3\text{O}^+} + \lambda_{\text{CH}_3\text{CO}_2^-}) \times c_f$$

$$c_f = \frac{\sigma}{\lambda_{\text{H}_3\text{O}^+} + \lambda_{\text{CH}_3\text{CO}_2^-}}$$

$$c_f = \frac{1,59 \times 10^{-2}}{35,0 \times 10^{-3} + 4,09 \times 10^{-3}} = 4,07 \times 10^{-1} \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$$

$$c_f = 4,07 \times 10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

f. $c_f \ll c$: on peut négliger la concentration finale en ions éthanoate devant la concentration molaire c . D'où :

$$[\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}]_f = c - c_f = c$$

$$\text{g. } K_a = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{CH}_3\text{CO}_2^-]}{[\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}]} = \frac{c_f \times c_f}{c}$$

$$K_a = \frac{c_f^2}{c}$$

$$\text{h. } K_a = \frac{(4,07 \times 10^{-4})^2}{1,00 \times 10^{-2}} = 1,66 \times 10^{-5}$$

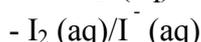
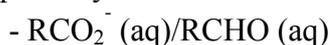
$$\text{p}K_a = -\log K_a = -\log (1,66 \times 10^{-5}) = 4,78$$

28. 1. Mélange initial

$$n_D = c_0 \times V_0 = 2,0 \times 10^{-2} \times 20,0 \times 10^{-3} = 4,0 \times 10^{-4} \text{ mol}$$

2. Réaction entre le glucose et le diiode

a. Couples oxydant/réducteur :



Les oxydants sont l'ion gluconate RCO_2^- et le diiode I_2 .

Les réducteurs sont le glucose RCHO et l'ion iodure I^- .

b. La solution étant colorée, il reste donc du diiode dans le milieu réactionnel.

Le réactif limitant est le glucose

c.

Équation		$\text{I}_2 (\text{aq}) + \text{RCHO} (\text{aq}) + 3\text{HO}^- (\text{aq}) \rightarrow 2\text{I}^- (\text{aq}) + \text{RCO}_2^- (\text{aq}) + 2\text{H}_2\text{O} (\ell)$					
État	Avancement	Quantités de matière					
initial	0	n_D	n_G	en excès	0	0	solvant
en cours	x	$n_D - x$	$n_G - x$	en excès	$2x$	x	solvant
final	x_{\max}	n_R	$n_G - x_{\max}$	en excès	$2x_{\max}$	x_{\max}	solvant

d. Le réactif limitant étant le glucose :

$$n_G - x_{\max} = 0$$

De plus : $n_R = n_D - x_{\max} = n_D - n_G \rightarrow n_G = n_D - n_R$

3. Dosage du diiode en excès

a. Par lecture graphique, la concentration c_R de diiode restant dans la solution est :

$$c_R = 3,0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$$

D'où : $n_R = c_R \times V_{\text{firole}} = 3,0 \times 10^{-3} \times 50,0 \times 10^{-3} = 1,5 \times 10^{-4} \text{ mol}$

b. $n_G = n_D - n_R = 4,0 \times 10^{-4} - 1,5 \times 10^{-4} = 2,5 \times 10^{-4} \text{ mol}$.

4. Conclusion

n_G représente la quantité de glucose présent dans 2,0 mL de jus de fruit.

D'où : $n'_G = 500 \times n_G = 1,3 \times 10^{-1} \text{ mol}$

Et : $m_G = n'_G \times M = 500 \times n_G \times M = 500 \times 2,5 \times 10^{-4} \times 180$

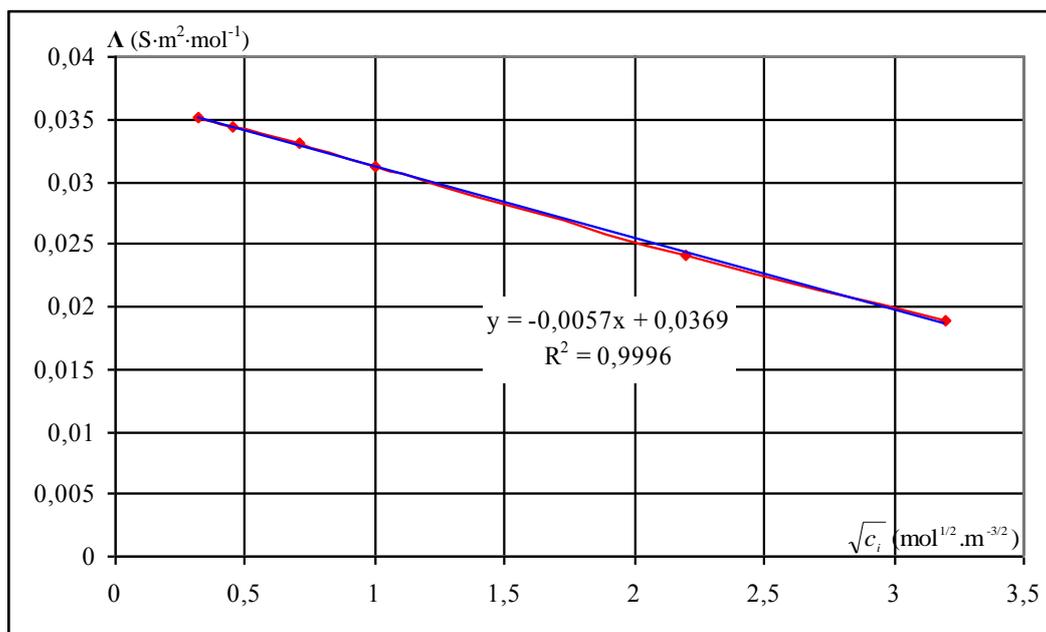
$$m_G = 23 \text{ g}$$

29. 1. Étude du sulfate de zinc

a. et b.

Solution S_i	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
c_i (mmol·L ⁻¹)	0,10	0,20	0,50	1,0	5,0	10
σ_i (en 10 ⁻³ S·m ⁻¹)	3,51	6,87	16,5	31,2	121	189
c_i (mol·m ⁻³)	0,10	0,20	0,50	1,0	5,0	10
$\sqrt{c_i}$ (mol ^{1/2} ·m ^{-3/2})	0,32	0,45	0,71	1,0	2,2	3,2
Λ (S·m ² ·mol ⁻¹)	0,0351	0,0344	0,0330	0,0312	0,0242	0,0189

c.



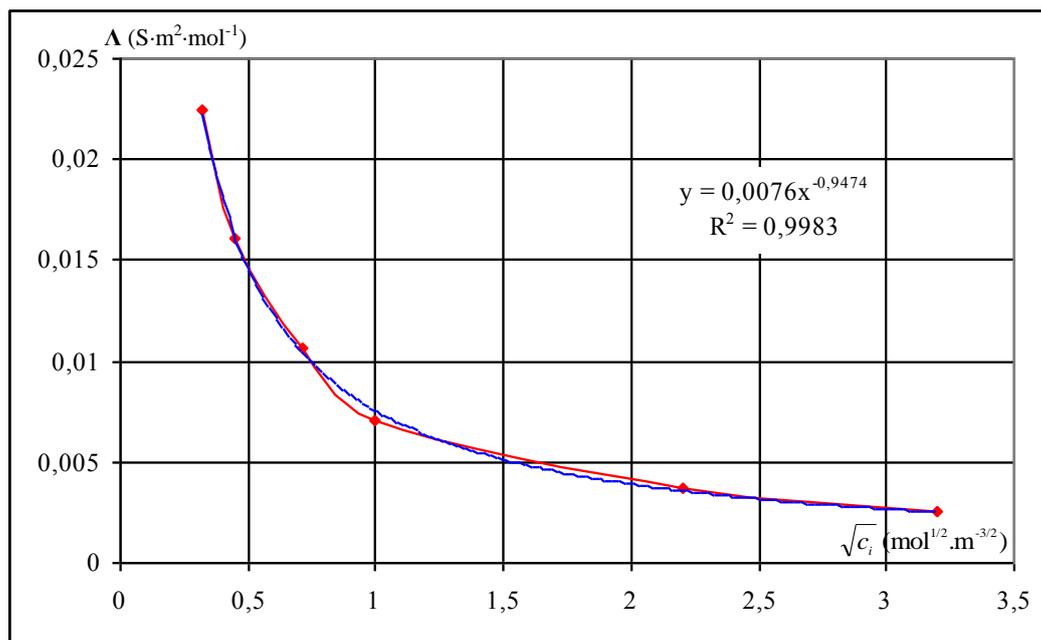
d. On observe bien une relation linéaire entre Λ et $\sqrt{c_i}$. La loi de Kohlrausch s'écrit alors :

$$\Lambda = 0,0369 - 0,0057 \sqrt{c_i}$$

2. Étude de l'acide éthanoïque

a.

Solution S_i	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
c_i (mmol·L ⁻¹)	0,10	0,20	0,50	1,0	5,0	10
σ_i (en 10 ⁻³ S·m ⁻¹)	2,25	3,22	5,35	7,80	18,5	25,0
c_i (mol·m ⁻³)	0,10	0,20	0,50	1,0	5,0	10
$\sqrt{c_i}$ (mol ^{1/2} ·m ^{-3/2})	0,32	0,45	0,71	1,0	2,2	3,2
Λ (S·m ² ·mol ⁻¹)	0,0225	0,0161	0,0107	0,00708	0,00370	0,00250



b. La courbe obtenue n'est pas une droite, contrairement au cas précédent. Il n'y a donc pas de relation simple entre Λ et $\sqrt{c_i}$.

Dans le cas d'un électrolyte fort comme le sulfate de zinc, c'est-à-dire une espèce se dissociant totalement dans l'eau, il existe une relation linéaire entre Λ et $\sqrt{c_i}$: c'est la loi de Kohlrausch. Cette relation linéaire n'existe plus dans le cas d'électrolytes faibles.

30. Proposition de synthèse de documents

En aquariophilie, la survie d'une espèce (comme le *Paracheirodon innesi*) exige que l'eau dans laquelle elle évolue respecte des critères bien définis : température, pH, dureté, etc.

La dureté d'une eau correspond à la quantité de sels de calcium et de magnésium dissous dans cette eau. La dureté peut être exprimée en degrés français (°TH) ou degrés allemand (°gH ou °dH). Dans le cas du *Paracheirodon innesi*, la dureté de l'eau doit être comprise entre 3 °dH et 10 °dH, ce qui correspond à une eau douce.

Pour connaître la dureté d'une eau, il faut donc déterminer la quantité de sels de calcium et de magnésium dissous, ce qui revient à déterminer la quantité d'ions calcium et magnésium présents dans cette eau.

La présence d'ions dans l'eau lui assure un caractère de conducteur électrique. Une mesure de conductivité permet ainsi de déterminer la quantité d'ions présents dans une eau, et donc de savoir si cette eau est douce ou dure. Plus la conductivité électrique d'une eau est élevée, plus sa concentration en ions est grande, et plus elle est dure.

Les appareils utilisés en aquariophilie peuvent mesurer la conductivité de l'eau de l'aquarium. En atteste la notice jointe dans laquelle apparaît l'indication « $\mu\text{S}/\text{cm}$ », qui correspond à l'unité de la conductivité. Ainsi, une simple mesure de conductivité de l'eau d'un aquarium permet de savoir très rapidement si cette eau constitue un milieu propice aux poissons qui y vivent.

Chapitre 23 – Contrôle de la qualité : dosages par titrage direct

Manuel pages 463 à 482

Choix pédagogiques

L'objectif de ce chapitre est de compléter les contrôles de qualité fait par dosage par étalonnage du chapitre précédent.

Seront abordés les titrages pH-métriques, conductimétriques et ceux utilisant un indicateur de fin de réaction.

L'élève doit être capable d'écrire l'équation de la réaction support de titrage et de déterminer la concentration d'une espèce chimique par titrage.

Des animations, des vidéos documentaires et d'expériences illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et, certaines d'entre elles, sur les sites Internet compagnon Sirius.

Un logiciel de simulation de courbes de titrage est disponible dans le manuel numérique Sirius T^{erm} S spécifique. Ce logiciel est également téléchargeable à l'adresse suivante : <http://www.chimsoft.com/>

Page d'ouverture

Cette photographie doit permettre aux élèves de s'interroger sur les techniques expérimentales permettant de déterminer les quantités de matière d'espèces chimiques.

Ils connaissent déjà le dosage par étalonnage pour des espèces colorées, or ici, ce n'est pas le cas.

Activités**Activité expérimentale 1. Première approche d'un dosage par titrage****Commentaires**

L'objectif de cette activité est de comprendre l'évolution des quantités de matières lors d'un dosage par titrage. L'intérêt est de mener de front la simulation et l'expérience.

Réponses**1. Analyser la modélisation**

a.

Étape n	Nombre de briques blanches restant dans le cristalliseur	Nombre de briques jaunes restant dans le cristalliseur
0	0	10
1	0	9
2	0	8
3	0	7
4	0	6
5	0	5
6	0	4
7	0	3
8	0	2
9	0	1
10	0	0
11	2	0
12	4	0

b. Pour $n < 10$, les briques qui limitent la réaction sont les blanches.c. Pour $n > 10$, les briques qui limitent la réaction sont les jaunes.d. Pour $n = 10$, les briques blanches et jaunes limitent la réaction.e. Pour $n = 10$, $n_{j,i} = \frac{n_{B,e}}{2}$.**2. Retour à la chimie**a. $V_e = 20,0$ mL.b. Si $V < V_e$, le réactif limitant est l'ion thiosulfate $S_2O_3^{2-}$.Si $V > V_e$, le réactif limitant est le diiode I_2 .Si $V = V_e$, les deux réactifs sont limitants.c. $n_{I_2,i} = \frac{n_{S_2O_3^{2-},e}}{2}$.

d. À l'équivalence, les deux réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques.

Activité expérimentale 2. Contrôle qualité par titrage conductimétrique

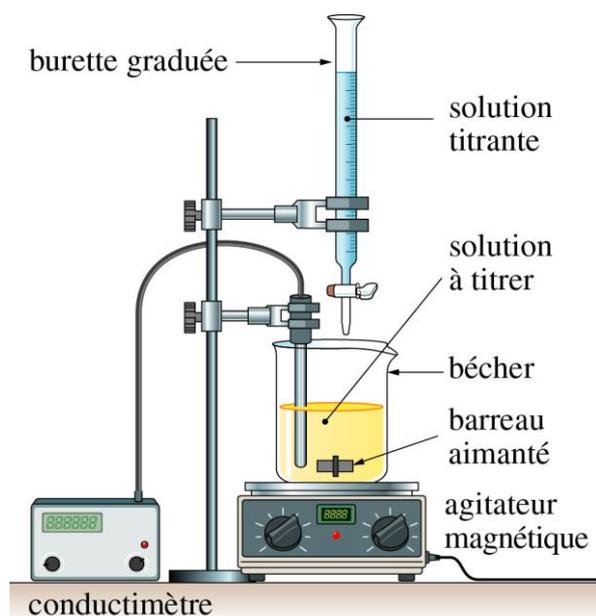
Commentaires

Cette activité permet de faire un contrôle de qualité par titrage conductimétrique. Elle permet également d'utiliser l'outil informatique.

Réponses

1. Analyser un protocole expérimental

a.



b. Le réactif titrant est Ag^+ et le réactif titré est Cl^- .

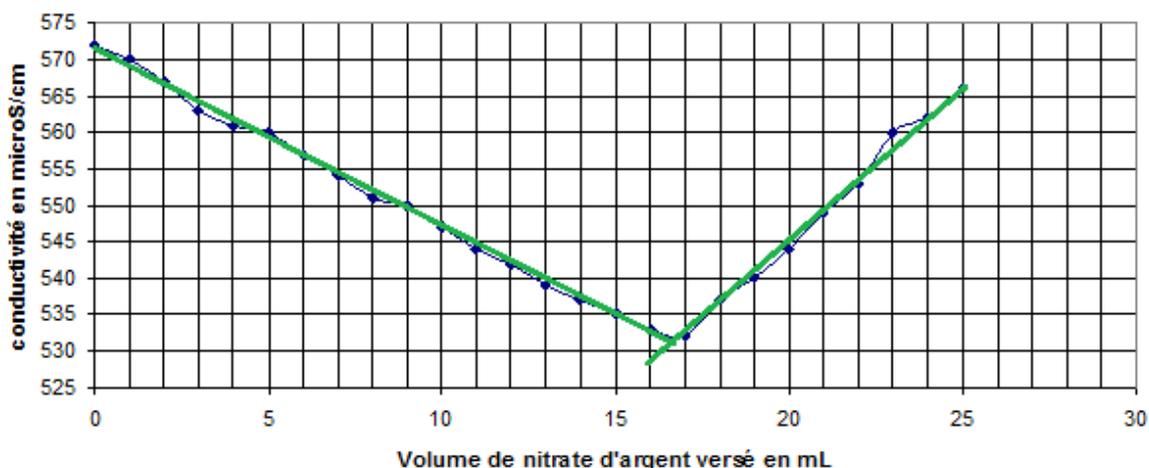
c. $\text{Ag}^+(\text{aq}) + \text{Cl}^-(\text{aq}) \rightarrow \text{AgCl}(\text{s})$.

d. Le titrage peut être suivi par conductimétrie car il a une évolution de la conductivité de la solution due à la consommation des espèces ioniques Ag^+ et Cl^- lors de la réaction c.

2. Exploiter les résultats

a.

conductivité en fonction de V



b. Avant l'équivalence, le réactif limitant est Ag^+ . Les ions Cl^- sont consommés, des ions NO_3^- sont introduits. La conductivité diminue car la conductivité ionique molaire de Cl^- est plus grande que celle de NO_3^- .

Après l'équivalence, le réactif limitant est Cl^- . La quantité d'ions NO_3^- augmente. Des ions Ag^+ sont introduits sans être consommés donc la conductivité augmente.

c. $V_e = 17,0$ mL.

3. Conclure

a. À l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques :

$$\frac{n_{\text{Cl}^-,i}}{1} = \frac{n_{\text{Ag}^+,e}}{1}$$

b. $c'V_{\text{eau}} = cV_e$

$$c' = \frac{cV_e}{V_{\text{eau}}}$$

$$c' = \frac{10 \times 10^{-3} \times 17,0 \times 10^{-3}}{200 \times 10^{-3}} = 8,5 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$c_m' = c' \times M$$

$$c_m' = 8,5 \times 10^{-4} \times 35,5 = 3,0 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} = 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$$

c. $c_m' < 250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, l'eau est conforme à la législation.

Activité expérimentale 3. Repérer l'équivalence par le suivi du pH

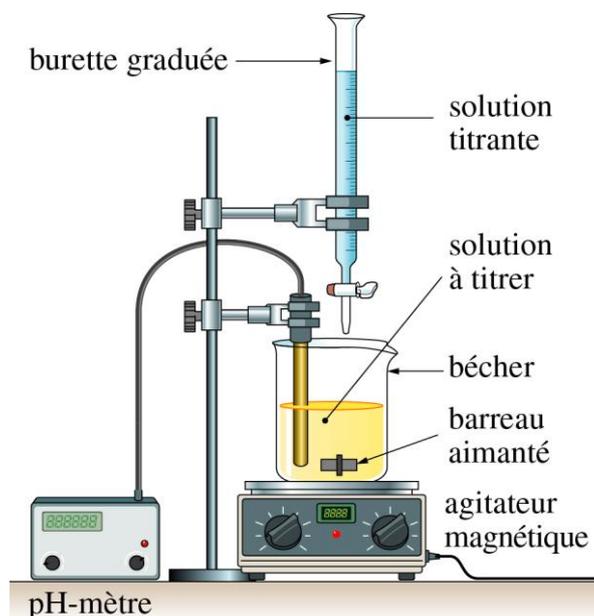
Commentaires

Cette activité permet de repérer l'équivalence par le suivi du pH.
L'élève doit s'interroger sur la meilleure façon de repérer l'équivalence.
Cette activité permet également d'utiliser l'outil informatique.

Réponses

1. Analyser un protocole expérimental

a.



b. Le réactif titrant est l'ion hydroxyde HO^- et le réactif titré est l'acide éthanoïque $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$.

c. $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H} (\text{aq}) + \text{HO}^- (\text{aq}) \rightarrow \text{CH}_3\text{CO}_2^- (\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} (\text{l})$.

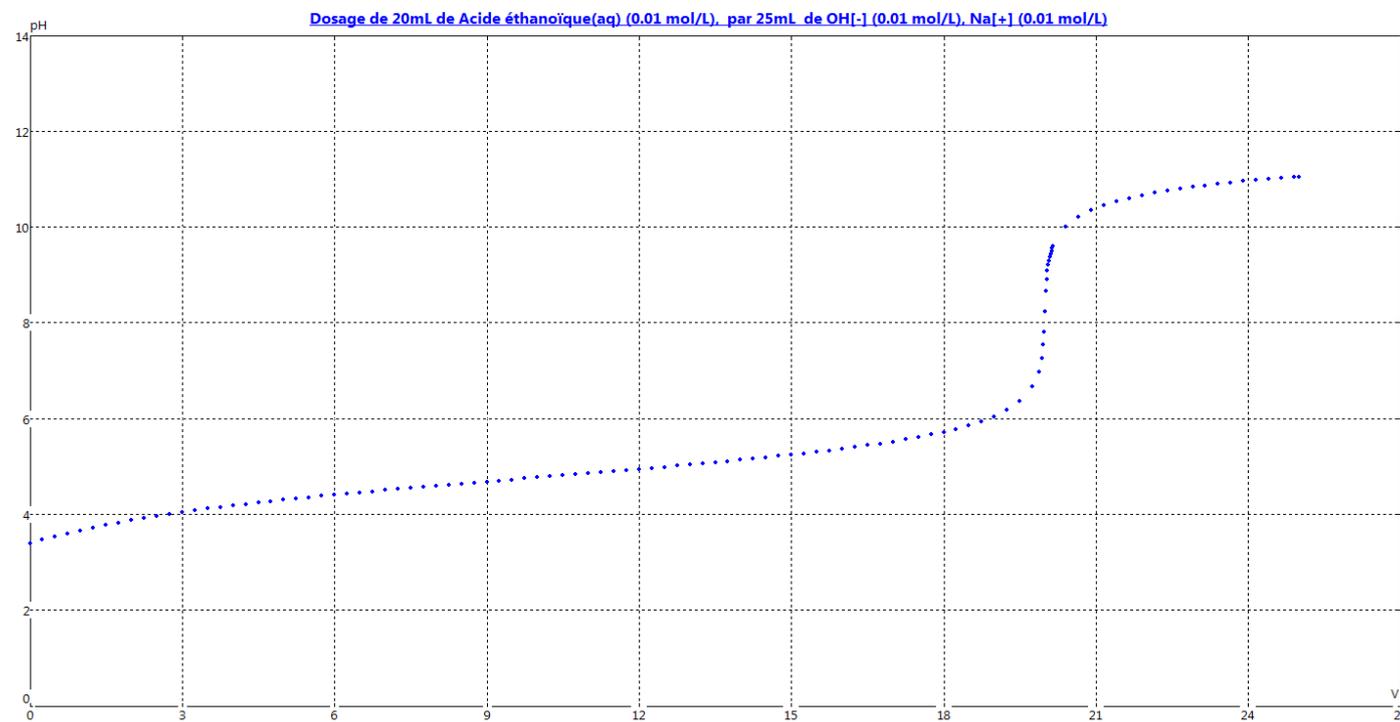
d. On peut réaliser un suivi pH-métrique car la réaction support de titrage est une réaction acido-basique.

2. Exploiter les résultats

a. À l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques :

$$\begin{aligned} \frac{n_{\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H},i}}{1} &= \frac{n_{\text{HO}^-,e}}{1} \\ c_S V_S &= c V_e \\ V_e &= \frac{c_S V_S}{c} \\ V_e &= \frac{10 \times 10^{-3} \times 20,0 \times 10^{-3}}{10 \times 10^{-3}} = 20 \times 10^{-3} \text{ L} = 20 \text{ mL} \end{aligned}$$

b.



c. $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$, acide faible, est consommé au cours de la réaction par les ions HO^- . Après l'équivalence, des ions HO^- sont introduits sans être consommés. Le pH augmente donc au cours du titrage.

3. Conclure

a. Lorsque le volume V versé est proche du volume V_e versé à l'équivalence, il y a un brusque saut de pH.

b. On pourrait déterminer plus précisément le volume versé à l'équivalence en resserrant les points de mesure autour de l'équivalence. Il faudrait ajouter la solution d'hydroxyde de sodium non pas millilitre par millilitre mais de 0,2 mL en 0,2 mL.

Activité expérimentale 4. Titrage utilisant un indicateur coloré

Commentaires

La simulation permet de choisir un indicateur coloré de pH pour un titrage.

La deuxième partie de l'activité permet à l'élève de travailler en autonomie et de réinvestir les conclusions de la première partie.

Réponses

1. Exploiter les résultats

a. $V_e = 8,0$ mL.

b. Hélianthine :

- solution rouge, $V = 1,5$ mL ;

- solution jaune, $V = 6,0$ mL.

Phénolphtaléine :

- solution commence à rosir, $V = 8,0$ mL ;

- solution rose, $V = 8,1$ mL.

c. La phénolphtaléine permet de repérer l'équivalence car sa zone de virage est comprise dans la zone de saut de pH.

2. Imaginer et mettre en œuvre un protocole

a. Matériel : pipette jaugée de 20,0 mL, poire aspirante, bécher, burette graduée, barreau aimanté, agitateur magnétique, éprouvette.

- Prélever un échantillon de volume $V_s = 20,0$ mL de lait à l'aide d'une pipette jaugée de 20,0 mL.
- L'introduire dans un bécher. À l'aide d'une éprouvette, ajouter 180 mL d'eau distillée, ajouter un barreau aimanté et quelques gouttes de phénolphtaléine (indicateur de fin de réaction).
- Préparer de la même façon un bécher témoin.
- Rincer puis remplir la burette graduée avec une solution d'hydroxyde de sodium de concentration $c = 50$ mmol·L⁻¹.
- Placer le bécher sur un agitateur magnétique et disposer la burette au-dessus du bécher.

Exercices d'application

5 minutes chrono !

1. Mots manquants

- quasi-totale
- stœchiométriques
- Brusque variation de pH
- conductivité
- pente
- indicateur de fin de réaction

2. QCM

- Le réactif titrant est limitant .
 - $\frac{n_{A,i}}{a} = \frac{n_{B,e}}{b}$.
 - Le réactif titrant est HO⁻ et le réactif titré est HCO₂H.
 - Zone de forte variation de pH.
 - H₃O⁺ (aq) + HO⁻ (aq) → 2H₂O (l).
-

Compétences exigibles

3. Protocole 1 : HCO₂H (aq) + HO⁻ (aq) → HCO₂⁻ (aq) + H₂O (l).

Protocole 2 : H₃O⁺ (aq) + HO⁻ (aq) → 2H₂O (l).

Protocole 3 : MnO₄⁻ (aq) + 5Fe²⁺ (aq) + 8H⁺ (aq) → Mn²⁺ (aq) + 5Fe³⁺ (aq) + 4H₂O (l).

4. a. À l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques.

b. Protocole 1 : $\frac{n_{\text{HCO}_2\text{H}, i}}{1} = \frac{n_{\text{HO}^-, e}}{1}$

Protocole 2 : $\frac{n_{\text{H}_3\text{O}^+, i}}{1} = \frac{n_{\text{HO}^-, e}}{1}$

Protocole 3 : $\frac{n_{\text{MnO}_4^-, i}}{1} = \frac{n_{\text{Fe}^{2+}, e}}{5}$

5. a. Grandeurs : pH et conductivité.

Appareils : pH-mètre et conductimètre.

b. Suivi pH-métrique : en abscisses le volume V du réactif titrant en mL, et en ordonnées le pH sans unité.

Suivi conductimétrique : en abscisses le volume V du réactif titrant en mL, et en ordonnées la conductivité en S·m⁻¹.

6. a. L'un des réactifs est coloré.

L'un des produits est coloré.

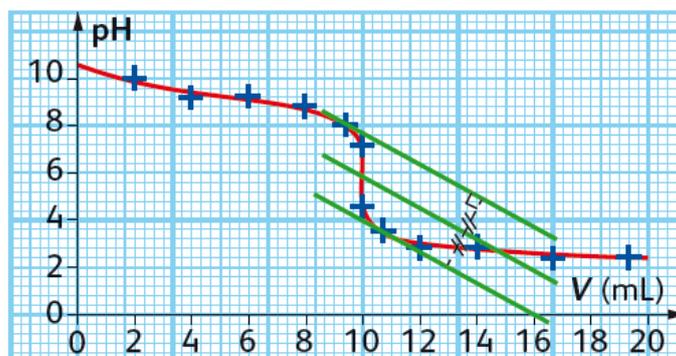
L'ajout d'un indicateur de fin de réaction.

b. La zone de virage de l'indicateur coloré de pH est comprise dans la zone de forte variation de pH.

7. Avant l'équivalence, le réactif limitant est HO⁻. Les ions H₃O⁺ sont consommés, des ions Na⁺ sont introduits et la quantité d'ions NO₃⁻ n'évolue pas. La conductivité diminue car la conductivité ionique molaire de H₃O⁺ est beaucoup plus grande que celle de Na⁺.

Après l'équivalence, le réactif limitant est H₃O⁺. La quantité d'ions NO₃⁻ n'évolue pas. Des ions HO⁻ et Na⁺ sont introduits sans être consommés, donc la conductivité augmente.

8. a. On trace deux tangentes à la courbe, parallèles et placées de part et d'autre du saut de pH où la courbe a une grande courbure. On trace ensuite la droite parallèle et équidistante à ces deux tangentes. Cette droite coupe la courbe de titrage au point d'abscisse $V_e = 10,0$ mL.



b. À l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques :

$$\frac{n_{\text{NH}_3, i}}{1} = \frac{n_{\text{H}_3\text{O}^+, e}}{1}$$

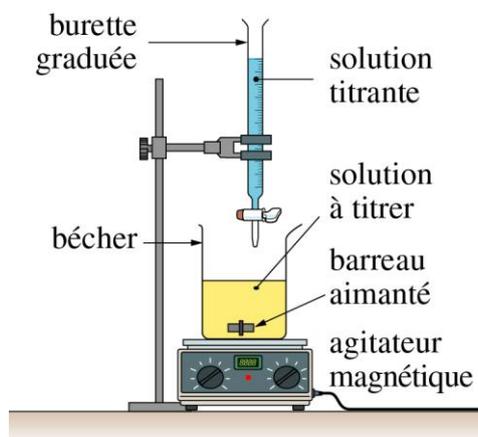
c. Donc, on peut écrire :

$$c_s V_s = c V_e \text{ soit } c_s = \frac{c V_e}{V_s}$$

$$c_s = \frac{1,0 \times 10^{-2} \times 10,0 \times 10^{-3}}{10,0 \times 10^{-3}} = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

Compétences générales

9.



10. La première courbe est le titrage d'un acide faible par une base forte, le pH initial est inférieur à 7.

La deuxième courbe est le titrage d'une base faible par un acide fort.

11. a. On utilise le BBT car sa zone de virage est comprise dans la zone de forte variation de pH.

b. La solution passe du bleu au jaune.

Exercices de méthode

12. Exercice résolu.

13. a. Barreau aimanté et poire aspirante.

b. Il n'y a pas de burette. Il y a des fioles non utiles ici.

c. Première puce : « à l'aide d'une pipette jaugée de 10,0 mL ».

Deuxième puce : « une solution d'hydroxyde de sodium ».

d. Est inutile : « en s'assurant qu'elle plonge bien dans la solution ».

e. Mettre « on note » à l'infinitif : « noter », et préciser le volume de chaque ajout : « mL par mL ».

f. Protocole rédigé :

- Prélever un échantillon de volume $V_s = 10,0$ mL d'une solution d'acide éthanoïque à l'aide d'une pipette jaugée de 10,0 mL.
 - L'introduire dans un bécher et ajouter un barreau aimanté.
 - Rincer puis remplir la burette graduée avec une solution d'hydroxyde de sodium de concentration $c = 2,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
 - Placer le bécher sur un agitateur magnétique et disposer la burette au-dessus du bécher.
 - Placer la sonde du pH-mètre dans le bécher.
 - Noter la valeur du pH après ajout de la solution titrante mL par mL.
-

14. a. Puisque l'on utilise de l'empois d'amidon, on repère l'équivalence par un indicateur de fin de réaction.

b. Le réactif titrant est le diiode I_2 . Le réactif titré est le dioxyde de soufre SO_2 .

c. $\text{SO}_2(\text{aq}) + \text{I}_2(\text{aq}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{SO}_4^{2-}(\text{aq}) + 2\text{I}^-(\text{aq}) + 4\text{H}^+(\text{aq})$.

d. À l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques :

$$\frac{n_{\text{SO}_2, \text{i}}}{1} = \frac{n_{\text{I}_2, \text{e}}}{1}$$

e. $c_s V_s = c V_e$ donc $c_s = \frac{c V_e}{V_s}$

$$c_s = \frac{50 \times 10^{-3} \times 8,0 \times 10^{-3}}{10,0 \times 10^{-3}} = 4,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} = 40 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$$

Exercices d'entraînement

15. a. Le changement de pente s'effectue à $V_e = 10,0 \text{ mL}$.

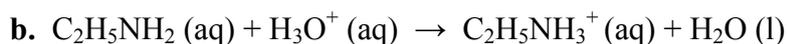
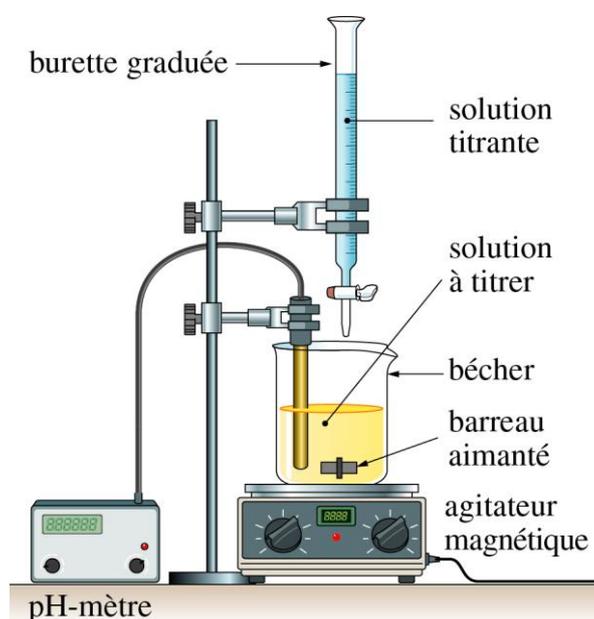
b. À l'équivalence les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques :

$$\frac{n_{\text{NH}_3, i}}{1} = \frac{n_{\text{H}_3\text{O}^+, e}}{1}$$

c. $c_s V_s = c V_e$ donc $c_s = \frac{c V_e}{V_s}$

$$c_s = \frac{2,0 \times 10^{-2} \times 10,0 \times 10^{-3}}{200 \times 10^{-3}} = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

16. a.



c. $V_e = 8,0 \text{ mL}$.

d. À l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques.

e. $\frac{n_{\text{C}_2\text{H}_5\text{NH}_2, i}}{1} = \frac{n_{\text{H}_3\text{O}^+, e}}{1}$

$$c_s V_s = c V_e$$

$$c_s = \frac{c V_e}{V_s}$$

$$c_s = \frac{1,0 \times 10^{-1} \times 8,0 \times 10^{-3}}{20,0 \times 10^{-3}} = 4,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

f. Le jaune d'alizarine ne convient pas car sa zone de virage n'est pas comprise dans la zone de forte variation de pH. Il changera de couleur dès le début.

g. On utilise donc le rouge de chlorophénol.

17. a. À l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques :

$$\frac{n_i}{1} = \frac{n_e}{1}$$

b. Le point d'intersection des deux segments de droite de la courbe correspond à l'équivalence.

$$V_e = 11,4 \text{ mL}$$

c. $n_i = n_e$ donc $c_s V_s = c V_e$

$$c_s = \frac{c V_e}{V_s}$$

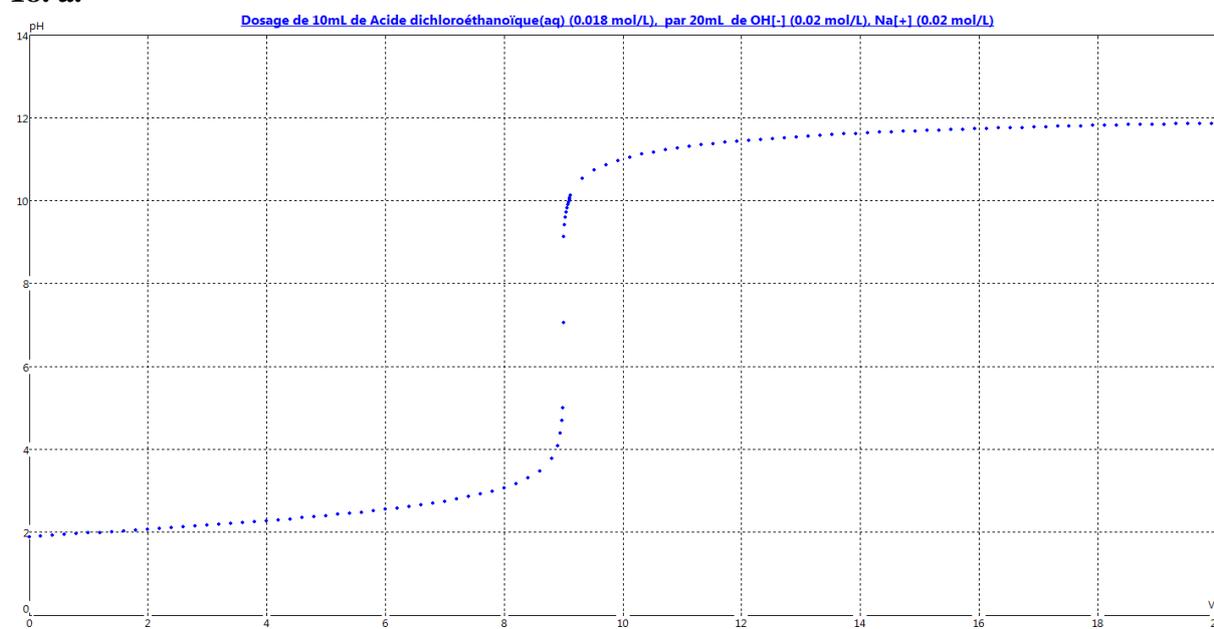
$$c_s = \frac{20 \times 10^{-3} \times 11,4 \times 10^{-3}}{20,0 \times 10^{-3}} = 1,1 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

d. $c_m = c_s \times M$

$$c_m = 1,1 \times 10^{-2} \times 35,5 = 3,9 \times 10^{-1} \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$c_m = 3,9 \times 10^2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$$

18. a.



b. Le BBT.

19. a. Solution mère : c_0, V_0 .

Solution fille : $c_1 = \frac{c_0}{100}, V = 1,0 \text{ L}$.

Lors d'une dilution, il y a conservation de la quantité de matière :

$$c_0 V_0 = c_1 V$$

Donc :

$$V_0 = \frac{V}{100} = \frac{1,0}{100} = 1,0 \times 10^{-2} \text{ L} = 10 \text{ mL}$$

Liste du matériel : pipette jaugée de 10 mL, fiole jaugée de 1,0 L avec bouchon, pissette d'eau distillée.

Solution : la solution S₀.

Étapes :

- Prélever un échantillon de volume $V_0 = 10$ mL de la solution S_0 à l'aide d'une pipette jaugée de 10,0 mL.
- L'introduire dans une fiole jaugée de 1,0 L.
- Compléter avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.
- Boucher et agiter.

b. L'expérimentateur fait cette correction car la burette graduée lui permet de donner le résultat avec cette précision et avec cette source d'erreur.

c. L'expérimentateur titre une solution d'hydroxyde de sodium par de l'acide chlorhydrique.

Avant l'équivalence, H_3O^+ est le réactif limitant et après, HO^- est le réactif limitant.

Avant l'équivalence, la solution est bleue puis après elle est jaune.

d. Si le volume à l'équivalence a été repéré à la goutte près, la solution doit redevenir bleue lorsque l'expérimentateur ajoute une goutte de solution S_1 .

e. $HO^-(aq) + H_3O^+(aq) \rightarrow 2H_2O(l)$.

f. À l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques :

$$\frac{n_{HO^-,i}}{1} = \frac{n_{H_3O^+,e}}{1}$$

$$c_1 V_1 = c V_e$$

$$c_1 = \frac{c V_e}{V_1}$$

$$c_1 = \frac{0,10 \times 6,0 \times 10^{-3}}{10,0 \times 10^{-3}} = 6,0 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

$g \times c_0 = 100 \times c_1 = 6,0 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, l'indication portée sur l'étiquette est correcte.

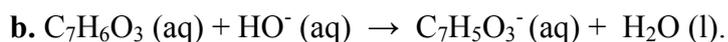
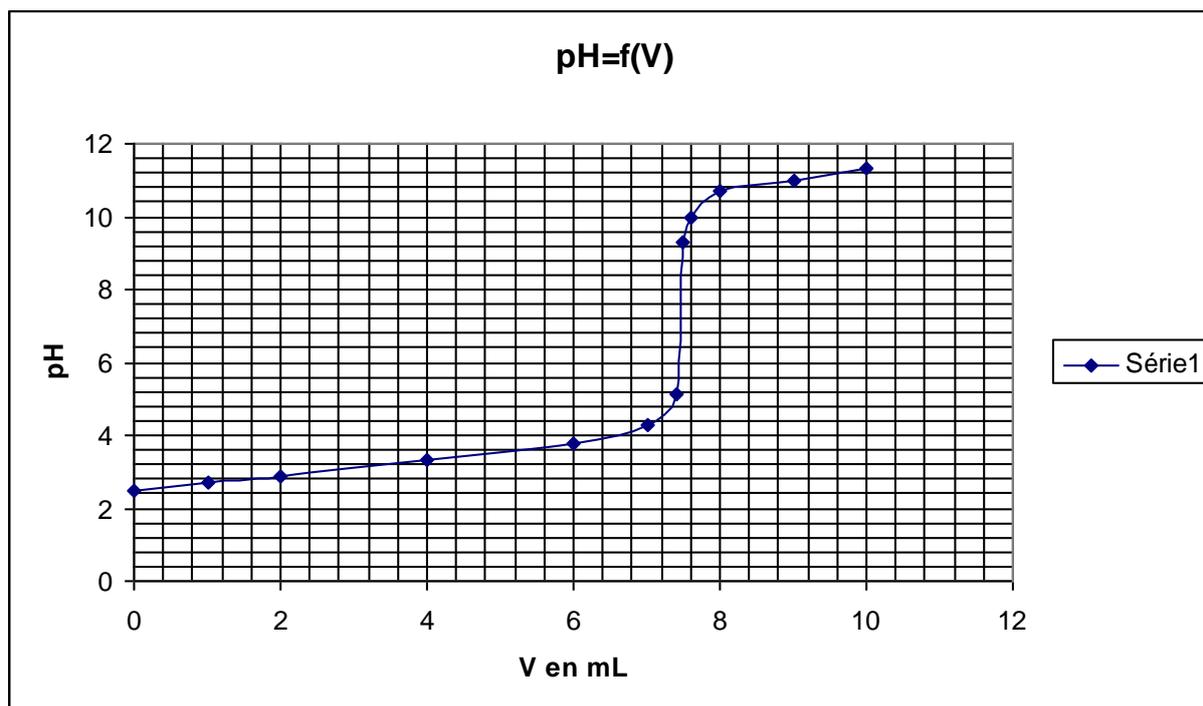
$$20. \text{ a. } \bar{V}_e = 12,03 \text{ mL} \quad s_{\text{exp}} = 0,0886 \quad s = \frac{0,0886}{\sqrt{8}} = 0,0313$$

b. $k_s = 2 \times 0,0313 = 0,062$;

$\Delta V_e = 0,06 \text{ mL}$;

$V_e = 12,03 \pm 0,06 \text{ mL}$.

21. a.



c. $V_e = 7,5 \text{ mL}$.

d. À l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques :

$$\frac{n_{\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_3, \text{i}}}{1} = \frac{n_{\text{HO}^-, \text{e}}}{1}$$

$$c_s V_s = c V_e$$

$$c_s = \frac{c V_e}{V_s}$$

$$c_s = \frac{2,5 \times 10^{-2} \times 7,5 \times 10^{-3}}{20,0 \times 10^{-3}} = 9,4 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

22. a. $V_e = 15,0 \text{ mL}$, $\text{pH}_e = 7,0$.

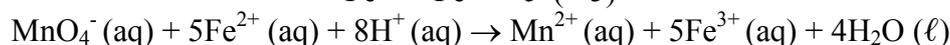
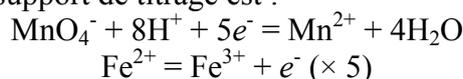
b. $V_1 = 15,0 \text{ mL} = V_e$.

c. La dérivée est plus difficile à calculer avec des points expérimentaux et donc la source d'erreur est plus importante.

23. a. Protocole expérimental du titrage :

- Prélever, à l'aide d'une pipette jaugée, un échantillon de volume $V_s = 20,0 \text{ mL}$, d'une solution sulfate de fer (II) ($\text{Fe}^{2+} (\text{aq})$, $\text{SO}_4^{2-} (\text{aq})$) de concentration c_s .
- Introduire le prélèvement dans un erlenmeyer et ajouter un barreau aimanté.
- Placer l'erlenmeyer sur un agitateur magnétique et sous une burette graduée contenant une solution de permanganate de potassium ($\text{K}^+ (\text{aq})$, $\text{MnO}_4^- (\text{aq})$) de concentration $c = 5,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
- Repérer l'équivalence par un changement de couleur (incolore à violet).
- Noter le volume à l'équivalence $V_e = 8,2 \text{ mL}$.

b. L'équation de la réaction support de titrage est :



À l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stoechiométriques.

Donc :

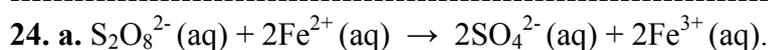
$$\frac{n_{\text{Fe}^{2+},i}}{5} = \frac{n_{\text{MnO}_4^-,e}}{1}$$

Ou encore :

$$\frac{c_s V_s}{5} = \frac{c V_e}{1}$$

$$c_s = 5 \frac{c V_e}{V_s}$$

$$c_s = 5 \times \frac{5,0 \times 10^{-2} \times 8,2 \times 10^{-3}}{20,0 \times 10^{-3}} = 1,0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$



À l'équivalence les réactifs ont été introduits dans les proportions stoechiométriques :

$$\frac{n_{\text{Fe}^{2+},i}}{2} = \frac{n_{\text{S}_2\text{O}_8^{2-},e}}{1}$$

Si on prend un volume à l'équivalence $V_e = 10,0 \text{ mL}$:

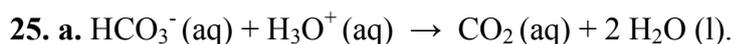
$$\frac{c_s V_s}{2} = c V_e$$

$$c = \frac{c_s V_s}{2 V_e}$$

$$c = \frac{1,5 \times 10^{-2} \times 20,0 \times 10^{-3}}{2 \times 10,0 \times 10^{-3}} = 1,5 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

b. Matériel : pipette jaugée de 20,0 mL, poire aspirante, bécher, burette graduée, barreau aimanté, agitateur magnétique.

- Prélever un échantillon de volume $V_s = 20,0 \text{ mL}$ d'une solution contenant des ions Fe^{2+} à l'aide d'une pipette jaugée de 20,0 mL.
- L'introduire dans un bécher et ajouter un barreau aimanté et quelques gouttes d'orthophénantroline (indicateur de fin de réaction).
- Rincer puis remplir la burette graduée avec une solution de peroxydisulfate de potassium de concentration $c = 1,5 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
- Placer le bécher sur un agitateur magnétique et disposer la burette au-dessus du bécher.



À l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stoechiométriques :

$$\frac{n_{\text{HCO}_3^-,i}}{1} = \frac{n_{\text{H}_3\text{O}^+,e}}{1}$$

$$c_s V_s = c V_e$$

$$c_s = \frac{c V_e}{V_s}$$

$$c_S = \frac{2,0 \times 10^{-2} \times 14,6 \times 10^{-3}}{50,0 \times 10^{-3}} = 5,8 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$c_m = c_S \times M = 0,35 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$$

L'indication de l'étiquette est correcte :

$$c_m = 360 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} = 0,360 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$$

b. $V_{\text{TAC}} = \frac{c_S V_S}{c}$

$$V_{\text{TAC}} = \frac{5,8 \times 10^{-3} \times 100}{0,020} = 29 \text{ mL}$$

Exercices de synthèse

26. a. $2\text{MnO}_4^- (\text{aq}) + 5\text{H}_2\text{O}_2 (\text{aq}) + 6\text{H}^+ (\text{aq}) \rightarrow 2\text{Mn}^{2+} (\text{aq}) + 5\text{O}_2 (\text{aq}) + 8\text{H}_2\text{O} (\text{l})$.

b. À l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques.

c.
$$\frac{n_{\text{H}_2\text{O}_2, \text{i}}}{5} = \frac{n_{\text{MnO}_4^-, \text{e}}}{2}$$

$$\frac{c'V'}{5} = \frac{cV_e}{2}$$

$$c' = \frac{5}{2} \times \frac{cV_e}{V'}$$

$$c' = \frac{5}{2} \times \frac{0,025 \times 14,8 \times 10^{-3}}{10,0 \times 10^{-3}} = 9,3 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

d. $c_0 = 10c' = 9,3 \times 10^{-1} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

27. a. $V_e = 10,5 \text{ mL}$.

b. À l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques.

c. $\frac{n_{\text{H}_3\text{A}, \text{i}}}{1} = \frac{n_{\text{HO}^-, \text{e}}}{3}$.

d.
$$c_S V_S = \frac{cV_e}{3}$$

$$c_S = \frac{cV_e}{3V_S}$$

$$c_S = \frac{2,0 \times 10^{-2} \times 10,5 \times 10^{-3}}{3 \times 10,0 \times 10^{-3}} = 7,0 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

28. a. $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H} (\text{aq}) + \text{HO}^- (\text{aq}) \rightarrow \text{CH}_3\text{CO}_2^- (\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} (\text{l})$.

b. $V_e = 20,0 \text{ mL}$.

c. $\frac{V_e}{2} = 10,0 \text{ mL}$ et $\text{pH} = 5,0 \approx \text{pKa}$.

d. Courbe 2 : % de $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$;

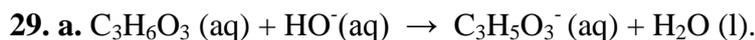
Courbe 3 : % de CH_3CO_2^- .

e. Au point d'intersection, les concentrations des espèces sont égales.

f.
$$\text{Ka} = \frac{[\text{CH}_3\text{CO}_2^-] \times [\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}]}$$
.

g. Au point d'intersection, $\text{Ka} = [\text{H}_3\text{O}^+]$ et donc $\text{pH} = \text{pKa} = 5,0$.

h. Le pH ne varie quasiment pas autour de la demi équivalence, c'est une zone tampon.



b. Le prélèvement est fait avec une pipette jaugée.

c.

$$\frac{n_{\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3, \text{i}}}{1} = \frac{n_{\text{HO}^-, \text{e}}}{1}$$

$$c_{\text{S}} V_{\text{S}} = c V_{\text{e}}$$

$$c_{\text{S}} = \frac{c V_{\text{e}}}{V_{\text{S}}}$$

$$c_{\text{S}} = \frac{1}{9} \times \frac{3,2 \times 10^{-3}}{10,0 \times 10^{-3}} = 3,6 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

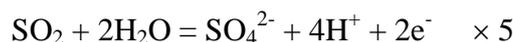
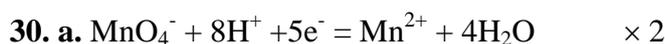
$$c_{\text{m}} = c_{\text{S}} \times M = 3,2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$$

donc $32 \text{ }^\circ\text{D} > 18 \text{ }^\circ\text{D}$: donc le lait n'est pas frais

d. Il y a une proportionnalité :

$$c_{\text{m}} = c_{\text{S}} \times M = \frac{c V_{\text{e}}}{V_{\text{S}}} \times M = \frac{1}{9} \times \frac{V_{\text{e}} (\text{en mL})}{10} \times 90 = V_{\text{e}} (\text{en mL})$$

et $10V_{\text{e}} (\text{en mL}) = \text{degré Dornic du lait}$



b. À l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stoechiométriques.

c. $\frac{n_{\text{SO}_2, \text{i}}}{5} = \frac{n_{\text{MnO}_4^-, \text{e}}}{2}$.

d.

$$\frac{c_1 V_1}{5} = \frac{c V_{\text{e}}}{2}$$

$$c_1 = \frac{5}{2} \times \frac{c V_{\text{e}}}{V_1}$$

$$c_1 = \frac{5}{2} \times \frac{1,0 \times 10^{-2} \times 8,0 \times 10^{-3}}{10,0 \times 10^{-3}} = 2,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

e. $m_1 = n_1 \times M = c_1 \times V_0 \times M = 1,3 \text{ g}$ présent dans $1,00 \times 10^4 \text{ m}^3$ d'air.

f. $m_2 = \frac{m_1}{10^4} = 1,3 \times 10^{-4} \text{ g}$ présent dans 1 m^3 d'air.

g. $m_2 = 1,3 \times 10^2 \text{ } \mu\text{g} < 500 \text{ } \mu\text{g}$ donc le seuil d'alerte n'est pas dépassé.

31. Proposition de rédaction d'une synthèse de documents

Plusieurs espèces chimiques sont présentes dans le vin, la plus abondante est l'eau (au moins 80 %), la deuxième est l'éthanol qui représente entre 7 à 16 % du volume total du vin.

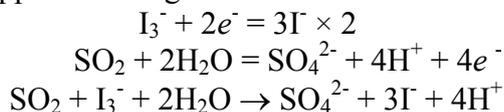
D'autres espèces peuvent être présentes dans des proportions différentes selon la qualité, l'âge et le type de vin (rouge, blanc). On trouve des acides comme l'acide citrique, lactique, tartrique, malique, des espèces ioniques, du dioxyde de soufre et des sucres.

On s'intéresse à une espèce particulière : le dioxyde de soufre SO_2 qui est un antiseptique rajouté aux moûts à la vendange et au vin pendant l'élevage, pour contrôler le développement de microorganismes. Il faut cependant en limiter l'utilisation car une quantité trop importante pourrait altérer la qualité du vin et même être nocive pour le consommateur.

Le dioxyde de soufre existe sous deux formes : une forme libre et une forme combinée à une autre espèce chimique présente dans le vin.

On détermine la quantité de SO₂ (libre ou totale) en effectuant un titrage par dosage : l'espèce titrée est SO₂, l'espèce titrante est le diiode I₂, et pour repérer l'équivalence, on utilise un indicateur de fin de réaction : l'empois d'amidon. À l'équivalence, la solution passe d'incolore à violette. La réaction entre SO₂ et I₂ (une solution de diiode est préparée avec une solution de iodure de potassium (K⁺, I⁻) et I₂ + I⁻ → I₃⁻) est une réaction d'oxydoréduction.

L'équation de la réaction support de titrage s'écrit :



À l'équivalence, on peut écrire la relation suivante :

$$\frac{n_{SO_2,i}}{1} = \frac{n_{I_2}}{1}$$

on détermine ainsi la quantité de dioxyde de soufre.

Ce titrage permet de contrôler la qualité du vin. Les normes en vigueur à respecter sont pour les vins secs : 160 mg·L⁻¹ pour les vins rouges, 210 mg·L⁻¹ pour les vins blancs et 300 mg·L⁻¹ pour les vins liquoreux.

Chapitre 24 – Stratégie de la synthèse organique

Manuel pages 483 à 498

Choix pédagogiques

Ce chapitre s'inscrit dans le thème « Défis du XXI^e siècle ». Il est basé sur l'analyse critique de protocoles expérimentaux. La structure proposée n'est pas habituelle : le chapitre est composé d'activités et de bilans qui aident à acquérir les bons réflexes pour analyser des protocoles expérimentaux. Chaque aspect de l'analyse de protocole est abordé sur un exemple. Il n'y a donc pas de cours mais des bilans en fin d'activités documentaires.

Les activités 1 à 4 portent sur l'analyse de deux protocoles expérimentaux différents qui permettent de traiter les deux cas rencontrés au laboratoire : l'obtention d'un produit qui a précipité et l'obtention d'un produit qui est en solution dans le solvant considéré.

L'activité 1 (identifier les espèces chimiques mises en jeu) doit nécessairement être réalisée avant d'aborder au choix les activités 2 à 4 (étape de transformation, étape de traitement, étapes d'identification et de purification).

L'objectif de l'activité 5 est de comparer deux protocoles permettant de synthétiser une même espèce chimique, comme demandé dans le programme.

Des animations, des vidéos documentaires et d'expériences illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et, certaines d'entre elles, sur les sites Internet compagnon Sirius.

Page d'ouverture

Bioréacteurs

Cette photo a été choisie pour montrer que la synthèse organique omniprésente dans la chimie industrielle évolue pour se tourner vers des modes de fonctionnement plus sélectifs mais aussi plus respectueux de l'environnement. Il existe autre chose que la chimie de laboratoire réalisée par les élèves !

Activités

Activité documentaire d'introduction. Protocoles expérimentaux de deux synthèses organiques.

Retrouver les étapes d'une synthèse organique

A1, B1 : transformation.

A2, A4, B2, B4 : traitement.

A3, A5, B3, B5 : identification.

Activité documentaire 1. Identifier les espèces chimiques mises en jeu

Commentaires

Cette activité est indispensable à l'analyse de tout protocole d'expérience. Toutes les connaissances acquises tant en chimie organique que sur la réaction chimique doivent être réinvesties.

Réponses

1. Identifier les espèces chimiques mises en jeu

a. Grâce aux équations de réaction, on peut déduire que :

- pour le protocole A : les réactifs sont l'acide salicylique (C₇H₆O₃) et l'anhydride éthanoïque (C₄H₆O₃) ;

- pour le protocole B : les réactifs sont l'acide salicylique (C₇H₆O₃) et le méthanol (CH₃OH).

b. - Protocole A : le produit d'intérêt est l'acide acétylsalicylique ou l'aspirine (C₉H₈O₄) ; sous-produit d'acide éthanoïque (CH₃COOH) ;

- Protocole B : le produit d'intérêt est le salicylate de méthyle ou l'essence de Wintergreen (C₈H₈O₃) ; sous-produit de l'eau (H₂O).

c. L'acide sulfurique concentré est un catalyseur. Dans l'écriture de la réaction, il apparaît sur la flèche de transformation.

d. Un solvant est présent en grande quantité. Il permet de solubiliser les espèces chimiques présentes. Un réactif peut jouer le rôle de solvant, ce sera alors le réactif en excès.

2. Déterminer les quantités de matière mises en jeu

a. Un litre de solution d'acide sulfurique à 98 % possède une masse de 1,84 kg.

La masse de H₂SO₄ représente donc $m = 0,98 \times 1,84 = 1,80$ g, soit une quantité de matière de :

$$n = \frac{m}{M} = \frac{1,80}{98,1} = 1,84 \times 10^{-2} \text{ mol}$$

b.

Espèce chimique introduite	État physique	Masse m (g) ou volume V (mL) introduit	M ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)	Masse volumique ($\text{kg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Quantité de matière n introduite (mol)
acide salicylique	solide	6,0 g	138,1	-	$4,3 \times 10^{-2}$
anhydride éthanoïque	liquide	12 mL	102,1	1,05	$1,2 \times 10^{-1}$
acide sulfurique concentré	liquide	0,25 mL	98,1	1,84	$4,6 \times 10^{-6}$

c. Les réactifs sont bien l'acide salicylique et l'acide éthanoïque. L'acide sulfurique concentré est le catalyseur, introduit en très petite quantité.

d. Il n'y a pas de solvant introduit lors de cette synthèse.

e. Le réactif limitant est l'acide salicylique.

f. La quantité de matière d'aspirine obtenue est :

$$n_{\text{obtenu}} = \frac{m_{\text{obtenue}}}{M_{\text{aspirine}}} = \frac{6,2}{180} = 3,4 \times 10^{-2} \text{ mol}$$

Le rendement est défini par $r = \frac{n_{\text{obtenu}}}{n_{\text{max}}}$. Ici $n_{\text{max}} = 4,3 \times 10^{-2}$ mol.

Le rendement est égal à 79 %.

Activité documentaire 2. Étape de transformation

Commentaires

Conformément au programme, une identification des différents paramètres d'expérience va être réalisée afin que l'élève puisse se rendre compte que l'expérimentateur peut modifier des paramètres afin d'optimiser la synthèse. Des notions abordées en classe de 1^e S sur les interactions entre molécules doivent être réinvesties.

Réponses

1. Choix des paramètres expérimentaux

Les paramètres expérimentaux spécifiés dans les protocoles d'expérience proposés sont : la température et la durée de chauffage lors de la transformation, les quantités de réactifs, de catalyseur et de solvant introduites.

A. Température

- a. Chauffer le milieu réactionnel permet d'augmenter la vitesse de la transformation. En outre, le chauffage permet d'accroître la solubilité des composés dans le solvant.
- b. « Chauffer à reflux » : chauffer le milieu réactionnel à ébullition du solvant.
- c. Dans le protocole A, le milieu réactionnel n'est pas chauffé au reflux contrairement au protocole B.

B. Solvant

- a. Le méthanol joue à la fois le rôle de réactif et de solvant dans le protocole B. Il est introduit en très large excès.
- b. Le méthanol est un solvant polaire.
- c. Le méthanol solubilise l'acide salicylique qui est un composé polaire aussi.
- d. Il est nécessaire de solubiliser les espèces chimiques introduites dans le ballon afin que la transformation s'effectue en milieu homogène et soit ainsi plus efficace.
- e. On chauffe pour que la cinétique soit favorisée (voir partie température).

C. Durée de la transformation

- a. La durée de la transformation pour le protocole B est beaucoup plus importante que pour le protocole A.
- b. Cette durée peut être diminuée si l'expérimentateur joue sur les paramètres expérimentaux précédents : en augmentant la température et en choisissant un solvant qui solubilise les réactifs. La présence d'un catalyseur peut aussi permettre de diminuer le temps de réaction.

2. Choix du montage

- a. Faire apparaître sur le schéma légendé : support élévateur, chauffe-ballon, ballon, réfrigérant à eau.
- b. Pour que ce montage soit effectué en sécurité, il faut attacher le ballon grâce à une pince plate, et surtout, il faut que le montage soit positionné sur la potence suffisamment haut, afin de pouvoir retirer le bloc de chauffage en abaissant simplement le support élévateur.
- c. Un montage de chauffage à reflux est nécessaire, car lors du chauffage, des vapeurs des espèces chimiques présentes sont produites et sont ainsi recondensées dans le milieu réactionnel. Il n'y a ainsi pas de pertes de produits. De plus, les vapeurs ne sont pas respirées par l'expérimentateur.

3. Aspects liés à la sécurité

- a.** Les équipements individuels de sécurité à porter obligatoirement au laboratoire sont : une blouse en coton qui sera fermée et des lunettes de sécurité (même pour les porteurs de lunettes de vue, port de lentilles interdit).
- b.** Pour manipuler l'acide sulfurique concentré corrosif, il faut porter des gants adaptés. Le méthanol s'utilise exclusivement sous une hotte aspirante en prenant les précautions nécessaires à l'utilisation des produits CMR.
- c.** Le fait de verser de l'acide sulfurique dans le milieu réactionnel peut provoquer un échauffement très brusque et important de la solution qui peut s'accompagner de projections corrosives. D'où les précautions mentionnées.
- d.** Pour refroidir une solution, on la plonge dans un bain de glace (mélange glace et eau en équilibre à 0°C ou glace fondante).

Activité documentaire 3. Étape de traitement

Commentaires

Cette activité se base sur des connaissances expérimentales acquises dès la classe de seconde. L'élève va devoir faire le lien avec sa pratique expérimentale et analyser la séquence des opérations réalisées en fonction de la nature du produit synthétisé (solide ou en solution).

Réponses

Protocole A

1. Choix du montage

- Le produit d'intérêt a précipité : il est solide.
- À la fin de la transformation, il reste dans le milieu de réaction le réactif en excès (anhydride éthanoïque), le catalyseur (H_2SO_4) et aussi le réactif limitant (acide salicylique) qui n'a pas réagi.
- Un filtre Büchner associé à une fiole à vide est utilisé pour effectuer la séparation. La fiole à vide doit être attachée pour être utilisée en sécurité.
- L'opération s'appelle un essorage : c'est le solide qui nous intéresse.

2. Choix des techniques expérimentales utilisées

- Le fait de refroidir le contenu du ballon permet de faire précipiter le solide voulu. La solubilité diminuant en général avec la température. On récupère ainsi plus de produit sous forme solide.
- Les espèces en solution sont éliminées lors des lavages sur Büchner, à savoir l'anhydride éthanoïque et le catalyseur (H_2SO_4).
- Le lavage est effectué à l'eau glacée pour que l'aspirine sur le filtre soit le moins possible redissous.
- Placer le solide à l'étuve permet d'éliminer l'eau dont s'est imprégné le solide.

Protocole B

1. Choix du montage

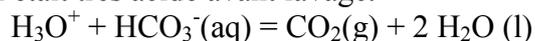
L'extraction liquide-liquide s'effectue grâce à une ampoule à décanter. On y verse le mélange réactionnel puis le solvant d'extraction. L'ampoule sortie de son support est retournée et un premier dégazage est effectué. On agite vigoureusement l'ampoule et on dégaze à nouveau. Une fois l'ampoule reposée sur son support et le bouchon retiré, on laisse les deux phases se séparer par décantation. On collecte les différentes phases.

2. Choix des techniques expérimentales utilisées

- L'opération de lavage est celle où l'on verse sur la phase organique obtenue après décantation une solution aqueuse d'hydrogénocarbonate de sodium. Une dernière opération de lavage est effectuée avec 25 mL d'eau.
- On récupère plus de produit d'intérêt lorsque l'on extrait deux fois avec 15 mL de solvant d'extraction plutôt qu'une fois avec 30 mL de solvant.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 24. Stratégie de la synthèse organique

c. Le lavage avec la solution d'hydrogencarbonate de sodium permet d'obtenir un milieu neutre. Le brut réactionnel était très acide avant lavage.



Les espèces acides sont éliminées, il y a dégagement de $\text{CO}_2(\text{g})$.

d. Le fort dégagement gazeux de CO_2 provoquerait de très fortes surpressions dans l'ampoule à décanter, d'où un danger de projection de solution.

e. Le lavage à l'eau permet de revenir à un pH neutre. La présence d'acide ou de base pourrait gêner lors de traitements ultérieurs du produit d'intérêt.

f. En phase organique sont présentes les espèces chimiques suivantes : le salicylate de méthyle, éventuellement l'acide salicylique n'ayant pas réagi, le solvant cyclohexane, de l'eau à l'état de traces.

g. Un séchage est ensuite envisagé avec un sel anhydre. Puis le solvant est séparé du produit d'intérêt par distillation grâce à un évaporateur rotatif.

Activité documentaire 4. Étapes d'identification et de purification

Commentaires

Cette activité se base sur des techniques d'identification utilisées dès la classe de seconde. L'élève devra extraire et exploiter les résultats d'expériences et commenter ces résultats. Cette activité a pour but de faire réaliser à l'élève qu'il existe des techniques d'analyse propres aux solides et propres aux liquides et d'autres qui sont communes aux deux. L'élève devra utiliser les connaissances acquises sur les techniques d'analyse (C.C.M., analyse de spectres).

Réponses

1. Choix des techniques expérimentales utilisées

a. Techniques d'identification mises en œuvre :

- protocole A : synthèse d'une espèce solide : mesure de température de fusion, C.C.M. ;
- protocole B : synthèse d'une espèce liquide : mesure d'indice de réfraction.

b. Techniques de purification envisagées :

- protocole A : synthèse d'une espèce solide : recristallisation + schéma du montage : ballon + réfrigérant avec bloc de chauffage et élévateur ;
- protocole B : synthèse d'une espèce liquide : distillation + schéma du montage (voir classe de seconde).

2. Interpréter des résultats expérimentaux

a. Produit formé :

- protocole A : synthèse d'une espèce solide. CCM : le produit brut contient un mélange d'acide salicylique (réactif) et d'aspirine. Ceci est confirmé par l'analyse de la température de fusion du produit brut qui est différente de celle de l'aspirine pure.
- protocole B : synthèse d'une espèce liquide. La mesure de l'indice de réfraction est proche de celle du produit pur. L'analyse du spectre IR montre la présence d'un groupe caractéristique hydroxyle (présent dans le réactif et le produit) et d'un groupe caractéristique C=O. Étant donné le nombre d'onde, on peut conclure à la présence d'une fonction ester.

L'impureté majoritaire est l'acide salicylique dans les deux cas.

b. Pour le protocole A, il est nécessaire de purifier le produit brut obtenu, pas dans le cas du protocole B.

La réalisation d'une C.C.M. peut être envisagée pour confirmer la pureté du produit pour le protocole B, ainsi que la réalisation d'un spectre RMN.

3. Faire une recherche

Le but d'une recristallisation est de purifier un produit brut solide.

La recristallisation est basée sur la différence de solubilité à chaud et à froid du produit d'intérêt et de l'impureté (réactif en général) dans un solvant donné.

Activité documentaire 5. Comparaison de deux protocoles

Commentaires

Cette activité permet de comparer deux protocoles d'expérience. L'élève pourra ainsi se rendre compte que de nombreux paramètres sont à prendre en compte avant d'envisager une manipulation et en particulier l'aspect coût et sécurité.

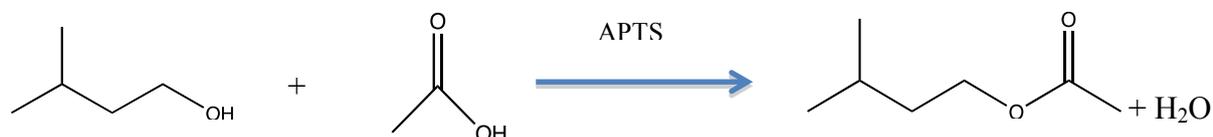
Les corrections suivantes ont été apportées dans le manuel élève :

- *protocole B, 3^e ligne : l'acide acétique est remplacé par l'acide éthanoïque ;*
- *tableau : le prix d'un litre d'alcool isoamylique est de 32 € (et non 1 kg à 39,50 €).*

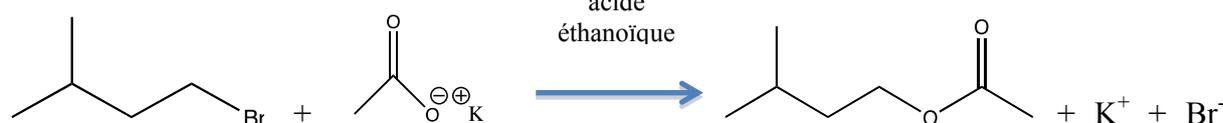
Réponses

1. Analyse des documents

a. Protocole A :



Protocole B :



b. Protocole A : alcool isoamylique à 0,32 € ; acide éthanoïque à 1,12 € ; APTS à 0,21 € ; soit un total de 1,65 €.

Protocole B : éthanoate de potassium à 0,25 € ; acide éthanoïque à 0,30 € ; bromure d'isoamyle à 0,43 € soit un total de 0,98 €.

c. Avant de manipuler les espèces chimiques mises en jeu, il faut regarder les pictogrammes de sécurité pour savoir quels équipements utiliser. Ici, il faut travailler avec gants, lunettes et blouse.

d. On oublie souvent le coût et l'aspect lié à la sécurité des déchets chimiques issus des manipulations. Il faut trier les déchets et les faire éliminer correctement.

e. Pour choisir la synthèse la plus intéressante à mettre en œuvre, il faut aussi prendre en compte le rendement de la synthèse, ceci inclut la purification éventuelle.

2. Comparer les protocoles A et B

a. L'ajout de la solution de carbonate de sodium se fait après décantation des phases organiques et aqueuse dans le protocole A, alors que dans le protocole B la solution basique est ajoutée après l'étape de transformation.

Sinon, on retrouve dans les deux protocoles : extraction puis lavage, puis séchage et évaporation du solvant qui sont les étapes de traitement d'une espèce en solution dans un solvant.

b. Techniques d'identification envisagées : indice de réfraction (A, B), C.C.M. (B).

c. *A priori*, les deux sont réalisables. Pour le temps d'un TP en classe, le protocole A est plus adapté car la durée de la transformation est plus courte.

Il faut faire l'expérience pour savoir quelle synthèse donne le meilleur rendement.

Exercices d'application

5 minutes chrono !

1. Mots manquants

- catalyseur
- petite
- solvant
- extraction liquide/liquide ; ampoule à décanter
- d'identification
- recristallisation

2. QCM

- un ester
- catalyseur
- l'alcool
- 64 %
- sa température de fusion
- une distillation

Compétences exigibles

3. a. La formule brute du 2-nitrobenzalhédyde est $C_7H_5O_3N$.

Sa masse molaire est $M_1 = 151 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$. La quantité de matière introduite est :

$$n_1 = \frac{m_1}{M_1} = 3,3 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

b. La quantité de matière d'acétone (C_3H_6O ; $M_2 = 58 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$) introduite est :

$$n_2 = \frac{V_2 \times d}{M_2} = 1,4 \times 10^{-1} \text{ mol}$$

c. La quantité de matière d'ions hydroxyde introduite est $n_3 = C \times V = 5 \times 10^{-3} \text{ mol}$.

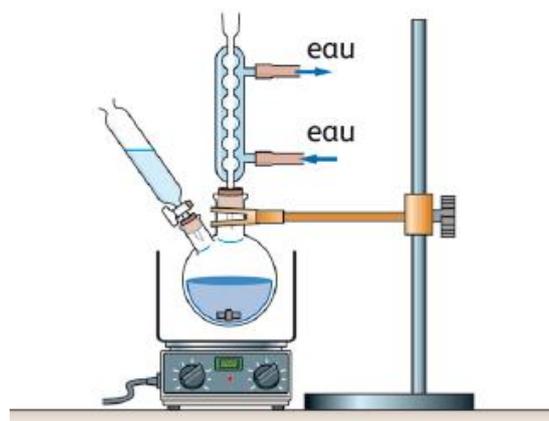
d. L'eau distillée sert de solvant.

4. a.

Espèce chimique	2-nitrobenzaldehyde	Acétone	Hydroxyde de sodium (NaOH)
État physique	solide	liquide	en solution
Masse	0,500 g	/	/
Volume	/	10 mL	2,5 mL
Concentration	/	/	$2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$
Masse molaire	$151 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$	$58 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$	$40 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
Densité	/	0,80	/
Quantité de matière	$3,3 \times 10^{-3} \text{ mol}$	$1,4 \times 10^{-1} \text{ mol}$	$5 \times 10^{-3} \text{ mol}$

b. Vu les nombres stœchiométriques, c'est le 2-nitrobenzaldehyde qui est le réactif limitant.

5.



6. a. Pendant une séance de TP, on doit obligatoirement porter une blouse en coton fermée et des lunettes de protection.

b. Pour éviter les irritations cutanées, il faut utiliser des gants pour manipuler cette espèce chimique. De plus, il est préférable de manipuler le solide sous hotte pour éviter de respirer les poussières de solide. La synthèse peut être réalisée à la paillasse.

7. a. Afin de séparer le produit solide formé du reste du mélange réactionnel, il faut essorer le solide. Il faut ensuite laver le solide.

b. Ces opérations sont effectuées grâce à un filtre Büchner placé sur une fiole à vide.

8. a. Pour analyser le solide obtenu, on peut envisager de mesurer une température de fusion, de réaliser une C.C.M., de réaliser des analyses spectrales (RMN, IR).

b. Pour purifier un solide, on réalise une recristallisation.

Compétences générales

9. a. Groupes caractéristiques à entourer : groupe carbonyle (2), groupe amine (2).

b. La structure de l'indigo présente des doubles liaisons conjuguées, donc la molécule absorbe dans le visible.

c. Le spectre A est un spectre UV-visible, le spectre B est le spectre IR. L'abscisse des spectres IR s'exprime en nombre d'onde (cm^{-1}) et l'échelle se lit de droite à gauche.

d. Dans le spectre IR, la bande vers 3300 cm^{-1} caractérise un groupe amine, celle fine vers 1700 cm^{-1} caractérise un groupe carbonyle.

e. Le spectre UV-visible de l'indigo présente une bande d'absorption dont le maximum se situe à $\lambda_{\text{max}} = 600 \text{ nm}$. La solution d'indigo apparaît donc bleue, couleur complémentaire de la radiation absorbée.

10. a. D'après l'exercice 4, le réactif limitant est le 2-nitrobenzaldéhyde.

b. Le rendement de la synthèse est défini par :

$$r = \frac{n_{\text{obtenu}}}{n_{\text{max}}}$$

n_{obtenu} est la quantité de matière de produit d'intérêt obtenu et n_{max} la quantité de matière maximale que l'on obtiendrait si la réaction était totale.

La masse molaire de l'indigo ($\text{C}_{16}\text{H}_{10}\text{O}_2\text{N}_2$) est égale à $M_3 = 262 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

$$n_{\text{obtenu}} = \frac{0,375}{262} = 1,43 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

$$n_{\text{max}} = \frac{n_{\text{réactif limitant}}}{2} = \frac{3,3 \times 10^{-3}}{2} = 1,65 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

$$r = 86,5 \%$$

Exercices de méthode

11. Exercice résolu.

12. a. Les réactifs sont le benzaldéhyde et les ions hydroxyde HO⁻. Les produits sont l'acide benzoïque et l'alcool benzylique.

b. La dissolution de l'hydroxyde de potassium fournit de l'énergie au milieu. La solution peut s'échauffer fortement. Il faut donc plonger l'erlenmeyer où a lieu la dissolution dans un bain de glace. Le benzaldéhyde doit être ajouté sous hotte car il est nocif par inhalation.

c. Si pH < pK_{a-1}, l'acide benzoïque se trouve sous forme moléculaire C₆H₅CO₂H.

Si pH > pK_{a+1}, l'acide benzoïque se trouve sous forme ionique C₆H₅CO₂⁻.

d. Les espèces chimiques qui se trouvent en phase aqueuse sont ioniques ou ont des interactions privilégiées avec le solvant polaire H₂O. Celles qui se trouvent en phase organique ont plus d'affinités avec le solvant organique diéther.

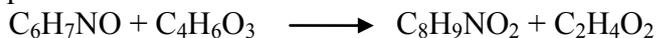
La synthèse est réalisée en milieu basique, donc l'acide benzoïque se trouve sous forme ionique. L'alcool benzylique est sous forme moléculaire. Dans la phase aqueuse se trouve donc l'acide benzoïque, dans la phase organique l'alcool benzylique.

e. On acidifie ensuite la phase aqueuse pour transformer l'acide benzoïque ionique en acide benzoïque moléculaire (voir diagramme de prédominance). En solution acide, l'acide benzoïque précipite donc ; on peut ainsi le récupérer par essorage.

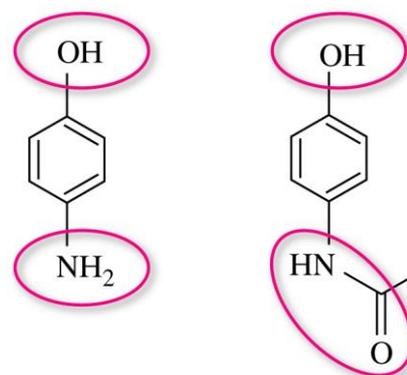
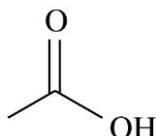
f. Le produit solide est donc l'acide benzoïque, le liquide est l'alcool benzylique.

13. a. b. et c. Les réactifs sont le paracétamol et l'anhydride éthanóique, le produit d'intérêt est le paracétamol. Il se forme aussi un autre produit.

L'équation de la réaction s'écrit :



Le produit formé est de l'acide éthanóique de formule topologique :



d. Le réactif limitant choisi sera le *paraaminophénol*, pour des raisons de coût principalement.

Exercices d'entraînement

14. a. Les réactifs sont l'alcool benzylique et les ions hypochlorite. Le produit est le benzaldéhyde.

b. On observe une phase aqueuse (solvant eau) et une phase organique (solvant éthanoate d'éthyle).

c. Dans la phase aqueuse se trouvent les ions hypochlorite et les ions.

Dans la phase organique se trouve l'autre réactif, l'alcool benzylique.

d. Les deux réactifs se trouvent dans deux phases différentes. Or, lors de l'étape de transformation, il faut que les réactifs soient en contact. On utilise donc du bromure de tétrabutylammonium qui permet de transférer un réactif d'une phase à une autre pour que la transformation ait lieu (ici les ions hypochlorite « passent » en phase organique). Cette espèce chimique n'apparaît pas dans le bilan de la réaction et permet à la transformation d'avoir lieu, d'où son nom de « catalyseur de transfert de phase ».

e. Le réactif limitant est l'alcool benzylique. Le rendement de cette synthèse est :

$$r = \frac{n_{\text{obtenu}}}{n_{\text{max}}}$$

$$n_{\text{obtenu}} = \frac{0,880}{106} = 8,3 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

$$n_{\text{max}} = 10 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

$$r = 83 \%$$

L'analyse C.C.M. montre que le brut réactionnel contient du benzaldéhyde mais aussi de l'alcool benzylique (deux taches). Il est nécessaire de purifier le brut réactionnel par recristallisation.

15. a. Image 1 : étape de transformation

Dans un ballon monocol, introduire de l'huile, de la soude et de l'éthanol. Porter le mélange à reflux.

Image 2 : étape de traitement

Laisser refroidir le milieu réactionnel et le verser dans une solution aqueuse salée. Le savon précipite.

Image 3 : étape de traitement

Essorer le savon formé sur un filtre plissé.

b. Les données qui ne sont pas spécifiées sur le schéma sont les quantités de réactifs et solvant introduites, la durée de la transformation, la concentration de la solution aqueuse salée.

c. On peut reprendre les quantités de la synthèse proposée dans l'activité 3 du livre Sirius 2nde page 48. Soit 20 mL d'huile alimentaire, 20 mL de solution d'hydroxyde de sodium de concentration environ $10 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ et environ 20 mL d'éthanol. Durée de réaction : 15 min à reflux. La solution aqueuse de chlorure de sodium est saturée.

16. a. Les réactifs sont le 1-bromobutane et les ions iodure (I⁻). Le solvant est l'acétone.



c. Le réactif limitant est le 1-bromobutane.

17. a. La solution présente un aspect laiteux car c'est une émulsion : de fines gouttelettes de phase organique (eugénol) dans l'eau. C'est le phénomène de diffusion.

b. Pour récupérer l'eugénol, on va utiliser la technique d'extraction liquide-liquide.

c. Les critères de choix d'un solvant d'extraction sont :

- l'espèce à extraire doit être plus soluble dans le solvant extracteur que dans le solvant initial (ici l'eau) ;

- le solvant extracteur et le solvant initial ne doivent pas être miscibles.

On peut donc utiliser l'éther, le dichlorométhane et le cyclohexane sur ces deux critères. De plus, le solvant d'extraction devra être éliminé grâce à un évaporateur rotatif. Il sera plus facile d'éliminer un solvant de faible température d'ébullition. On choisira plutôt l'éther ou le dichlorométhane. Sur un critère de sécurité, on préférera l'éther (le dichlorométhane étant suspecté CMR).

d. Protocole d'expérience

- Verser dans une ampoule à décanter la solution laiteuse contenant l'eugénol.

- Ajouter 20 mL d'éther. Agiter l'ampoule à décanter en dégazant de temps en temps. Laisser la décantation se faire. Séparer les phases. Extraire la phase aqueuse avec deux fois 20 mL d'éther. Rassembler les phases organiques.

- Sécher la phase organique résultante sur sulfate de magnésium anhydre, filtrer et évaporer le solvant à l'évaporateur rotatif.

18. a. Le principe de la chromatographie sur colonne est le même que celui de la chromatographie sur couche mince. La chromatographie sur colonne permet de séparer et de récupérer de façon quantitative les différents constituants d'un mélange. La séparation est basée sur la différence d'affinité des espèces chimiques à séparer avec la phase fixe (silice contenue dans la colonne) et la phase mobile (l'éluant). Ici, l'éluant descend dans la colonne par gravité.

b. Cette technique peut être utilisée dans l'étape de purification (étape de traitement). La C.C.M. est utilisée dans une étape d'identification.

19. a. Le montage à reflux n'est pas correct car il n'y a pas de support élévateur sous le chauffe-ballon. De plus, on ne plonge pas un thermomètre directement dans le ballon en le positionnant dans le réfrigérant, il faut utiliser un ballon avec un deuxième col dans lequel on place un thermomètre de façon étanche.

b. Le méthanol est une espèce chimique toxique : elle est classée dans la catégorie CMR (cancérogène, mutagène, toxique pour la reproduction).

c. Aspects de sécurité non respectés :

- protection des personnes : oubli des lunettes pour manipuler, les manches de la blouse sont relevées, oubli des gants pour manipuler le méthanol qui devrait être manipulé sous hotte aspirante ;

- montage : voir réponse **a.** ;

- utilisation de la verrerie et des produits : le prélèvement de l'huile de colza s'effectue en deux fois, il est préférable d'utiliser une éprouvette plus grande et d'effectuer le prélèvement en une seule fois. Le méthanol doit être manipulé avec des gants et sous hotte aspirante.

d. Mode opératoire : dans un ballon de 250 mL, introduire 100 g d'huile de colza, 25 g de méthanol et de la soude. Chauffer le mélange réactionnel à 80°C pendant 60 minutes. Laisser refroidir le milieu réactionnel, puis transférer le tout dans une ampoule à décanter. Attendre la séparation des deux phases. Récupérer la phase inférieure contenant le glycérol.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 24. Stratégie de la synthèse organique

- 20. a.** Transformation : « Dans un ballon monocol... pendant 30 minutes ».
« Un produit jaune-orangé apparaît, il précipite pendant le chauffage » : cette phrase est un complément d'information sur ce qui se passe lors de l'étape de transformation.
Traitement : « Laisser refroidir... eau froide ».
Identification : « Mesurer sa température de fusion ».
Traitement : « Si nécessaire, effectuer une recristallisation du produit brut dans l'éthanol à 95 % ».
Identification : « Mesurer la température de fusion du produit recristallisé ».
Les réactifs sont l'acide de Meldrum et le DMAB. L'eau joue le rôle de solvant.
- b.** La température du brut réactionnel est différente de celle tabulée du produit attendu (173°C). Il est donc nécessaire d'effectuer une recristallisation pour purifier le produit brut.
- c.** La formule brute du produit obtenu est C₁₅H₁₇O₄N. Les deux réactifs sont introduits dans les proportions stoechiométriques. La quantité de matière maximale de produit attendue est $n_{\max} = 5,0 \times 10^{-3}$ mol. La quantité de matière obtenue est :

$$n_{\text{obtenue}} = \frac{m}{M_1} = 3,6 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

Le rendement est donc de 72 %.

Exercices de synthèse

- 21. Les corrections suivantes ont été apportées dans le manuel élève :**
- le terme « dilué » a été retiré de la flèche de la réaction de l'énoncé ;
 - texte, 2^e ligne : 2,1 g d'alcool benzylique (au lieu de 2,0 g) ;
 - le tableau question h. est modifié :

Spectre	Déplacement chimique (μm)	Hauteur de la courbe d'intégration (cm)	Signal
Spectre 1	2,5	1	singulet
	4,7	2	singulet
	7,4	5	massif
Spectre 2	7,6	5	massif
	12,0	1	singulet

- a.** Équation de la réaction d'oxydation :
 $3\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{OH}(\text{aq}) + 4\text{MnO}_4^- (\text{aq}) \rightarrow 3\text{C}_6\text{H}_5\text{COO}^- (\text{aq}) + 4\text{MnO}_2(\text{s}) + 4\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \text{HO}^- (\text{aq})$
- b.** Réactifs : alcool benzylique, ions permanganate ; produits : ionS benzoate, dioxyde de manganèse, de l'eau et des ions hydroxyde sont aussi produits ; le solvant est l'eau.
- c.** Le solide éliminé lors de la première filtration sur célite est le dioxyde de manganèse (solide marron).
- d.** Dans le filtrat aqueux se trouve les ions et en particulier l'acide benzoïque sous forme d'ions benzoate, car le pH du filtrat est basique (présence d'ions hydroxyde), bien supérieur au pK_a du couple acide benzoïque/ion benzoate.
- e.** On ajoute de l'acide chlorhydrique au filtrat afin de neutraliser les ions hydroxyle présents (introduits en excès) puis de protoner l'ion C₆H₅COO⁻(aq) pour former l'acide benzoïque. Ce dernier, très peu soluble en milieu aqueux, précipite.
- f.** L'analyse C.C.M. montre que :

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 24. Stratégie de la synthèse organique

- le deuxième filtrat contient encore de l'alcool benzylique, ce qui est normal puisqu'il a été introduit en excès ; il contient également de l'acide benzoïque qui n'a pas précipité ;
- le produit obtenu ne contient que de l'acide benzoïque.

g. Les quantités de matière introduites sont les suivantes :

$$\text{alcool benzylique} : n_{\text{alcool}} = \frac{2,1}{108} = 19,4 \text{ mmol} ;$$

$$\text{ion permanganate} : n_{\text{MnO}_4^-} = 25 \text{ mmol}.$$

D'après l'équation de la réaction ($\frac{n_{\text{alcool}}}{3} > \frac{n_{\text{MnO}_4^-}}{4}$), l'ion permanganate est en défaut.

$$\text{Donc } n_{\text{max}} = \frac{3}{4} \times n_{\text{MnO}_4^-}. \text{ La quantité de matière obtenue est } n_{\text{obtenue}} = \frac{m}{M_2}.$$

Le rendement obtenu est de 79 %.

22. Exemple de synthèse de documents

Dans le manuel élève, le contenu du dossier de documents a été modifié, il comporte :

- *trois protocoles de synthèse ;*
- *des extraits de cahier de laboratoire avec des résultats d'expériences.*

Les données sur les espèces chimiques utilisées, issues d'un catalogue fournisseur, sont supprimées.

Les deux synthèses proposées permettent de **synthétiser des esters**, molécules odorantes à partir d'un alcool et d'un acide carboxylique.

Ce qui **diffère** entre les deux protocoles (outre la molécule synthétisée), c'est le montage utilisé. Dans le protocole A, un **montage à reflux** est utilisé, alors que dans le protocole B, c'est un **montage de distillation**.

Si l'on regarde les résultats des manipulations effectuées, le protocole B conduit à un **meilleur rendement**.

L'estérification est une réaction équilibrée. Pour augmenter le rendement et ainsi **déplacer l'équilibre**, l'expérimentateur peut choisir un **montage différent** (ici le montage de distillation). Bien évidemment, cela n'est pas possible pour la synthèse de tous les esters. Il faut que sa température d'ébullition soit bien inférieure à celle de l'alcool et de l'acide de départ.

Remarque : on peut aussi utiliser un appareil de Dean-Stark pour déplacer un équilibre d'estérification.

L'expérimentateur peut aussi utiliser un dérivé d'acide tel qu'un anhydride à la place de l'acide carboxylique. La réaction devient alors totale.

Chapitre 25 – Sélectivité en chimie organique

Manuel pages 499 à 514

Choix pédagogiques

Ce chapitre est lié au chapitre 24 sur la stratégie de synthèse qu'il illustre dans le cas précis de la sélectivité. Il fait par ailleurs appel aux notions du chapitre 15 : atomes donneurs et accepteurs de doublet d'électrons. Les élèves n'ont pas à connaître la réactivité des diverses classes fonctionnelles étudiées, mais ils doivent pouvoir identifier plusieurs sites accepteurs de doublet sur une même molécule et ainsi interpréter la formation de plusieurs produits.

Le cours de ce chapitre précise tout d'abord la notion de réactif chimiosélectif et de réaction sélective. Les notions de stéréosélectivité et de régiosélectivité sont hors programme.

Après avoir fait émerger la nécessité de la protection, la stratégie de synthèse d'une espèce avec protection puis déprotection d'un groupe caractéristique est exposée. Les inconvénients de cette méthode, peu efficace en terme de rendement sont précisés. Le chapitre se termine par l'étude du cas particulier de la synthèse peptidique, conformément aux exigences du programme. L'activation du groupe carboxyle est seulement évoquée mais n'est pas détaillée. La nomenclature des espèces polyfonctionnelles est traitée au chapitre 15 ainsi que dans la fiche méthode 7.

Des animations et des vidéos documentaires illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et, certaines d'entre elles, sur les sites Internet compagnon Sirius.

Page d'ouverture

Panayotis Katsoyannis pose devant son modèle de la synthèse de l'insuline

Cette représentation est de Katsoyannis lui-même : chaque boule colorée représente un acide aminé. L'insuline correspond à la double chaîne au centre de la photo. La synthèse de la chaîne du haut est décomposée en haut de la photographie et la synthèse de la chaîne du bas est décomposée en bas. On peut ainsi constater que l'ordre dans lequel Katsoyannis agence les acides aminés n'est pas le fruit du hasard mais résulte d'une stratégie.

Par ailleurs, LIFE était un hebdomadaire grand public en 1964 et on peut apercevoir ici les questions que pose la vulgarisation scientifique.

Activités

Activité documentaire 1. Qu'est-ce qu'un réactif chimiosélectif ?

Commentaires

Nous souhaitons, dans cette activité, introduire la notion de réactif sélectif en comparant deux réactifs bromants, l'un étant plus sélectif que l'autre, sur deux réactifs monofonctionnels. Au terme de l'activité, l'élève doit être en mesure de prévoir le produit de réaction pour une espèce polyfonctionnelle.

Réponses

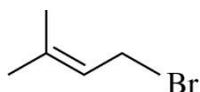
1. Analyser le document

Les molécules appartiennent respectivement aux classes fonctionnelles suivantes (de haut en bas) :

alcool – alcène – alcool – alcène

2. Application aux espèces polyfonctionnelles

- L'espèce chimique appartient à la fois à la classe des alcènes et à celle des alcools.
- D'après le document 1, PBr_3 ne modifie pas la double liaison $\text{C}=\text{C}$ des alcènes, mais effectue la substitution du groupe hydroxyle -OH des alcools par un atome de Br . On propose donc le produit suivant :



- Un réactif est chimiosélectif s'il réagit uniquement avec un groupe caractéristique à l'exclusion des autres groupes caractéristiques ou double liaison $\text{C}=\text{C}$ de la molécule.
- HBr peut transformer le groupe hydroxyle et aussi la double liaison $\text{C}=\text{C}$ de la molécule A : il n'est pas chimiosélectif vis-à-vis de A .

3. Conclusion

Pour effectuer la transformation de A en B en une seule étape, il faut utiliser un réactif chimiosélectif qui a la propriété de réagir avec la double liaison $\text{C}=\text{C}$ mais sans transformer le groupe hydroxyle.

Activité documentaire 2. Comparaison de deux voies de synthèse

Commentaires

Cette activité vient en complément de la précédente. Nous avons montré dans cette dernière que pour obtenir un produit, il faut parfois envisager l'utilisation d'un réactif chimiosélectif ; cette voie correspond à une **voie directe**.

Dans cette seconde activité, nous envisageons l'utilisation d'un réactif qui n'est pas chimiosélectif (en effet, un réactif chimiosélectif n'est pas toujours disponible pour la transformation souhaitée).

Nous exposons alors la **voie indirecte** qui passe par une étape de protection puis de déprotection du groupe caractéristique qui ne doit pas être modifié.

Réponses

1. Comprendre les documents

a.



b. **A** appartient à la classe fonctionnelle des esters : le premier nom dérive de l'acide carboxylique possédant 4 atomes de carbone → butanoate ; le deuxième nom du groupe alkyle possédant 2 atomes de carbone → éthyle d'où **A = butanoate d'éthyle**.

B appartient à la classe fonctionnelle des alcools et à celle des cétones, prioritaire.

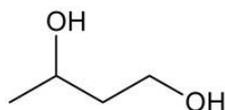
La chaîne carbonée possède 4 atomes de carbone → butan-2-one ; on ajoute le suffixe hydroxy pour le groupe porté par l'atome n°4 d'où **B = 4-hydroxybutan-2-one**.

c. Les deux voies utilisent LiAlH_4 ou tétrahydroaluminate de lithium pour transformer **A** en **B**.

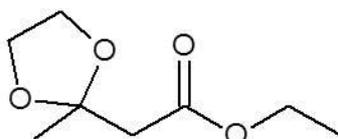
d. Il faut modifier le groupe caractéristique des esters pour transformer **A** en **B**.

2. Interpréter

a. D'après le document 5, LiAlH_4 réduit le groupe carbonyle en groupe hydroxyle, on obtient :

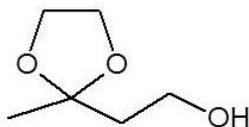


b. D'après le document 4, lors de l'étape 1, on forme un acétal sur la fonction carbonyle, on obtient :



Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 25. Sélectivité en chimie organique

Lors de l'étape 2, LiAlH_4 réduit le groupe caractéristique des esters en groupe hydroxyle :



Enfin lors de l'étape 3, l'acétal est hydrolysé ; le groupe carbonyle est régénéré : on obtient **B**.
c. Une réaction sélective est une transformation au cours de laquelle un groupe caractéristique d'une espèce polyfonctionnelle est transformé à l'exclusion de tous les autres.

d. L'étape 1 correspond à la protection.

L'étape 2 correspond à la réduction.

L'étape 3 correspond à la déprotection.

3. Conclure

La transformation de **A** en **B** correspond à la réduction du groupe caractéristique des esters en alcool. On envisage d'utiliser LiAlH_4 pour effectuer cette réduction.

Néanmoins, la présence d'un groupe carbonyle sur le réactif ne permet pas d'utiliser LiAlH_4 directement ; ce réactif réduit les groupes carbonyles en groupes hydroxyles : on n'obtient pas **B**. Il est donc indispensable de procéder préalablement à la protection du groupe carbonyle puis, après réduction, à sa déprotection afin d'obtenir le produit souhaité.

Activité expérimentale 3. Synthèse du paracétamol

Commentaires

La manipulation permet d'utiliser un montage à reflux et un filtre Büchner. On peut éventuellement faire réaliser la recristallisation par les élèves.

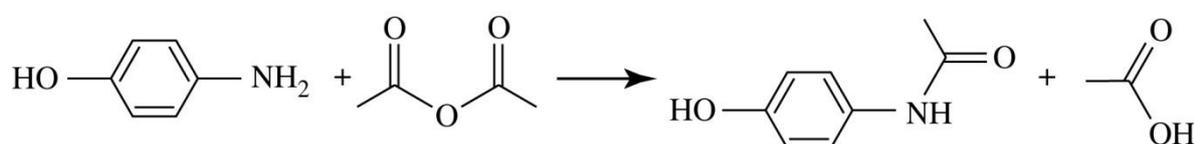
La caractérisation du produit obtenu se fait par mesure de la température de fusion ; le spectre de RMN permettant de vérifier cette détermination.

Réponses

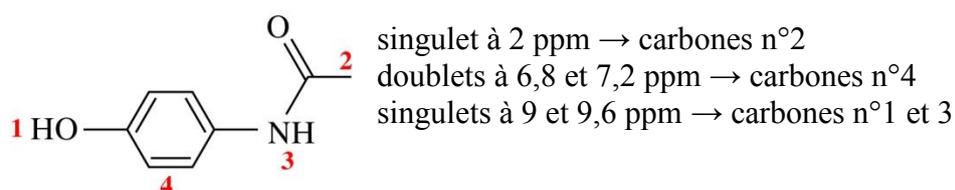
1. Identifier le produit

a. Le paracétamol est le *N*-(4-hydroxyphényl)éthanamide de température de fusion 171°C.

b. L'équation de la réaction est :



c.



2. Analyser la réaction

a. L'atome d'azote joue le rôle de donneur de doublet d'électrons (il possède un doublet non liant). L'un des atomes de carbone lié aux atomes d'oxygène joue le rôle d'accepteur de doublets (l'oxygène est plus électronégatif que le carbone).

b. L'atome d'oxygène du 4-aminophénol possède un doublet non liant ; il peut aussi jouer le rôle de donneur de doublet d'électrons.

c. La transformation est sélective, la transformation n'impacte pas le groupe hydroxyle du 4-aminophénol.

Activité documentaire 4. La synthèse peptidique

Commentaires

Cette activité illustre une stratégie de protection et de déprotection dans le cas de la synthèse peptidique, conformément aux exigences du programme.

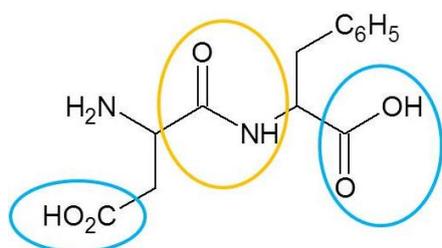
Nous avons choisi comme exemple l'aspartame parce que c'est une molécule familière. Par ailleurs, la présence de deux groupes carboxyles sur la molécule d'acide aspartique peut permettre d'évoquer la régiosélectivité.

Néanmoins, l'aspartame n'est pas rigoureusement un dipeptide dans le sens que le groupe carboxyle est méthylé et donc se trouve sous forme d'ester.

Réponses

1. Analyser les documents

a.

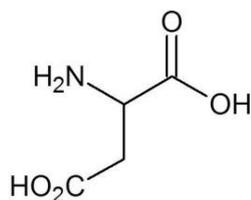


bleu : groupe caractéristique des acides carboxyliques

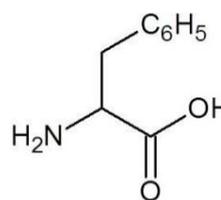
jaune : groupe caractéristique des amides.

b.

Acide aspartique



Phénylalanine



2. Interpréter

À partir d'un mélange d'acide aspartique et de phénylalanine, on peut obtenir 4 dipeptides différents.

3. Émettre des hypothèses

a. Lors de la synthèse de l'aspartame, le groupe carboxyle de la phénylalanine a été protégé.

b. Lors de cette synthèse, il faut protéger le groupe amino de l'acide aspartique et l'un de ses groupes carboxyles.

c. Pour obtenir l'aspartame, il faut :

- protéger le groupe amino de l'acide aspartique ;
- protéger le groupe carboxyle le plus éloigné du groupe amino de l'acide aspartique ;
- protéger le groupe carboxyle de la phénylalanine ;
- activer le groupe carboxyle non protégé de l'acide aspartique ;
- faire réagir les espèces ainsi obtenues ;
- déprotéger les groupes qui doivent l'être.

Exercices d'application

5 minutes chrono !

1. Mots manquants

- a. polyfonctionnelle
- b. protection
- c. sélective
- d. carboxyle

2. QCM

- a. Est toujours un réactif chimiosélectif.
- b. Est une réaction sélective.
- c. La réaction est sélective.
- d. Protéger le groupe amino de l'acide α -aminé 1.

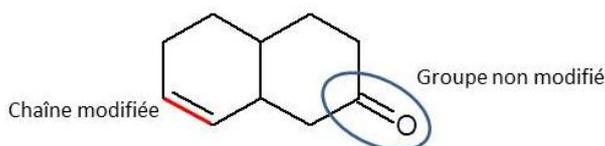
Dans le manuel élève, page C-5, la réponse à la question d. a été corrigée : c'est bien le groupe amino qui doit être protégé et non le groupe carboxyle.

Compétences exigibles

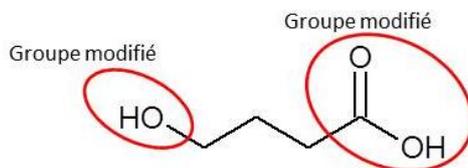
3. Les espèces polyfonctionnelles sont :

- a. classes des alcènes et des alcools ;
- b. classe des amines et des acides carboxyliques ;
- c. classe des alcools et des aldéhydes ;
- e. classe des cétones et des acides carboxyliques.
- d. et f. ne sont pas des espèces polyfonctionnelles.

4. (1) La transformation est sélective.



(2) La transformation n'est pas sélective.

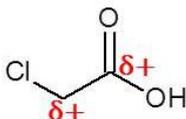


5. 1. La molécule de 3-nitroacétophénone possède deux groupes caractéristiques, les deux sont transformés.

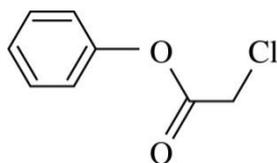
- 2. a. La transformation (2) est sélective ; elle permet la protection du groupe carbonyle.
- b. La transformation (4) est appelée déprotection.
- c. Les transformations (2), (3) et (4) sont toutes des transformations sélectives ; parmi les deux groupes caractéristiques de la molécule, un seul est transformé.

6. a. Le réactif d'intérêt possède un groupe amino et un groupe carboxyle (c'est un acide α -aminé)
b. Le méthanol réagit sélectivement avec le groupe carboxyle, à l'exclusion du groupe amino. C'est un réactif chimiosélectif pour cette transformation. Même chose pour SOCl_2 .
c. Cette réaction pourrait être utilisée pour protéger le groupe carboxyle.

7. a. L'atome H relié à l'oxygène du phénol est remplacé par $-\text{CH}_2\text{COOH}$.
b. $\chi(\text{C}) < \chi(\text{O})$ et $\chi(\text{C}) < \chi(\text{Cl})$ donc l'acide chloroacétique possède deux atomes de carbone engagés dans des liaisons covalentes dont ils sont les atomes le moins électronégatif :

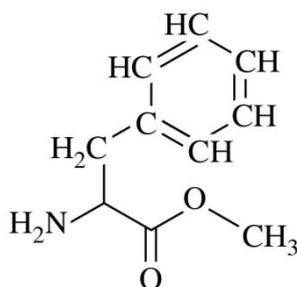


- c. Le transfert de doublet d'électrons se fait de l'atome O du phénol vers l'atome de carbone lié au chlore.
d. La réaction est sélective puisque le groupe carboxyle de l'acide chloroacétique n'est pas modifié.
e. En envisageant le transfert de doublet d'électrons vers l'autre site accepteur, on obtiendrait :



Compétences générales

8. Formule semi-développée de la phénylalanine :



9. On considère un tissu qu'on ne veut encrer que sur certaines zones et pas sur d'autres, qu'il va donc falloir protéger.

On réalise un écran recouvert d'une émulsion photosensible :

- les zones de l'écran qui correspondent aux zones de tissu à protéger sont exposées au rayonnement UV, l'émulsion photosensible y durcit ; ainsi, l'encre ne pénétrera pas dans le tissu pour ces zones-là, que l'on peut donc appeler zones protégées.

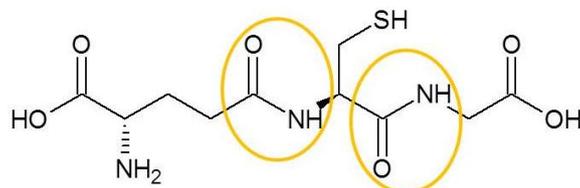
- les autres zones ne sont pas exposées au rayonnement UV, l'émulsion est rincée ; le tissu au-dessous de ces zones n'est pas protégé.

Lorsqu'on retire l'écran de sur le tissu, cela revient à déprotéger celui-ci, en effet toutes les zones pourraient maintenant être encrées.

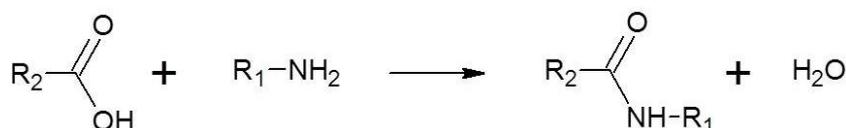
Exercices de méthode

10. Exercice résolu.

11. a.

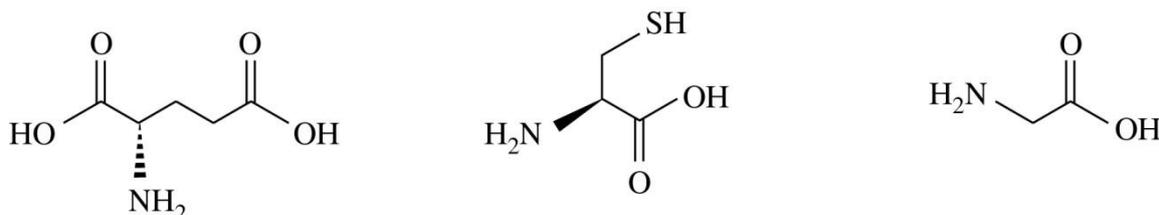


b.

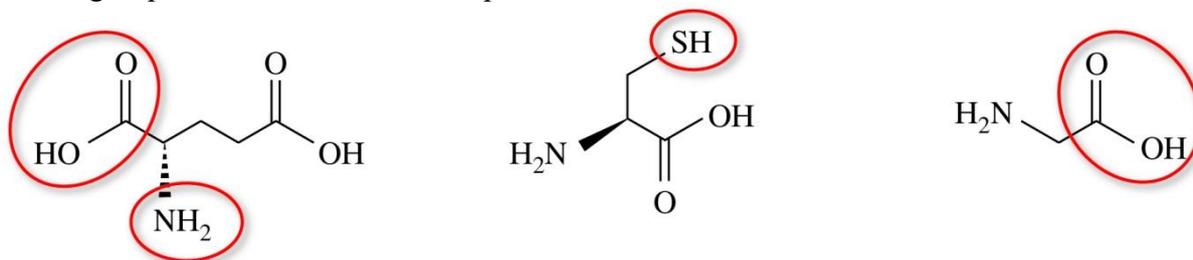


Lors de cette réaction, il se forme une molécule d'eau.

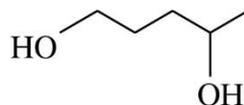
c. Le glutathion est formé des trois acides aminés suivants :



d. Les groupes ci-dessous ne doivent pas être transformés :



12. a. On obtient le pentan-1,4-diol :



b. Le tétrahydroborate de sodium ne réagit pas sélectivement sur un groupe caractéristique, les deux sont transformés ; la transformation n'est pas sélective.

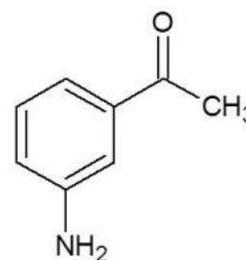
c. En présence de CeCl_3 , le réactif devient sélectif : le groupe caractéristique des aldéhydes n'a pas été transformé ; le groupe caractéristique des cétones a été réduit en groupe hydroxyle.

d. L'objectif est de transformer sélectivement le groupe caractéristique des aldéhydes, sans modifier celui des cétones. Pour effectuer cette transformation avec du tétrahydroborate de sodium, il faut protéger la fonction cétone avant la transformation puis la déprotéger ensuite.

Exercices d'entraînement

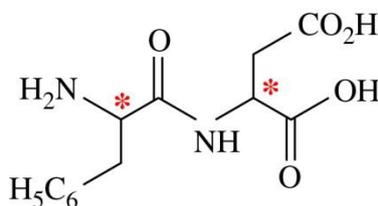
13. Dans le manuel élève, le spectre IR a été corrigé : la partie droite du spectre (à partir du pic à $1\ 710\text{ cm}^{-1}$) a été décalé de 2 mm vers la droite, par rapport au spectre présent dans le spécimen.

a. La formule brute du produit obtenu permet de supposer que le groupe nitro a été réduit en groupe amino ; cette hypothèse est confirmée par la présence d'une bande large et forte vers $3\ 400\text{ cm}^{-1}$ que l'on peut attribuer aux liaisons N-H. Par ailleurs, la présence d'une bande fine et forte vers $1\ 710\text{ cm}^{-1}$ conduit à penser que la liaison C=O se retrouve dans le produit et n'a donc pas été réduite.

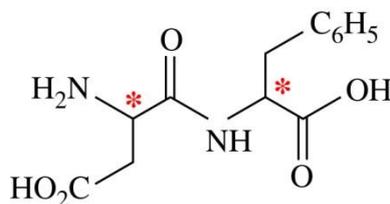


b. Dans l'exercice 5, on obtient le même produit mais en protégeant préalablement le groupe carbonyle. Ici, la transformation se fait en une seule étape.

14. a. Phe-Asp :



Asp-Phe :



b. Chacun des acides aminés possède un carbone asymétrique, le carbone lié au groupe amino.

c. Chacun des dipeptides possède donc deux carbones asymétriques ; ceux marqués d'une étoile sur les schémas ci-dessus.

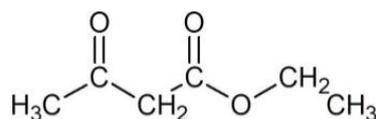
d. Le texte ne précise pas la configuration de la molécule possédant un pouvoir sucrant élevé, l'ambiguïté porte sur quatre diastéréoisomères.

15. a. Réactifs : 3-oxobutanoate d'éthyle et éthane-1,2-diol.

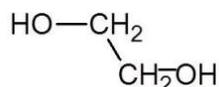
Catalyseur : acide paratoluènesulfonique APTS.

Solvant : cyclohexane.

b. 3-oxobutanoate d'éthyle :



éthane-1,2-diol :



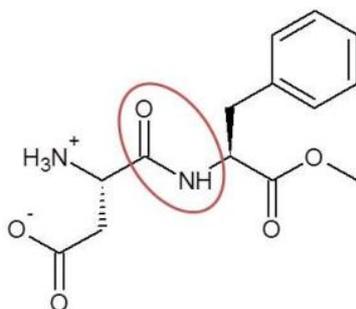
Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 25. Sélectivité en chimie organique

c. L'énoncé indique que l'expérience doit permettre de protéger le groupe carbonyle du 3-oxobutanoate d'éthyle, on forme donc le produit (3).

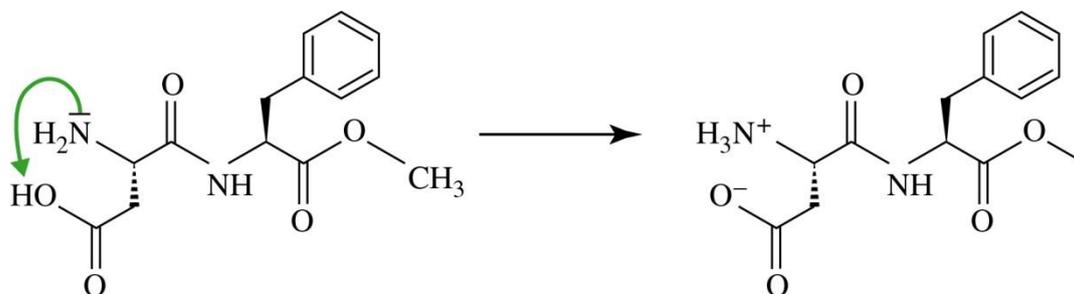
d. On peut vérifier en spectroscopie IR que la bande d'absorption due à C=O a disparu.

16.

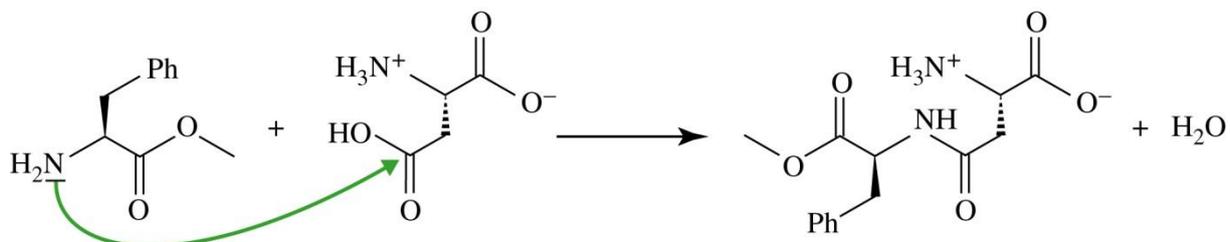
a.



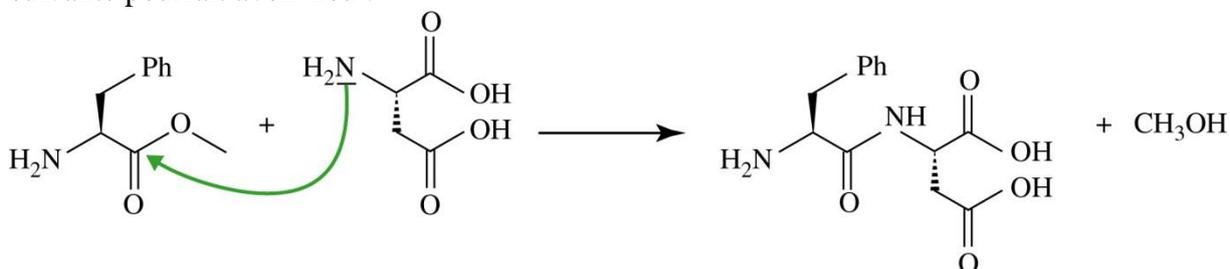
b.



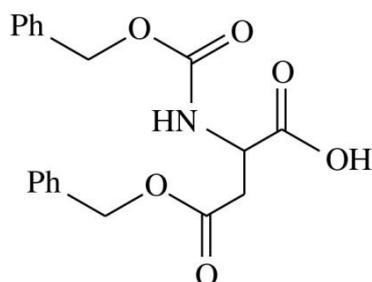
c. En l'absence de protection du groupe carboxyle (2), la transformation suivante pourrait avoir lieu :



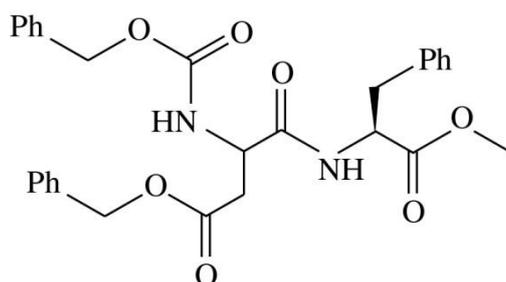
d. En l'absence de protection du groupe amino de l'acide aspartique, la transformation suivante pourrait avoir lieu :



e. Acide aspartique protégé :



Dipeptide totalement protégé :



f. Si la protection du groupe amino consiste à le transformer en groupe caractéristique des amides, alors, lors de la déprotection, on risque de transformer la liaison peptidique nouvellement créée.

g. Si la protection du groupe carboxyle consiste à le transformer en groupe caractéristique des esters, alors, lors de la déprotection, on risque de déprotéger également l'ester de la phénylalanine qui doit rester intact dans l'aspartame.

h. Lors d'une synthèse organique, il est courant que les réactifs utilisés soient des espèces polyfonctionnelles. Il faut donc envisager une voire plusieurs étapes de protection puis de déprotection de certains des groupes caractéristiques de ces molécules.

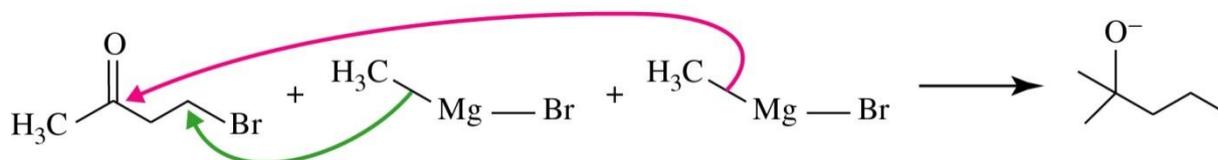
Pour choisir les groupes protecteurs les plus adaptés à la synthèse, il faut s'interroger, non seulement sur l'efficacité de la protection, mais aussi sur celle de la déprotection.

Ainsi, le chimiste recherche des groupes protecteurs **sélectifs**, c'est-à-dire qui transforment les groupes à protéger sans modifier les autres groupes. Les réactions associées aux étapes de protection doivent également se faire avec le **meilleur rendement** possible.

D'autre part, les étapes de déprotection doivent bien évidemment régénérer le groupe protégé sans modifier le reste de la molécule. Elles doivent également se faire avec le meilleur rendement possible ; une stratégie de protection-déprotection très pertinente consiste à déprotéger plusieurs groupes protecteurs en une seule étape : on améliore ainsi considérablement le rendement global de la synthèse.

19. a. La transformation qui aboutit à (3) n'est pas sélective : l'atome de brome est substitué par un méthyle et le groupe carbonyle est également transformé.

b.



c. Pour obtenir la molécule (4) à partir de (1) et (2), il faut tout d'abord protéger le groupe carbonyle (par exemple, en formant un acétal, voir exercice 15), ajouter la molécule (1) puis déprotéger le groupe carboxyle.

20. Dans cette synthèse de documents, les élèves doivent mentionner les points suivants :

1. **Haute sélectivité** des enzymes : une enzyme est généralement associée à une transformation et à un substrat donnés. Cette propriété permet de limiter les étapes de protection/déprotection, toujours coûteuses en réactifs, n'apparaissant pas dans le produit final et donc contraires aux principes de la chimie durable.
2. Capacité des enzymes à travailler dans des **conditions douces** (pas de haute température) : cette seconde propriété permet de limiter la consommation énergétique nécessaire à la fabrication de matériaux.
3. Capacité des enzymes à travailler dans l'**eau** : cette troisième propriété permet une alternative à l'utilisation de solvants polluants.
4. Capacité des enzymes à décomposer des **matières végétales** : cette dernière propriété permet de limiter l'utilisation de ressources fossiles comme matière première.

Chapitre 26 – Transmettre et stocker de l'information

Manuel pages 515 à 541

Choix pédagogiques

Ce chapitre traite les notions de toute la partie du programme « Transmettre et stocker de l'information ». La variété des notions abordées, ainsi que le faible nombre de connaissances se rapportant aux compétences exigibles, rendent ce chapitre atypique ; il a été choisi de le présenter sous forme de séquences. Chacune de ces séquences comportent une, deux ou trois activités, suivies d'un bilan. Elles correspondent aux cinq notions mises en évidence dans le programme, l'ordre étant respecté. Une sixième séquence, la séquence C « Étudier un phénomène optique » a été ajoutée ; elle ne comporte pas de bilan car il s'agit d'un prolongement de la séquence B sur les images numériques. Le professeur pourra choisir de la traiter en activités expérimentales des chapitres sur la diffraction et les interférences.

La plupart des conclusions reprises lors des bilans concernent des généralités qu'il est préférable de garder à l'esprit et non des connaissances qu'il est impératif de retenir. La disposition parfois utilisée d'une activité sur la page de gauche et du bilan sur la page de droite n'est donc pas gênante et peut même servir de guide à un élève en difficulté dans une activité.

Des animations, des photographies et des vidéos documentaires illustrent ce chapitre afin d'aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi et, certaines d'entre elles, sur les sites Internet compagnon Sirius.

Page d'ouverture

L'évocation de la transmission d'une image par téléphone mobile permet d'aborder différentes notions du chapitre : image numérique, nature numérique du signal à transmettre, propagation du signal. L'accent est porté sur la possibilité donnée au destinataire d'obtenir une image rigoureusement identique à celle envoyée, même de très loin : cette idée que les signaux numériques permettent des transmissions fidèles sera l'une des notions importantes que l'élève devra comprendre dans le chapitre.

Séquence A. Chaîne de transmission d'informations

Activité documentaire 1. Informations et chaînes de transmission

Commentaires

Les documents proposés illustrent des chaînes de transmission d'informations du quotidien et présentent certaines de leurs évolutions récentes.

L'exploitation de ces documents permet :

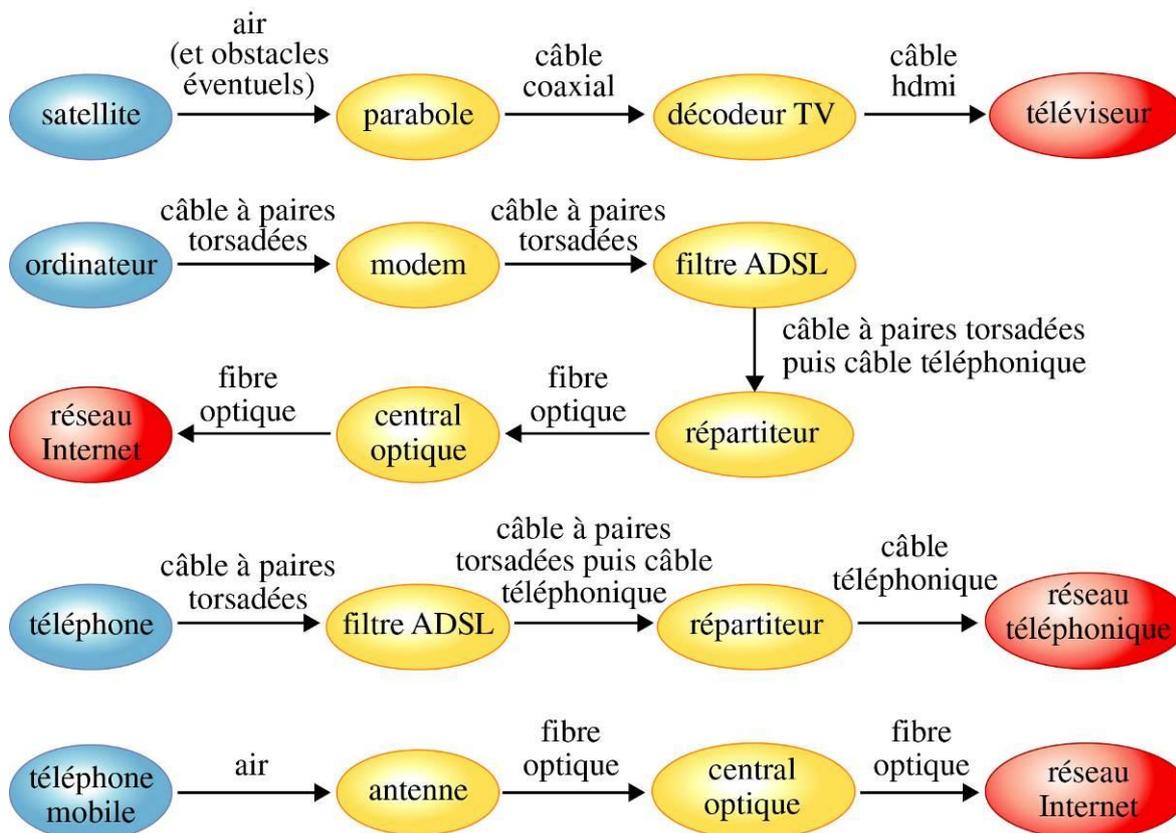
- de justifier l'utilisation de certaines chaînes de transmission pour certains usages ;
- d'exposer l'évolution récente des offres des fournisseurs d'accès à Internet.

Réponses

1. Analyser le document

a. **1** : vidéo et sons ; **2** : données informatiques ; **3** : voix ; **4** : texte.

b. En se limitant aux parties illustrées sur le document 1 :



Remarque : d'autres chaînes sont parfois possibles ; en particulier les sens émetteurs/récepteurs peuvent parfois être inversés.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur

Chapitre 26. Transmettre et stocker de l'information

c. Plusieurs choix sont possibles, par exemple :

1 : La transmission par satellite est possible dans des "zones blanches" de la télévision par antennes relais, c'est-à-dire dans des zones trop éloignées des antennes relais ou mal situées pour permettre une bonne réception (présence d'obstacles ou d'interférences).

2 : Les délais de transmission courts de la technologie ADSL permettent le contrôle en "temps réel" du jeu vidéo.

3 : Le réseau de téléphonie classique, développé depuis les années 1970, relie la quasi-totalité des domiciles.

4 : La transmission libre des antennes relais permet la mobilité de l'utilisateur.

2. Conclusion

L'élève doit évoquer :

- L'augmentation des débits de connexion, favorisée par l'utilisation de la fibre optique au plus près de l'abonné. De nouveaux services sont ainsi disponibles en 2012 : TV par Internet par exemple.
- La convergence des technologies et des services, qui continuent à évoluer vers des standards et des matériels communs ou compatibles entre eux : convergence fixe-mobile, convergence entre l'audiovisuel et les communications électroniques, accessibles à l'aide d'équipements polyvalents.
- La mobilité permise à l'utilisateur qui possède en 2012 une connexion accessible en divers endroits avec son téléphone mobile par exemple.

Bilan. Chaîne de transmission d'informations

Si aucune connaissance n'est exigible pour cette séquence, le bilan met en avant les généralités qui ressortent de l'activité : des informations de natures variées peuvent être échangées par l'intermédiaire d'un signal parcourant une chaîne de transmission comportant au moins un émetteur et un récepteur séparés par un milieu de propagation. Pour conclure, des exemples présentés sous forme d'un tableau illustrent que le choix d'une chaîne de transmission de l'information est justifié par les propriétés recherchées pour la transmission.

Séquence B. Images numériques

Activité expérimentale 2. Codage d'une image numérique

Commentaires

L'utilisation d'un éditeur d'images comme *Gimp* doit permettre aux élèves de comprendre qu'une image numérique est pixellisée et de faire un lien entre l'image observée et le fichier source de l'image.

La manipulation d'un tel logiciel n'étant pas évidente, le document 4 en présente les fonctionnalités de base. Il aborde également la notion de codage d'un pixel qui fera l'objet des questions. Les notions de codage binaire et d'octet y sont évoquées : ces notions seront d'ailleurs utiles pour la suite du chapitre.

Le but de l'activité est de montrer que le fichier brut d'une image est composé d'une suite de nombres (d'octets) représentant les pixels de l'image et de déterminer le principe du codage RVB et du codage en niveaux de gris.

Pour cette activité, il est important de s'intéresser au fichier image brut (« raw ») car celui-ci ne contient que la succession des informations codant chacun des pixels. En pratique, un fichier brut n'est pas utilisable tel quel (on ne peut pas afficher une image à partir de son fichier raw, même avec *Gimp*, car il manque en particulier l'information du nombre de pixels en hauteur et largeur). Pour l'activité, l'intérêt du format raw est de pouvoir lire le nombre d'octets d'un fichier se rapportant seulement au codage des pixels (les fichiers images habituels bmp, jpeg, ... contiennent un en-tête précisant le format du fichier, la résolution de l'image, ... auquel un certain nombre d'octets est alloué).

Enfin, une dernière question s'intéresse au cas d'une image au format « bmp » (Windows bitmap), et invite l'élève à effectuer une recherche à l'aide d'un éditeur hexadécimal pour mettre en particulier en évidence la présence des données de hauteur et de largeur de l'image dans le fichier source sous ce format.

Remarques pratiques :

- Dans l'expérience, pour dessiner l'image, l'outil « Crayon », adapté d'une « Brosse de type Circle (01) » permet de réaliser les pixels. La couleur peut être choisie après un double-clic sur la couleur de premier plan : une fenêtre « Modification de la couleur de premier plan » s'affiche alors et permet en particulier de fixer les intensités des composantes RVB.
- Pour enregistrer un fichier d'image brut, après « Enregistrer sous », choisir « Sélectionner le type de fichier » puis sélectionner « Données d'image raw ». Le fichier enregistré ne comporte alors pas d'extension.
- La taille du fichier peut être lue dans le logiciel *Gimp* (Image/Propriétés de l'image/Taille du fichier) ou par pointage du fichier dans le dossier le contenant (sur certains ordinateurs, il faudra, après un clic droit, afficher les propriétés du fichier).
- Avec la version utilisée de l'éditeur hexadécimal *Hexedit* (qui a le mérite d'être simple et gratuit) un dernier octet 00 est systématiquement ajouté en fin de fichier.

Réponses

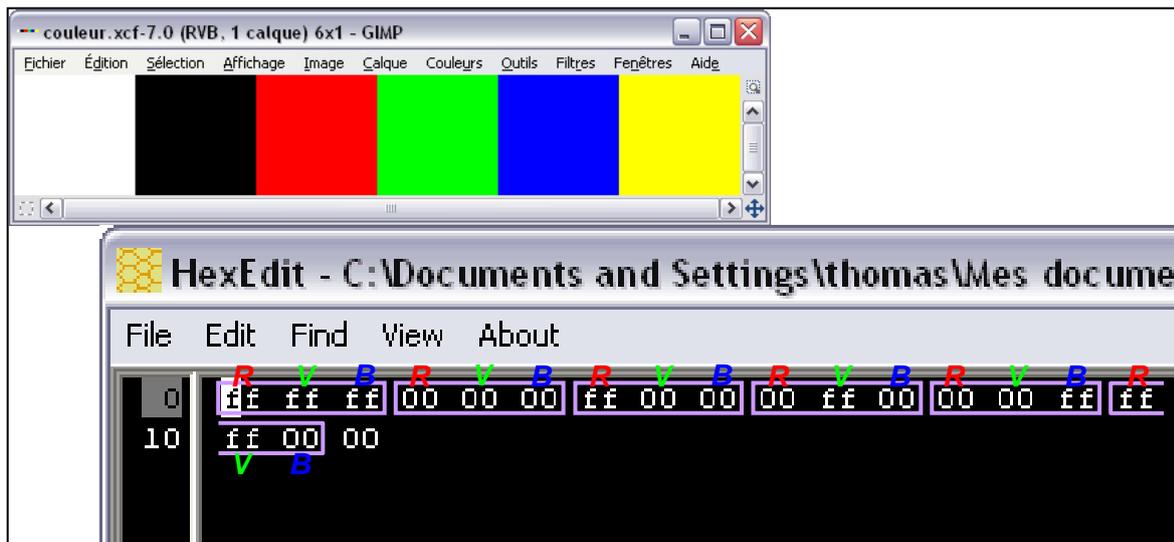
1. Interpréter

- a. Le code correspond à la succession des trois composantes R, V et B de chacun des pixels :
« FF FF FF / 00 00 00 / FF 00 00 / 00 FF 00 / 00 00 FF / FF FF 00 »

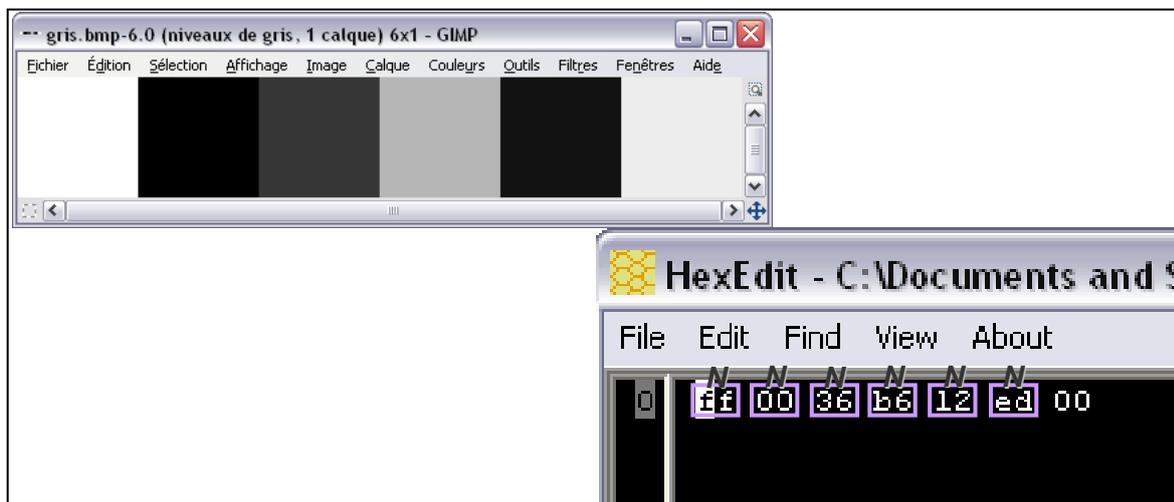
La taille calculée est donc de $6 \times 3 = 18$ octets (3 octets par pixel).

La taille du fichier image brut est bien de 18 octets.

Remarque : on peut vérifier le code du fichier image brut avec *Hexedit* par exemple (pour rappel, un dernier octet 00 est ajouté ici en fin de liste) :



- b. La taille indiquée pour le fichier « gris » est de 6 octets. Les 6 pixels étant représentés par 6 octets, on en déduit qu'en niveaux de gris, un pixel est codé par un seul octet.



Remarques :

- On peut montrer aux élèves, avec l'outil « Pipette à couleurs » que les composantes RVB indiquées par *Gimp* sont alors forcément identiques pour un même pixel : un seul nombre (variant de 0 à 255) code ainsi un pixel, donc un pixel est représenté par un octet.
- Il est intéressant de noter que le pixel vert est représenté par une nuance plus claire que les pixels rouge et bleu. Ceci est dû à l'algorithme permettant le passage du mode RVB au mode niveaux de gris : il prend en compte la plus grande sensibilité de l'œil aux radiations vertes en affectant un poids plus important à la composante V.

2. Conclure

a. Une image numérique est enregistrée sous la forme d'un fichier contenant une suite d'octets représentant les pixels de l'image. Suivant le codage adopté, le nombre d'octets associés à chaque pixel peut varier : trois octets pour le codage RVB, et un octet pour le codage en niveaux de gris par exemple.

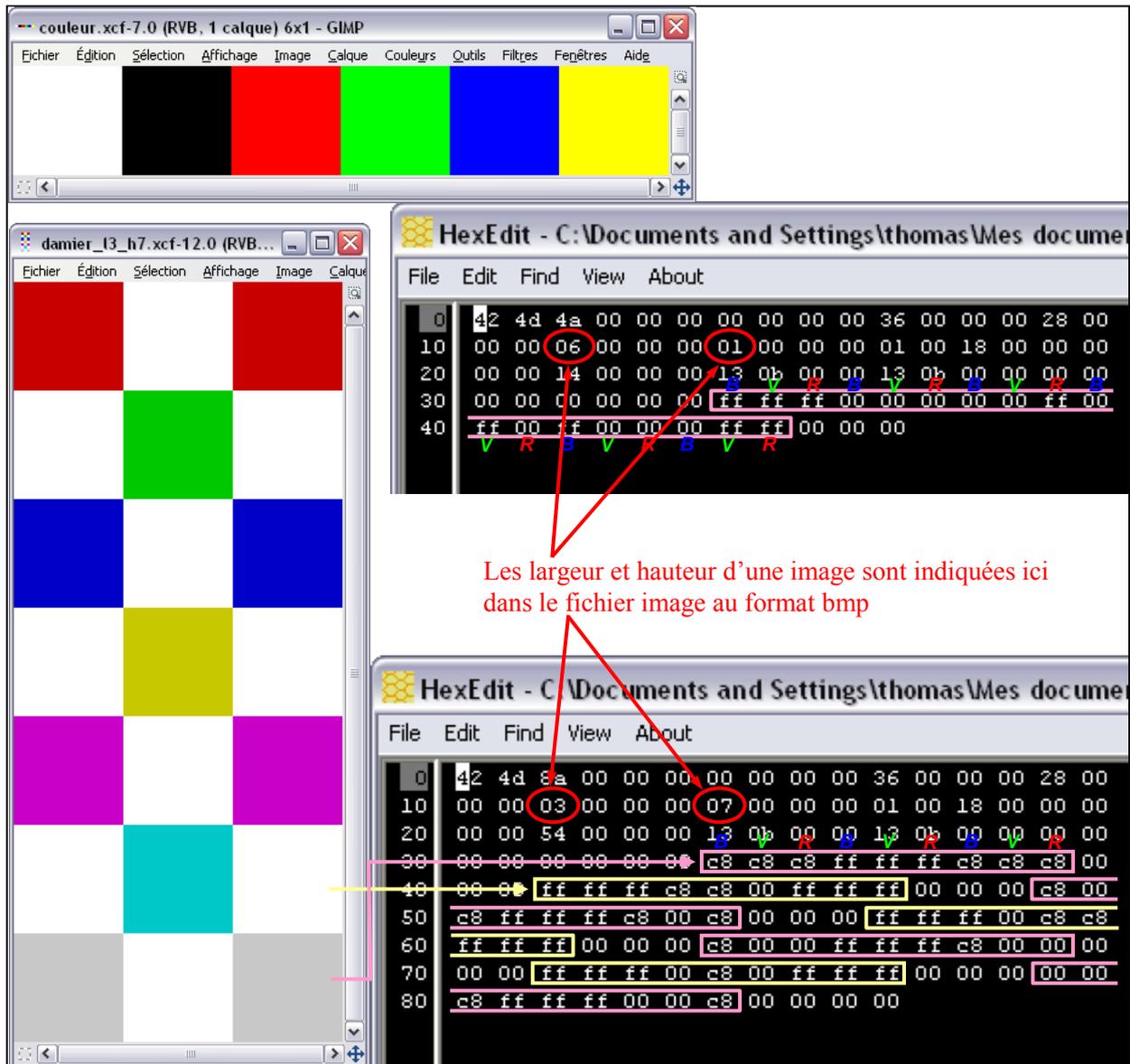
Remarques :

- Les octets enregistrés détaillent chacun des pixels dans les cas des formats raw ou bmp par exemple. Mais la plupart des formats usuels d'images « compressent » les fichiers en ne détaillant pas le code de tous les pixels de l'image. La perte de qualité résultante peut passer inaperçue pour certaines images si le format est bien choisi. Par exemple, le format jpeg permet d'obtenir des fichiers relativement petits pour des photographies de paysages de bonne qualité, mais les textes photographiés avec ce format sont en général de plus mauvaise qualité.

- La suite d'octets se ramène à un tableau de nombres si l'on connaît le nombre de pixels présents en hauteur et largeur de l'image.

b. Les largeur et hauteur de l'image sont des exemples d'indications supplémentaires indiquées dans le format bmp. En créant, à l'aide du logiciel *Gimp*, deux images de hauteurs et largeurs différentes enregistrées au format bmp, on peut identifier les positions, dans le fichier édité par *Hexedit*, des octets correspondant à ces données, comme illustré sur la figure ci-dessous.

D'autres indications sont mentionnées dans l'en-tête du fichier, comme un code définissant le format de l'image précisé par les deux premiers octets (42 4D précisent le format bmp), comme la taille totale du fichier indiqué par les quatre octets suivants, etc. On notera que dans le format bmp, les octets des composantes RVB sont positionnés dans l'ordre B, V puis R, et que les octets représentant les lignes du bas de l'image sont indiqués en premier (voir figure page suivante).



Bilan. Images numériques

L'élève doit comprendre qu'une image numérique est pixellisée et que chacun des pixels est représenté dans le fichier source par un nombre d'octets dépendant du codage adopté. Les notions de bit et d'octet (utiles pour la suite du chapitre) sont précisées et utilisées dans le cas du codage RVB ou en niveaux de gris d'un pixel.

Séquence C. Étudier un phénomène optique

Cette séquence ne comporte pas de bilan et se présente comme une application des images numériques présentées à la séquence B.

Activité expérimentale 3. Étude d'une figure de diffraction

Commentaires

La possibilité d'utiliser un logiciel d'analyse d'images numériques pour étudier le phénomène de diffraction est présentée, avant de demander à l'élève de concevoir et de réaliser une manipulation utilisant ce moyen d'analyse et le phénomène de diffraction dans le but de déterminer la longueur d'onde de la radiation issue d'un laser.

On se place ici dans des conditions d'enseignement réalistes : la figure de diffraction représentée est proche de celle qu'obtiendront des élèves dans une salle comportant un éclairage parasite (dû en particulier aux écrans d'ordinateurs) avec une webcam usuelle utilisée en mode automatique, la source étant une diode laser bon marché et l'écran placé à 1,5 m de la fente diffractante.

Le logiciel indiqué dans l'activité est le logiciel *Regavi* permettant d'exporter facilement des données vers un tableur-grapheur (*Regressi*) qui devra être utilisé par les élèves pour exploiter les résultats des mesures qu'ils proposent. Cependant, on pourra choisir d'utiliser un autre logiciel d'analyse d'images, comme *SalsaJ* par exemple.

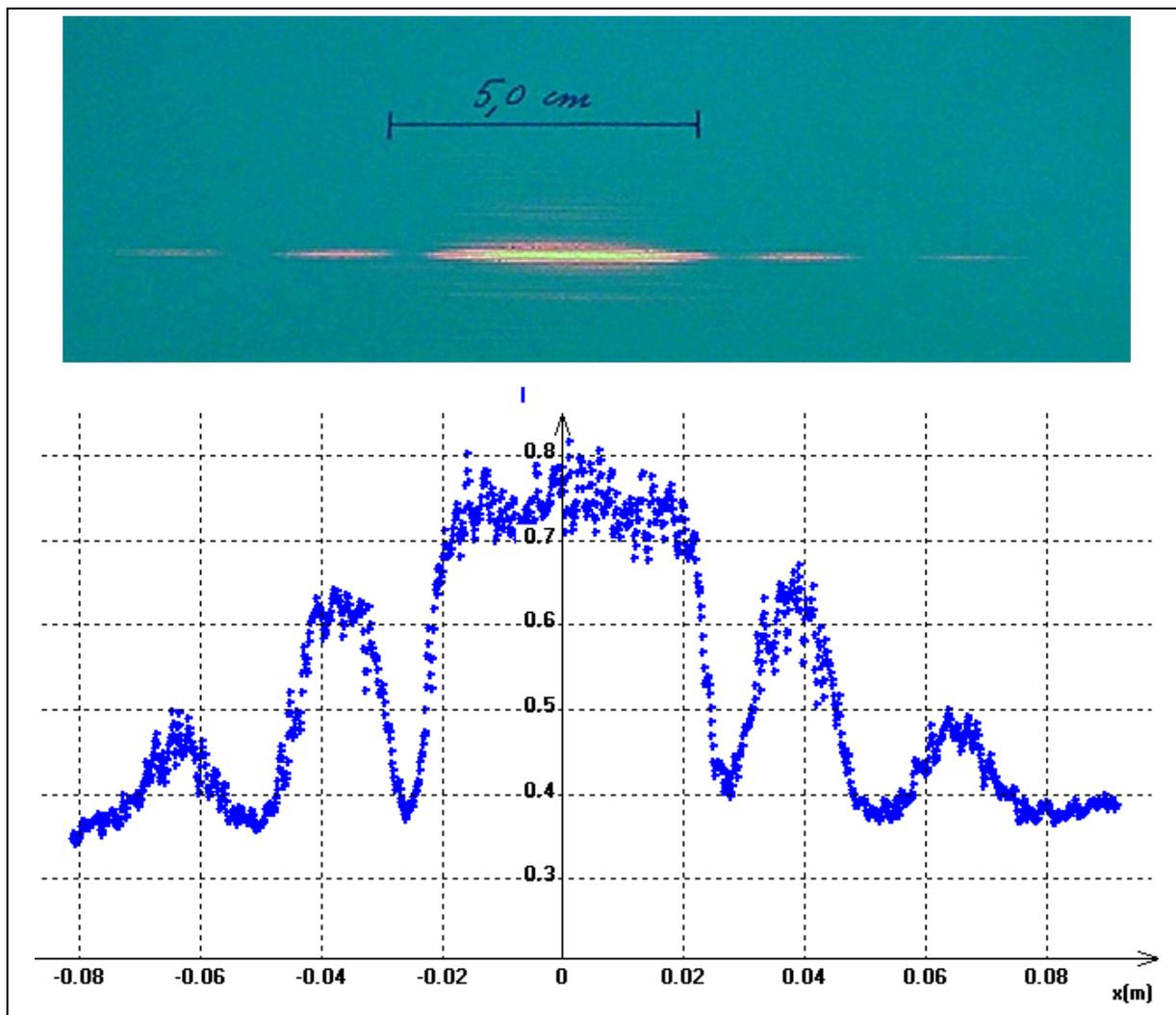
Remarques :

- Il est possible d'utiliser une fonction du logiciel *Regavi* dite de « lissage » de l'intensité, qui a pour rôle de faire une moyenne des mesures sur plusieurs lignes de pixels au-dessus et en-dessous de la ligne de mesures choisie. Cela permet de réduire les effets du bruit (visible par la granularité de la photographie) sur la courbe de distribution de l'intensité. Dans cette activité, les mesures ont été effectuées avec un « lissage » de 3.
- Hormis les effets de la lumière parasite, la distribution en intensité de la figure de diffraction ne possède pas les valeurs d'intensité prévues par la théorie de la diffraction de Fraunhofer, sans doute à cause de la saturation de certains pixels dû à la luminosité importante dans la tache centrale et des réglages imposés par le logiciel pilotant la webcam.
- Il est possible d'utiliser un polariseur (deux si on utilise un laser non polarisé) pour réduire le phénomène de saturation. On peut ainsi envisager d'utiliser un laser hélium-néon au faisceau plus "propre" mais plus intense que celui d'une diode laser.
- Vu la petite taille (quelques mm²) des capteurs de webcam, la projection directe (après avoir retiré l'objectif de la webcam) de la figure de diffraction sur le capteur ne permet pas de se placer dans les conditions de Fraunhofer et la distribution en intensité s'écarte nettement de celle dont on a l'habitude.

Réponses

1. Observer

- a. La figure de distribution permet de comparer les maxima d'intensité lumineuse des différentes taches de diffraction.
- b. Par exemple, avec une fente de largeur $a = 40 \mu\text{m}$, on mesure $L = 52 \text{ mm}$ pour une distance fente-écran $D = 1,5 \text{ m}$.



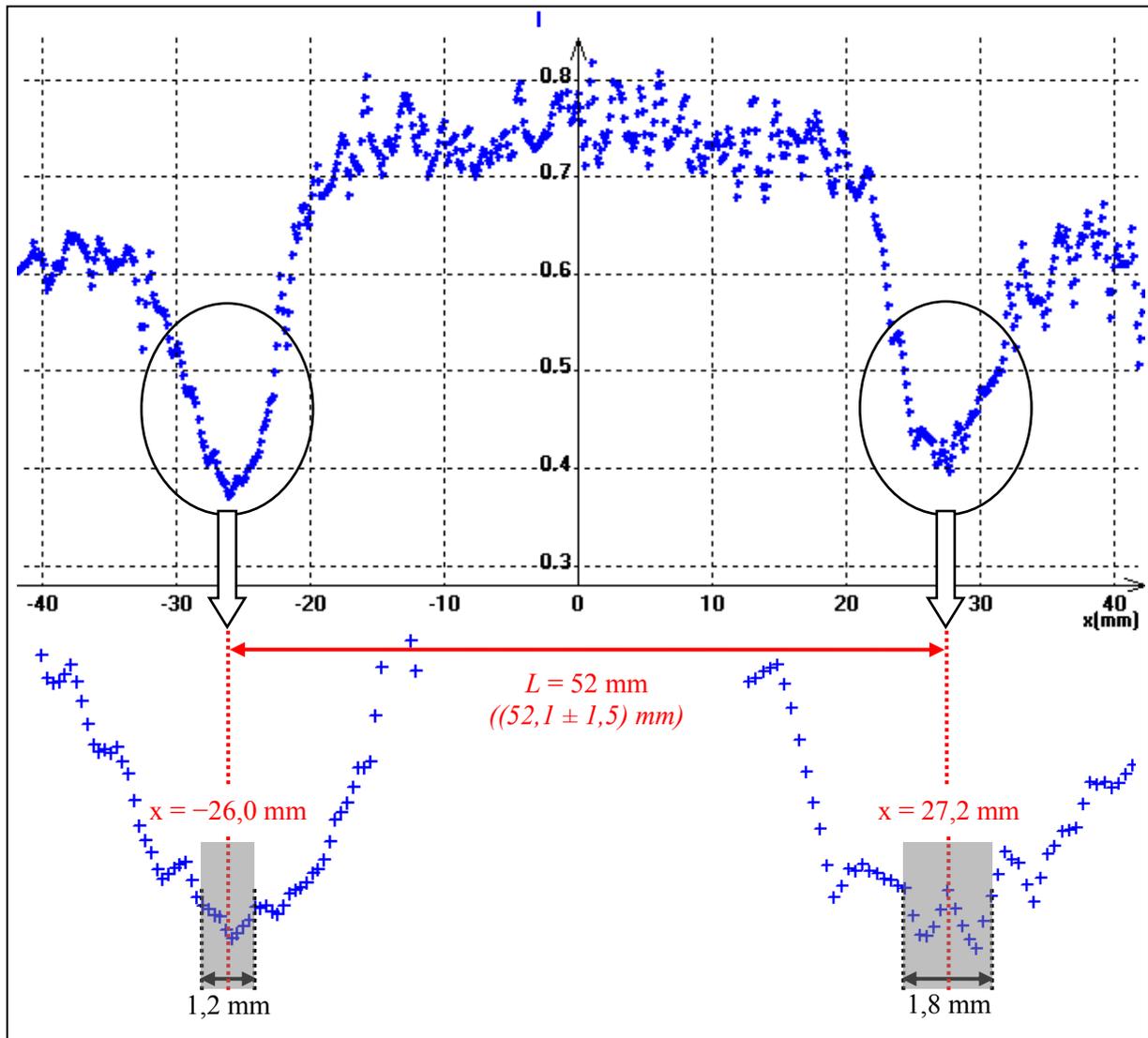
- c. L'intensité n'est jamais nulle d'après la courbe obtenue.

2. Interpréter

- a. Les minima d'intensité n'ont pas une valeur nulle à cause de la lumière parasite.
- b. Ici, ce n'est pas la taille associée à un pixel qui limite la précision de la mesure, mais plutôt l'appréciation de la position des minima, comme le montre la figure page suivante : dans ce cas, le premier minima est apprécié à 0,6 mm près et le deuxième à 0,9 mm près, d'où une incertitude $\Delta L = 0,6 + 0,9 = 1,5 \text{ mm}$.

Remarques : - si l'image enregistrée par la webcam possède une résolution petite, alors l'appréciation sur écran d'un minima d'intensité se fait au pixel près et dans ce cas, c'est la taille associée au pixel qui limite la précision de la mesure ;

- l'utilisation de la fonction « lissage » du logiciel *Regavi* peut avoir un effet sur l'estimation de l'incertitude.



c. On remarque que $\ell = \frac{L}{2}$.

Pour réaliser une mesure L' plus précise de la largeur de la tache centrale, on mesure la largeur L_n séparant les $n^{\text{ème}}$ extinctions de part et d'autre de la tache centrale.

Ainsi :

$$L_n = n \times L' \text{ soit } L' = \frac{L_n}{n}$$

puisque chaque tache secondaire compte pour une demi tache centrale. L'incertitude relative plus petite dans ce cas conduit à une estimation plus précise de la largeur de la tache centrale.

Plus précisément :

Mesures	Mesure directe de la largeur de la tache centrale	Mesure indirecte en passant par la distance entre les n ^{ème} minima	
			Détermination de la largeur de la tache centrale
Grandeur	L	L_n	$L' = \frac{L_n}{n}$
Incertitude absolue	ΔL	ΔL_n	$\Delta L' = \Delta L_n$
	Pour une incertitude absolue ΔL_n identique à celle de la mesure directe, on a : $\Delta L' = \Delta L_n = \Delta L$		
Incertitude relative	$\frac{\Delta L}{L}$	$\frac{\Delta L_n}{L_n} < \frac{\Delta L}{L}$	$\frac{\Delta L'}{L'} = \frac{\Delta L_n}{L_n} = \frac{\Delta L}{n.L'}$
Conclusion	D'après la dernière expression, on a : $\Delta L' = \frac{\Delta L}{n}$; donc l'incertitude sur la mesure de la largeur de la tache centrale est d'autant plus petite dans le cas de la mesure indirecte que le nombre n considéré est grand.		

3. Imaginer et mettre en œuvre un protocole

a. Exemple de protocole

- Mesurer la largeur L de la tache centrale de diffraction dans les mêmes conditions mais avec des fentes de largeurs a différentes et connues.

- Tracer la courbe d'étalonnage $L = f\left(\frac{1}{a}\right)$.

- Déterminer un modèle pertinent : modèle linéaire dans ce cas, de coefficient directeur noté k .

- Dédire de la valeur de k celle de la longueur d'onde λ de la radiation laser avec les notations habituelles :

$$\theta = \frac{\lambda}{a} \approx \tan(\theta) = \frac{L}{2D}$$

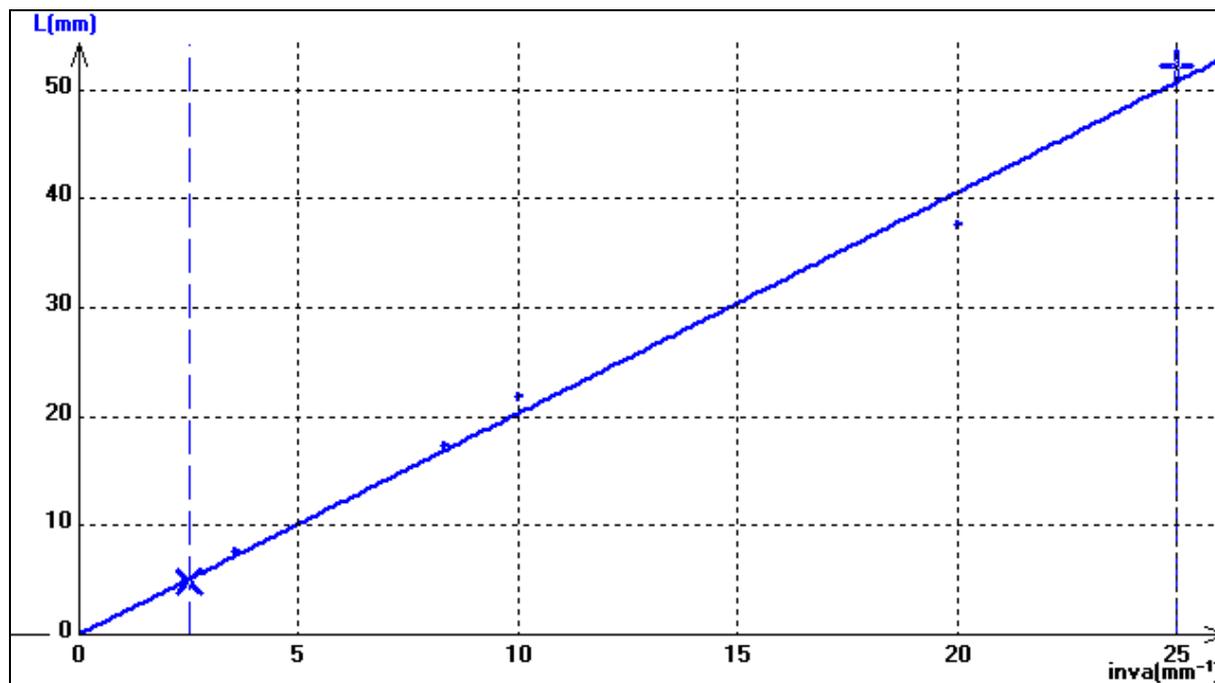
ainsi : $L = \frac{2\lambda D}{a}$; d'où $2\lambda D = k$; soit $\lambda = \frac{k}{2D}$

b. Mesures

Les mesures indirectes permettent d'apprécier les largeurs de la tache centrale avec trois chiffres significatifs :

a (μm)	40	50	100	120	280	400
L (mm)	52,2	37,7	21,9	17,3	7,65	4,84

Modélisation



Les points sont à peu près alignés sur une droite passant par l'origine, donc le modèle linéaire est pertinent. Ce modèle conduit à $k = 2,0 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ (l'écart relatif du modèle linéaire est de 5,2 %).

Détermination de λ

$$\lambda = \frac{k}{2D} = \frac{2,0 \times 10^{-6}}{2 \times 1,5} = 6,7 \times 10^{-7} \text{ m}$$

c. Calcul de l'écart relatif

Le constructeur annonce une longueur d'onde $\lambda_0 = 650 \text{ nm}$, d'où un écart relatif :

$$\left| \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \right| = \frac{6,7 \times 10^{-7} - 650 \times 10^{-9}}{650 \times 10^{-9}} = 0,031 = 3,1 \%$$

Cet écart est faible, donc la mesure est cohérente avec l'indication du fabricant.

Cet écart peut être dû :

- aux imprécisions des mesures sur L dues au pointage et/ou au capteur ;
- aux imprécisions des valeurs annoncées pour les largeurs a des fentes ;
- à l'imprécision de la mesure de la distance D fente-écran ;
- à une valeur attendue de λ erronée (les diodes laser ne sont pas parfaitement monochromatiques).

Exemples d'améliorations possibles :

- réaliser des pointages plus précis ;
- utiliser un capteur plus performant ;
- utiliser tout le champ du capteur ;
- réaliser davantage de mesures avec d'autres fentes de largeurs connues ;
- utiliser une distance D fente-écran plus grande car $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \sqrt{\left(\frac{\Delta k}{k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2}$.

Activité expérimentale 4. Interférences en lumière blanche

Commentaires

Cette activité propose d'utiliser une photographie numérique, présente sur le site élève, afin d'interpréter la figure d'interférence en lumière blanche par des fentes d'Young.

Il est suggéré d'extraire chacune des composantes R, V et B de l'image afin de se ramener à l'étude, dans les mêmes conditions, de trois figures d'interférence en lumières monochromatiques rouge, verte et bleue.

Cette étude est rendue possible par la conception même du capteur de l'appareil photographique qui comporte, comme indiqué par un document, des filtres rouges, verts et bleus.

Remarques :

- Un capteur d'appareil photographique est formé de nombreux photosites, sensibles à la lumière, formant un quadrillage. Chaque photosite est recouvert d'un filtre rouge, vert ou bleu (pour s'approcher davantage de la sensibilité de l'œil, il y a souvent davantage de photosites recouverts d'un filtre vert). Le traitement des informations fournies par les photosites permet, par extrapolation, d'affecter un niveau R, V et B à chaque photosite et donc à chaque pixel de l'image résultante.
- Si l'on ne souhaite pas utiliser le logiciel *Gimp*, le logiciel *SalsaJ* permet d'effectuer la séparation des composantes RVB d'une image : dans « Image », choisir « Couleurs » puis « Séparation R/V/B ».

Réponses

Mettre en œuvre une démarche expérimentale

Exemple de démarche possible :

- Observation de la photographie

On observe des franges verticales alternativement brillantes et sombres. La frange centrale est blanche et les franges latérales irisées. Ces dernières disparaissent rapidement.

- Hypothèses

1. La photographie résulte de l'addition des figures d'interférence en lumière monochromatique correspondant à chacune des radiations émises par la source de lumière blanche.
2. L'extraction de la composante R de la photographie numérique correspond à la figure d'interférence en lumière monochromatique de longueur d'onde correspondant au maximum de transmission $\lambda_R = 600 \text{ nm}$ du filtre rouge du capteur, comme indiqué par le document 10. De même, l'extraction des composantes V et B permet d'obtenir les figures d'interférences en lumières monochromatiques de longueurs d'onde $\lambda_V = 520 \text{ nm}$ et $\lambda_B = 450 \text{ nm}$.

- Extraction des composantes R, V et B

Les trois images associées à chacune des composantes RVB de l'image originale ont l'aspect de franges verticales alternativement brillantes et sombres, la frange centrale étant la plus brillante (voir tableau page suivante).

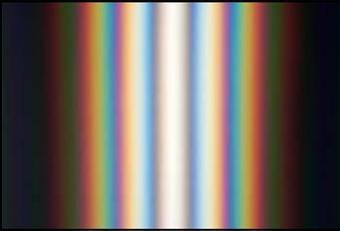
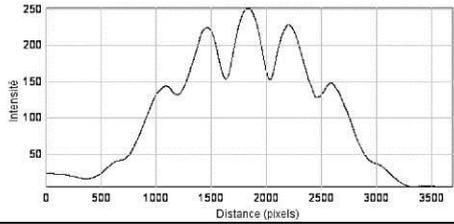
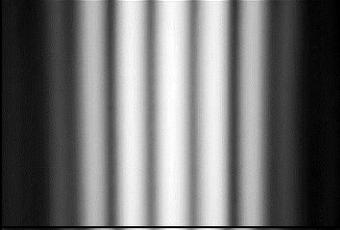
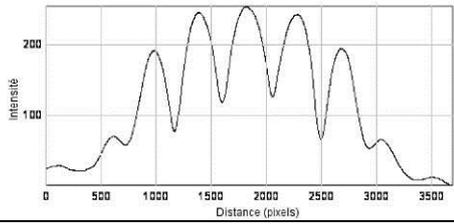
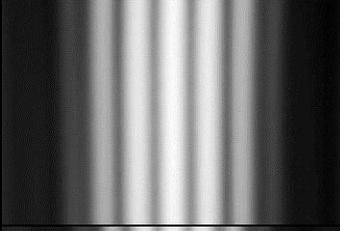
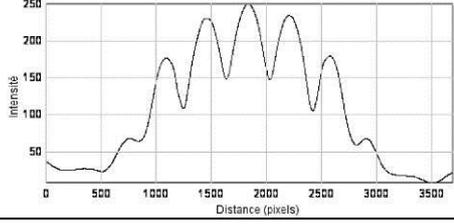
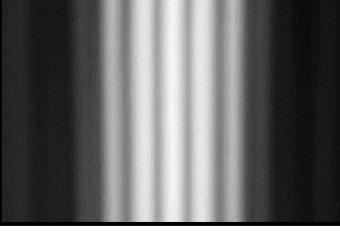
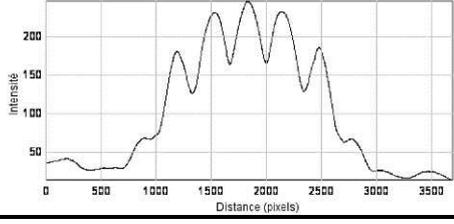
La comparaison de ces trois figures montre que les franges sont plus larges dans le cas de la composante R, puis dans celui de la composante V (tableau).

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 26. Transmettre et stocker de l'information

- Analyse des courbes de distribution de l'intensité (vérification de l'hypothèse 2)

Sous *SalsaJ*, en effectuant une sélection rectangulaire de toute la zone des images, on obtient les courbes de distribution de l'intensité pour l'image originale et ses trois composantes R, V et B (tableau).

Ces courbes permettent les mesures des interfranges dans chaque cas. Les résultats de ces mesures sont consignés dans le tableau suivant. Les mesures sont effectuées sur plusieurs interfranges et l'incertitude sur ces mesures repose sur l'estimation de la position des minima d'intensité (voir activité précédente).

Image		Profil en intensité	Mesure de l'interfrange i
Image originale			$4 \times i$ = (1267 ± 10) pixels ; donc $i = 317$ pixels
Composante R			$5 \times i_R$ = (2213 ± 10) pixels ; donc $i_R = 443$ pixels
Composante V			$5 \times i_V$ = (1983 ± 10) pixels ; donc $i_V = 397$ pixels
Composante B			$3 \times i_B$ = (1015 ± 10) pixels ; donc $i_B = 338$ pixels

La relation $i = \frac{\lambda D}{a_{1-2}}$ entre l'interfrange i et la longueur d'onde λ montre que le rapport des interfranges doit être égale aux rapports des longueurs d'onde dans le cas d'interférences en lumière monochromatique par des fentes d'Young réalisées dans les mêmes conditions. Le tableau ci-dessous compare les rapports des interfranges issus des mesures aux rapports des longueurs d'ondes définies par l'hypothèse 2.

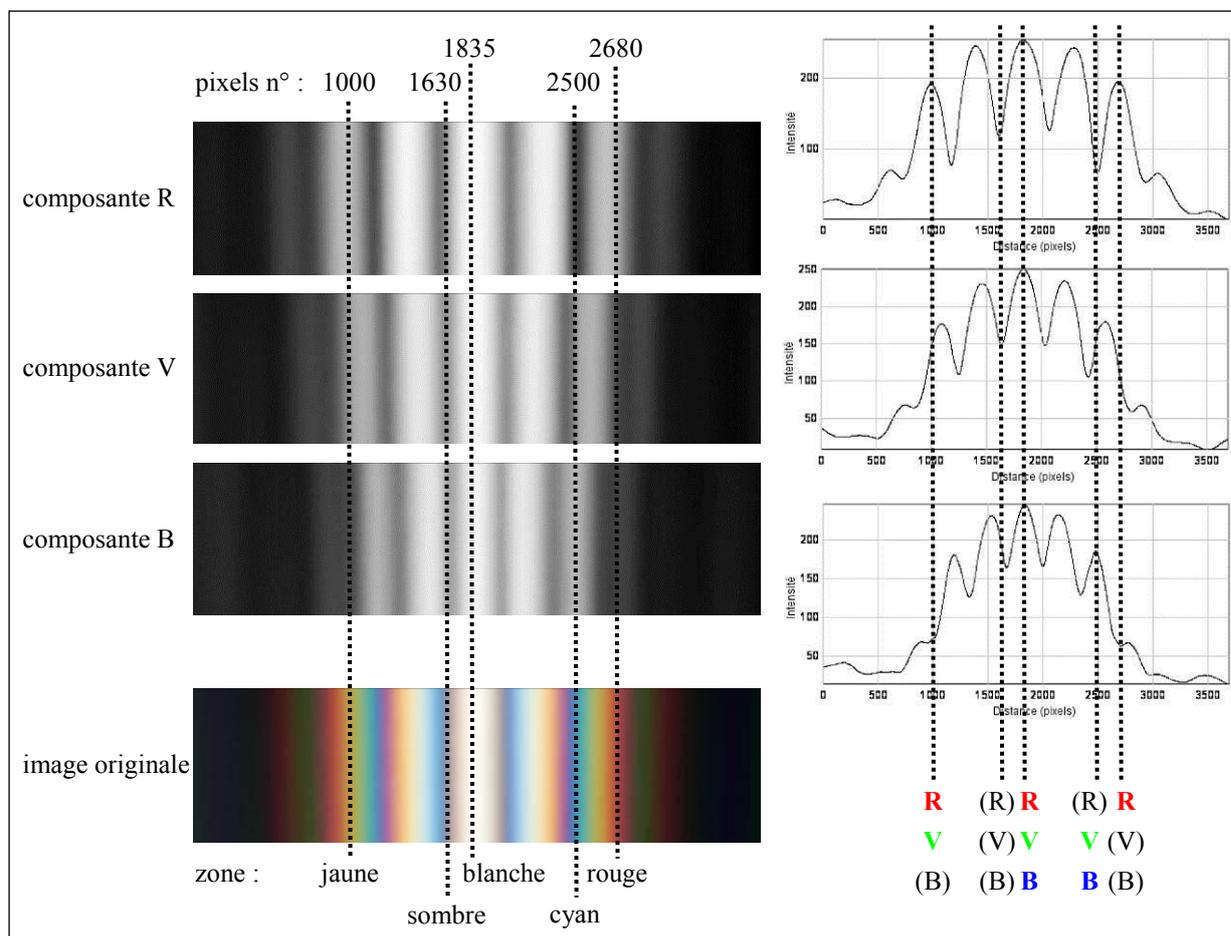
Rapports des interfranges	$\frac{i_R}{i_V} = 1,12$	$\frac{i_R}{i_B} = 1,31$	$\frac{i_V}{i_B} = 1,17$
Rapports des longueurs d'onde	$\frac{\lambda_R}{\lambda_V} = 1,15$	$\frac{\lambda_R}{\lambda_B} = 1,33$	$\frac{\lambda_V}{\lambda_B} = 1,16$
Écarts relatifs	2,61 %	1,50 %	0,862 %

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur

Chapitre 26. Transmettre et stocker de l'information

Conclusion : les écarts relatifs sont faibles, donc l'hypothèse 2 est vérifiée ; les images issues des composantes RVB correspondent aux figures d'interférence en lumière monochromatique de longueurs d'onde λ_R , λ_V , et λ_B .

- Vérification de l'hypothèse 1



L'addition des trois figures d'interférence permet d'interpréter la figure d'interférence en lumière blanche par synthèse additive trichromatique : l'hypothèse 1 est vérifiée.

- Conclusion

Chacune des radiations de la source de lumière blanche forme une figure d'interférence par les fentes d'Young. Mais des radiations de fréquences différentes n'interfèrent pas entre elles, donc la figure d'interférence observée correspond à l'addition des figures d'interférence de toutes les radiations. L'interfrange n'étant pas le même pour les différentes radiations (car il dépend de la longueur d'onde de la radiation), la figure d'interférence observée ne présente qu'une frange blanche (la frange centrale), et quelques franges brillantes irisées de part et d'autre.

Séquence D. Signal analogique et signal numérique

Activité documentaire 5. Analogique ou numérique ?

Commentaires

Cette activité introduit les notions de signal analogique et de signal numérique et propose de différencier la nature de signaux issus de l'enregistrement d'un son. Bien que les signaux numériques soient aujourd'hui bien plus utilisés en télécommunication que les signaux analogiques, il est remarqué qu'un signal numérique est moins riche en informations qu'un signal analogique dont il peut être issu. Enfin, l'élève est invité à réfléchir à l'un des intérêts des signaux numériques : leur plus grande immunité face au bruit lors d'une transmission.

Remarque : le document 13, illustrant l'allure d'un signal bruité au cours de sa transmission, montre qu'un signal numérique n'est pas forcément un signal dont la grandeur associée ne prendrait que des valeurs discrètes parfaitement déterminées, contrairement à l'information qu'il transmet (information binaire pour cet exemple, ne prenant que les valeurs 0 ou 1).

Réponses

1. Analyser les documents

a. La grandeur que l'on souhaite analyser est un son.

La grandeur observée sur l'oscilloscope est une tension.

Il s'agit d'un signal analogique car les informations traduisant le son sont associées à la valeur de la tension qui varie ici de manière continue.

b. Le signal transmis par la carte d'acquisition est numérique car l'information sonore est traduite par des valeurs discrètes associées aux valeurs de la tension.

c. L'information binaire transmise est 101101. La tension du signal numérique bruité ne possède pas des valeurs discrètes précises (mais l'information associée prend bien des valeurs discrètes 0 ou 1).

2. Conclure

a. Un signal numérique est moins précis que le signal analogique auquel il correspond.

b. On peut ici facilement retrouver l'information numérique contenue dans le signal transmis en considérant que les valeurs binaires 0 et 1 sont respectivement associées aux valeurs de tensions supérieures et inférieures à 1 V par exemple.

Dans le cas de l'exemple proposé, si l'amplitude du bruit est supérieure à 1 V, l'information transmise sera erronée.

De manière générale, on peut retrouver l'information numérique à transmettre si le rapport de l'amplitude du signal par l'amplitude du bruit n'est pas trop petit.

Activité expérimentale 6. Numérisation d'un signal sonore

Commentaires

Une étude graphique permet d'étudier la quantification d'un signal numérisé avant de réaliser une étude expérimentale de l'échantillonnage d'une tension sinusoïdale. On invite enfin l'élève à mettre en pratique les conclusions obtenues sur les paramètres d'une acquisition en effectuant la numérisation d'un son, l'exemple choisi étant assez simple (son émis par un diapason) pour prévoir les réglages pertinents.

Remarque : il a été choisi de réaliser une étude préalable sur la quantification sous forme documentaire du fait de la difficulté de sa mise en évidence avec certains logiciels d'acquisition.

Réponses

1. Étude préalable

a. Quatre chiffres binaires sont nécessaires pour représenter l'information du signal numérisé, donc la carte d'acquisition a une résolution de 4 bits.

b. Le pas a ici pour valeur $p = 0,27 \text{ V}$.

Si le nombre de bits du CAN est plus grand, alors il y a davantage de valeurs autorisées pour le signal numérisé, donc l'écart entre deux valeurs de la tension, c'est-à-dire le pas, diminue.

La conversion est alors plus précise car la tension numérisée a une allure plus proche de la tension analogique considérée.

c. On a la relation :

$$N \times p = 2U_C$$

d. Pour l'exemple proposé :

$$N = 15 ; p = 0,27 \text{ V} ; U_C = 2 \text{ V}$$

Ainsi :

$$N \times p = 15 \times 0,27 = 4,0 \text{ V} = 2U_C$$

Si U_C augmente, alors p augmente à N constant. La conversion est donc moins précise (car le pas augmente) pour un calibre plus grand.

2. Observer et interpréter

a. Les signaux numérisés avec une période d'échantillonnage T_e de 1, 2 et 5 ms ont une allure proche du signal analogique, mais pas les signaux numérisés avec $T_e = 10 \text{ ms}$ (allure triangulaire) ou $T_e = 20 \text{ ms}$ (tension à peu près constante).

Le signal numérisé est plus ressemblant au signal analogique pour $T_e = 1 \text{ ms}$, c'est-à-dire pour la période d'échantillonnage la plus petite, donc pour la fréquence d'échantillonnage la plus grande : davantage d'échantillons du signal analogique sont mesurés pour une même durée.

b. Le signal numérisé est plus ressemblant au signal analogique pour une fréquence d'échantillonnage f_e élevée, mais cela impose de ne pas dépasser une certaine durée totale pour l'enregistrement puisque le nombre de points de mesures est limité.

3. Conclure

a. Pour une numérisation la plus fidèle, la carte d'acquisition doit comporter un nombre de bits important.

b. La fréquence d'échantillonnage doit être la plus grande possible.

c. L'utilisation d'un nombre de bits ou d'une fréquence d'échantillonnage importants suppose des enregistrements de fichiers numériques de grandes tailles.

d. Pour obtenir la meilleure quantification, le nombre de bits de la carte d'acquisition n'étant pas modifiable, on choisit un calibre tel que l'amplitude du signal affiché sur écran soit la plus grande.

Pour obtenir un échantillonnage satisfaisant, il faut que la fréquence d'échantillonnage soit suffisamment grande devant celle du son pur étudié ici.

Cela suppose de faire un compromis entre la fréquence d'échantillonnage et la durée totale de l'acquisition. Pour que la durée totale d'acquisition soit suffisamment longue, on peut :

- choisir un nombre maximum de points mesures (limité par le système d'acquisition) ;
- estimer que l'échantillonnage est correct s'il y a par exemple au moins 100 mesures réalisées par période du son pur étudié ici, et choisir ainsi :

$$f_e = 100 \times f_{\text{son}}$$

Bilan. Signal analogique et signal numérique

Commentaires

Dans une première page, le bilan définit et différencie les natures analogique et numérique des signaux et conclue sur les principaux avantages des signaux numériques.

Remarque : un exemple où l'information d'un signal numérique est associée à des variations de fréquence d'une tension montre qu'un signal numérique peut être représenté par une grandeur dont la valeur varie de façon continue.

Dans une seconde page, la numérisation est définie comme consistant en un échantillonnage et une quantification d'un signal analogique. Les paramètres affectant la qualité d'une numérisation sont précisés et leurs effets sont illustrés par des graphiques.

Remarque : un parallèle entre l'échantillonnage d'un son et celui d'une image (échantillonnage spatial) est évoqué dans l'exercice Objectif BAC 27 page 591.

Séquence E. Procédés physiques de transmission

Remarque : il a été choisi de comparer les propagations dans des fibres multimode et monomode dans l'exercice 3 page 543 des exercices de fin de thème, qui synthétise différents aspects du chapitre.

Activité expérimentale 7. Propagation libre d'un signal

Commentaires

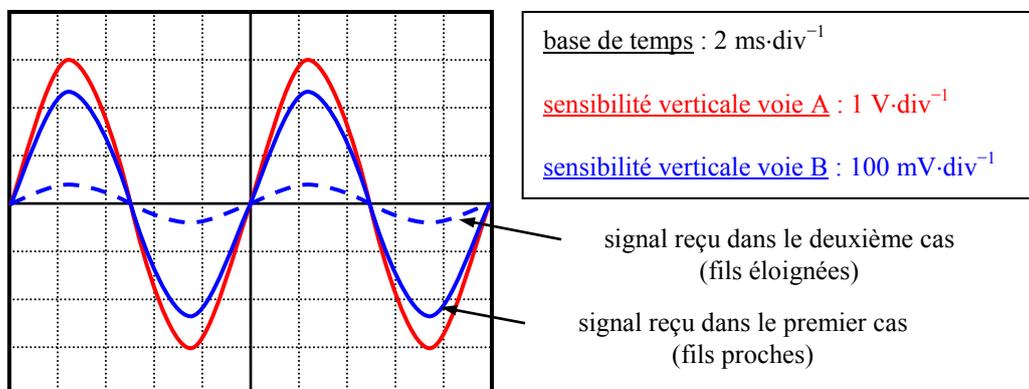
Une étude expérimentale de propagation d'un signal électromagnétique entre deux fils longs jouant le rôle d'antennes permet de mettre en évidence la propagation libre d'un signal ainsi que le phénomène d'affaiblissement. Il est ensuite montré que si la propagation libre permet la mobilité du récepteur, elle impose en général des atténuations plus importantes que dans le cas de la propagation guidée.

Remarque : le phénomène d'interférence entre signaux en propagation libre n'est pas évoqué ici et l'on pourra s'intéresser au problème de la rareté des fréquences encore disponibles en télécommunication avec l'exercice de rédaction de synthèse 27 page 539 portant sur le Wi-Fi ou l'exercice Objectif BAC 26 page 590 à propos de la téléphonie mobile 4G.

Réponses

1. Observer

a. Allures des signaux :



b. Dans les deux cas, les fréquences des deux signaux sont de 100 kHz.

2. Interpréter

a. Émetteur : le fil long relié à la sortie du générateur (il joue le rôle d'antenne émettrice).
Récepteur : le fil long relié à l'oscilloscope (il joue le rôle d'antenne réceptrice).

b. Milieu de propagation : l'air entre les deux fils.

On qualifie la propagation de libre car le signal se propage librement dans l'espace entourant l'antenne émettrice.

c. Les fréquences des signaux émis et reçus sont identiques.

L'amplitude du signal reçu est plus petite que celle du signal émis.

d. On peut relier les deux antennes par l'intermédiaire d'un fil (cela revient à connecter à l'aide d'un long fil la sortie du générateur à l'entrée de l'oscilloscope) : on parle alors de propagation guidée du signal.

3. Conclure

a. Si le signal subit un affaiblissement important, il peut d'autant plus être affecté par le bruit lors de sa propagation. Un signal numérique sera donc plus sûrement détectable car il possède une plus grande immunité face au bruit qu'un signal analogique.

b. La propagation est libre pour les signaux échangés par les technologies 3G et Wi-Fi, alors que la propagation est guidée pour la technologie USB.

L'affaiblissement est en général plus faible pour une propagation guidée que pour une propagation libre, donc le signal à émettre n'a pas besoin d'avoir une puissance aussi importante pour la connexion USB que pour la connexion Wi-Fi.

Activité documentaire 8. Étude de différents supports de transmission

Commentaires

Des documents permettent de comparer les principaux supports de transmission en évoquant en particulier l'atténuation du signal lors de sa propagation et le débit d'information d'une transmission. On conclue en s'interrogeant sur des situations de dessertes des communications internet.

Remarque : l'exercice de synthèse 32 page 541 présente les principales situations de desserte du réseau Internet.

Réponses

1. Interpréter les documents

a. Le débit binaire peut s'exprimer en $\text{bit}\cdot\text{s}^{-1}$. Les fibres optiques monomodes permettent les meilleurs débits de transmission.

b. L'atténuation indiquée de 0,2 dB pour une propagation de 1 km dans la fibre optique monomode conduit à une atténuation de 20 dB pour 100 km. Avec cette atténuation, 1 % de l'énergie émise est toujours présente. Ainsi, la distance maximale de transmission par la fibre présentée est de 100 km avec l'hypothèse indiquée.

c. Le signal est régénéré afin de pouvoir parcourir de très longues distances.

2. Conclure

a. Les débits des communications sont bien meilleurs lorsque des fibres optiques sont installées jusqu'au domicile de l'abonné. L'atténuation des signaux transmis est également plus petite.

Les offres « fibres » (parfois dites FTTH « Fiber To The Home ») restent onéreuses (document 23) et les fournisseurs d'accès ne proposent actuellement ces offres qu'en milieux densément peuplés pour des raisons économiques.

b. Lorsqu'un abonné est situé loin du répartiteur téléphonique le plus proche, la longueur de la ligne ne permet pas d'obtenir le débit nécessaire pour la télévision par ADSL (documents 23 et 24). Les communications par satellite permettent quant à elles d'obtenir les débits nécessaires dans ces « zones blanches » des technologies DSL.

c. La téléphonie par Internet n'est généralement pas transmise par satellite à cause des délais de transmission relativement élevés dans ce cas (document 23), et qui sont contraignants pour les conversations.

Activité expérimentale 9. Propagation guidée d'un signal

Commentaires

L'étude d'un signal réfléchi en bout de câble coaxial permet de mettre en évidence l'atténuation dans le cas d'une propagation guidée et de déterminer le coefficient d'atténuation du câble pour le signal considéré. L'élève est ensuite invité à s'interroger sur des propagations sur de plus longues distances.

Réponses

1. Observer

- Les débuts des signaux sont séparés de 1,0 division, soit d'une durée $\Delta t = 1,0 \mu\text{s}$.
- Pour être certain de la durée déterminée précédemment, il faut modifier la fréquence, donc la période, du signal issu du générateur.
- Mesure des amplitudes :

$$U_E = 1,3 \times 2 = 2,6 \text{ V}$$
$$U_R = 1,1 \times 2 = 2,2 \text{ V}$$

2. Interpréter

- Pendant la durée Δt , le signal réfléchi a parcouru deux fois la longueur du câble, donc :

$$v = \frac{2L}{\Delta t}$$

A.N. :
$$v = \frac{2 \times 100}{1,0 \times 10^{-6}} = 2,0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

On a donc : $v = 0,66 \times c$, qui correspond à la vitesse de la lumière dans un milieu d'indice $n = 1,5$ (plastique présent entre le cœur et l'âme du câble).

- Le signal réfléchi possède une amplitude plus petite que celle du signal émis à cause du phénomène d'affaiblissement du signal au cours de sa transmission.

On observe également que la forme des impulsions est modifiée (phénomène de dispersion).

- Calcul du coefficient d'atténuation du câble pour le signal étudié :

$$\alpha = \frac{1}{2L} \times 20 \log \frac{U_E}{U_R}$$

A.N. :
$$\alpha = \frac{1}{2 \times 100} \times 20 \log \frac{2,6}{2,2} = 7,3 \times 10^{-3} \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$$

Remarque : cette valeur est éloignée de celle habituellement indiquée par les fabricants de câbles coaxiaux car celle-ci est donnée pour des signaux de fréquences de l'ordre de 800 MHz (atténuation de 17 ou 19 dB pour 100 m, soit un coefficient d'atténuation de 0,17 ou 0,19 $\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$).

3. Proposer et réaliser un protocole expérimental

À adapter au matériel disponible.

4. Conclure

L'atténuation reste faible pour une propagation d'une centaine de mètres dans un câble coaxial. Pour une propagation sur un kilomètre, l'atténuation que subit le signal est dix fois plus grande et peut devenir trop importante pour certaines applications. En pratique, on peut utiliser des répéteurs afin de régénérer le signal.

Bilan. Procédés physiques de transmission

Commentaires

La propagation libre d'un signal est différenciée de la propagation guidée. Le débit d'information, ainsi que l'atténuation subie par un signal, sont présentés comme deux qualités essentielles d'une transmission. La distinction est faite entre l'atténuation du signal au cours d'une transmission et le coefficient d'atténuation

Remarque : la comparaison des propagations dans des fibres multimode et monomode est faite dans l'exercice 3 page 543 des exercices de fin de thème.

Séquence F. Stockage optique

Activité documentaire 10. Disque optique et données numériques

Commentaires

Le principe de lecture des données d'un CD est présenté par des documents. Il est demandé à l'élève de faire le lien avec le phénomène d'interférence.

Remarque : la limitation imposée par le phénomène de diffraction n'est pas évoquée dans cette activité.

Réponses

1. Interpréter les documents

a. Un rayon atteignant le fond d'un creux parcourt une longueur supplémentaire correspondant à deux fois (aller-retour) la profondeur du creux, c'est-à-dire une demi-longueur d'onde de la radiation dans le polycarbonate.

b. Après réflexion sur la zone réfléchissante, deux rayons issus du faisceau laser peuvent se superposer et interférer puisque le laser est une source de lumière cohérente. On peut distinguer plusieurs cas pour le spot représenté :

- si les deux rayons se réfléchissent sur le plat autour de l'alvéole, la différence de marche est nulle, les interférences sont constructives et l'intensité lumineuse résultante est non nulle ;
- il en est de même si les deux rayons se réfléchissent au fond du creux ;
- par contre, pour un rayon se réfléchissant sur le plat et l'autre au fond du creux, la différence de marche vaut $\frac{\lambda_{\text{poly}}}{2}$, les interférences sont destructives et l'intensité lumineuse due à ces deux rayons est nulle.

2. Conclure

Au cours de la lecture, le faisceau laser parcourt le sillon et conduit, après réflexion, à une intensité lumineuse détectée :

- maximale lorsque le spot se trouve sur un plat entre deux alvéoles car tous les rayons se réfléchissant restent en phase ;
- minimale lorsque le spot se trouve sur une alvéole car deux rayons se réfléchissant d'une part sur un plat et d'autre part au fond du creux créent des interférences destructives.

Bilan. Stockage optique

Commentaires

Le principe de lecture d'un disque optique est présenté en termes d'interférences possibles entre rayons du faisceau laser de lecture. La capacité de stockage sur disque optique et son évolution sont présentés en s'appuyant sur le phénomène de diffraction. Une explication rapide du codage sur disque optique est évoquée, ainsi que le principe de l'écriture sur disque inscriptible.

Exercices d'application

5 minutes chrono !

1. Mots manquants

- émetteur ; récepteur
- pixels ; octets ; octet
- une infinité ; un nombre fini
- analogique ; numérique ; fréquence d'échantillonnage ; petit ; grand
- guidée ; libre
- grand ; $\text{bit}\cdot\text{s}^{-1}$ (ou $\text{octet}\cdot\text{s}^{-1}$)
- dB ; $\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$
- d'interférence ; diffraction

2. QCM

- magenta
 - le signal analogique contient plus d'informations
 - se transmet de manière plus fidèle
 - 20 dB
 - 101
-

Compétences exigibles

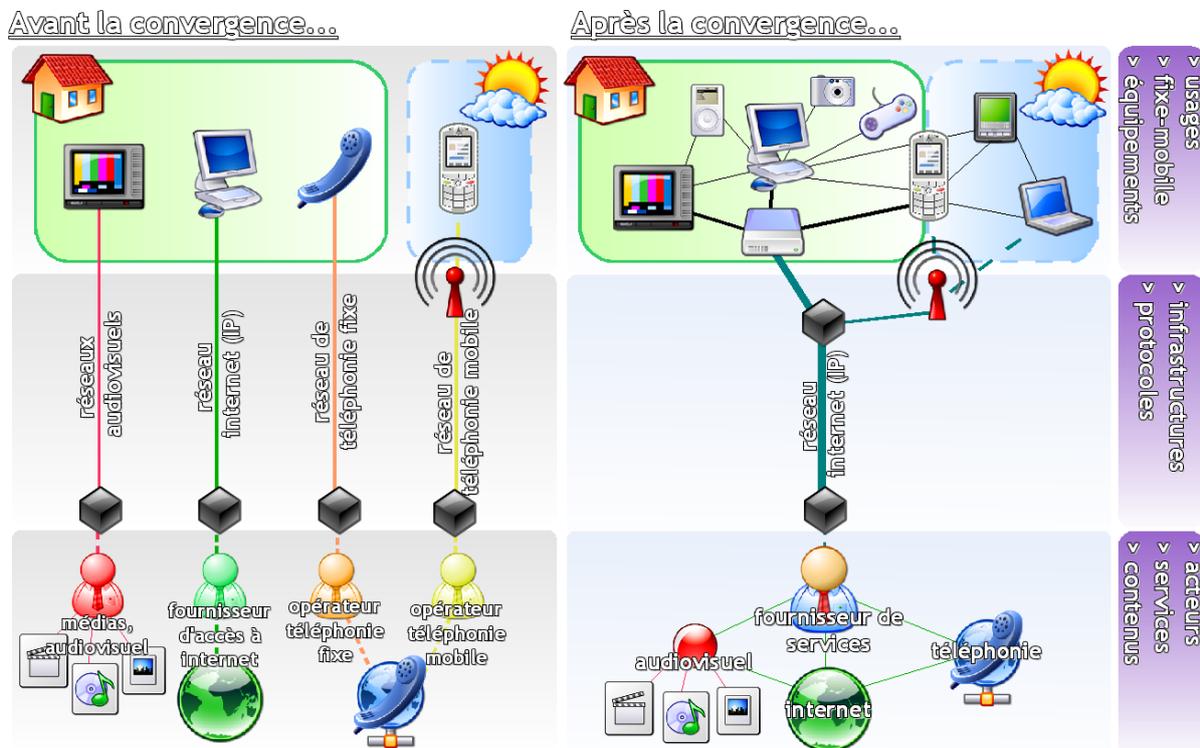
3.

Dispositif	Téléphone mobile	Téléphone « pot de yaourt »
Type de signal	Ondes électromagnétiques	Ondes mécaniques
Milieu de propagation	Air (puis câbles en cuivre ou de fibres optiques des réseaux de communication)	Fil
Émetteur	Antenne du téléphone	Fond du pot de yaourt
Récepteur	Antenne du téléphone	Fond du pot de yaourt

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 26. Transmettre et stocker de l'information

4. Convergence entre téléphonie fixe et mobile, convergence entre l'audiovisuel et les communications électroniques. Les communications tendent à toutes transiter par le réseau Internet. Voici ci-dessous un schéma issu du site Internet :

<http://ant.developpement-durable.gouv.fr>



5. a. Le premier pixel est bleu, le second est jaune (superposition d'une lumière rouge et d'une lumière verte d'intensité identique).

b. Le cyan est obtenu par superposition d'une lumière verte et bleue dans des proportions identiques, donc un pixel cyan a pour code RVB : « 0 ; 255 ; 255 ».

c. Un pixel blanc en niveau de gris est associé à la valeur la plus grande d'un octet : « 255 ».

6. a. Un signal analogique transmet une information représentée par une infinité de valeurs (sous la forme de variations continues d'une grandeur), alors qu'un signal numérique transmet une information associée à un nombre fini de valeurs déterminées.

b. Pour le signal (a), la tension ne prend que deux valeurs différentes, il s'agit donc d'un signal numérique. Pour le signal (b), la tension prend une infinité de valeurs différentes, il s'agit donc d'un signal analogique.

7. a. Ces signaux sont numériques car ils sont représentés par un nombre fini de valeurs déterminées.

b. Le pas p d'une conversion correspond au plus petit écart de tension possible entre deux points de mesure. Dans les deux cas, $p = 0,05$ V.

c. Dans le premier cas, la période d'échantillonnage vaut $T_e = 1$ ms, donc la fréquence d'échantillonnage vaut :

$$f_e = \frac{1}{T_e} = \frac{1}{10^{-3}} = 10^3 \text{ Hz, soit } f_e = 1 \text{ kHz}$$

Dans le deuxième cas, $f_e = 2$ kHz.

d. La numérisation est la plus fidèle dans le second cas car davantage de points de mesure sont enregistrés pour une même durée d'acquisition (de manière générale, une acquisition est d'autant plus fidèle que le pas est petit et que la fréquence d'échantillonnage est grande).

8. a. La télévision n'est pas fournie par les réseaux de téléphonie classique car, dans les câbles en cuivre de ces réseaux, l'atténuation est trop importante pour des débits élevés comme ceux nécessaires aux services de télévision.

b. Un opérateur de télévision par câble doit parfois régénérer le signal avant de le fournir à un abonné car l'atténuation dans les câbles coaxiaux est assez élevée pour des débits élevés comme ceux nécessaires aux services de télévision.

c. Les réseaux internationaux de télécommunication doivent transmettre rapidement beaucoup de données sur de longues distances. La fibre optique est donc privilégiée car elle permet de transmettre une information avec un grand débit et peu d'atténuation.

9. 30 images de 5,0 Ko doivent être transmises en une seconde, donc le débit binaire nécessaire à la connexion est de $30 \times 5,0 = 1,5 \times 10^2 \text{ Ko} \cdot \text{s}^{-1}$.

10. L'affaiblissement en puissance est tel que :

$$\alpha = \frac{1}{\ell} \times 10 \log \frac{\mathcal{P}_E}{\mathcal{P}_S}$$

donc :

$$\log \frac{\mathcal{P}_E}{\mathcal{P}_S} = \frac{\alpha \ell}{10} = \frac{0,20 \times 50}{10} = 1,0 \text{ dB}$$

ainsi :

$$\frac{\mathcal{P}_E}{\mathcal{P}_S} = 10$$

Le signal est dix fois moins puissant en sortie qu'en entrée de câble.

11. a. Dans le cas où le spot laser est situé sur une alvéole :

- des rayons du faisceau laser se réfléchissent sur un plat et d'autres sur un creux ;
- ces deux types de rayons sont en opposition de phase lorsqu'ils se réfléchissent ;
- le signal détecté est minimum (interférences destructives).

b. Dans le cas où le spot laser n'est pas situé sur une alvéole :

- les rayons du faisceau laser se réfléchissent sur un plat ;
 - tous les rayons réfléchis sont en phase ;
 - le signal détecté est maximum (interférences constructives).
-

12. La capacité de stockage d'un disque optique est limitée par le phénomène de diffraction. En effet, la diffraction du faisceau laser par le système de focalisation lui impose de converger non pas en un point, mais sur une certaine surface (le spot). Ainsi, la taille des alvéoles, donc l'information stockée sur le disque, est limitée car le principe de lecture contraint les alvéoles d'avoir une taille proche de celle du spot.

Afin d'augmenter la capacité des disques, on cherche à limiter le phénomène de diffraction pour réduire la taille du spot, et donc des alvéoles, en :

- utilisant un laser d'écriture de longueur d'onde plus petite (IR, rouge puis violet pour les lasers des technologies CD, DVD puis Blu-ray) ;
 - concevant un système de focalisation plus convergent.
-

Exercices de méthode

13. Exercice résolu.

14. 1. a. Le premier support depuis le domicile pour la téléphonie par Internet avec ADSL est le câble téléphonique classique (documents 1 et 2).

b. Le transmission d'informations par ADSL n'affecte pas les communications classiques car cette technologie utilise d'autres fréquences (plus grandes) que celles nécessaires au transport de la voix par téléphonie classique (documents 1 et 3).

2. a. L'ADSL2+ autorise des débits plus importants car cette technologie utilise davantage de fréquences différentes pour les signaux transmettant l'information (document 3).

b. Le domicile est en général éloigné du répartiteur le plus proche, donc la transmission sur le câble du réseau de téléphonie classique est longue et ne permet pas d'obtenir des débits plus importants que ceux utilisant la technologie ADSL (document 4).

15. a. L'indication « 12 Mpixels » faire référence au nombre de pixels composant les photographies enregistrées par l'appareil, comme le montre la dimension « 4000 × 3000 » correspondant aux nombres de pixels en largeur et hauteur.

En codage RVB, un pixel est décrit par trois octets.

Ainsi, $12 \times 10^6 \times 3 = 3,6 \times 10^7$ octets codent une photographie.

Puisque 1 Mo = 1024 Ko = (1024)² octets, la conversion du nombre précédent donne :

$$3,6 \times 10^7 \text{ octets} = \frac{3,6 \times 10^7}{(1024)^2} \text{ Mo} = 34 \text{ Mo}$$

b. La taille indiquée dans les propriétés du fichier image est bien plus petite puisqu'elle vaut 3,06 Mo. L'hypothèse selon laquelle les pixels de la photographie sont enregistrés par le code RVB est donc fausse.

En effet, l'image numérique est enregistrée au format JPEG, dont le but est de fournir un fichier compressé n'attribuant pas un code de trois octets à chaque pixel de l'image, sans que la qualité d'une photographie habituelle ne soit beaucoup affectée.

16. Exercice résolu.

17. 1. a.

Atténuation	Rapport des puissances	Part de la puissance transmise	Part de la puissance dissipée
1,0 dB	1,3	79 %	21 %
2,0 dB	1,6	63 %	37 %
3,0 dB	2,0	50 %	50 %
10 dB	10	10 %	90 %
20 dB	100	1 %	99 %
30 dB	1000	0,1 %	99,9 %
40 dB	10000	0,01 %	99,99 %

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 26. Transmettre et stocker de l'information

b. Avantage : l'atténuation A en dB a des valeurs qui restent simples pour des situations où l'affaiblissement est très différent.

Inconvénient : la donnée de l'atténuation A ne permet pas de connaître rapidement la fraction de la puissance en sortie par rapport à la puissance du signal en entrée de ligne.

c. On a :

$$A = \alpha \times \ell$$

Pour un signal donné, le coefficient d'atténuation α étant une caractéristique de la ligne, il est constant, donc l'atténuation d'un signal est proportionnelle à la longueur ℓ de la ligne.

2. a. La puissance est divisée par 3, donc :

$$\frac{\mathcal{P}_e}{\mathcal{P}_s} = 3 ; \text{ d'où } A = 10 \log \frac{\mathcal{P}_e}{\mathcal{P}_s} = 10 \times \log(3) \approx 4,8 \text{ dB}$$

b. L'atténuation de la transmission vaut :

$$A = 0,220 \times 100 = 22,0 \text{ dB}$$

Le rapport des puissances vaut donc :

$$\frac{\mathcal{P}_e}{\mathcal{P}_s} = 10^{A/10} = 10^{22,0/10} = 158$$

La puissance est divisée par 158 en sortie de câble.

Les pertes correspondent à la part de puissance dissipée :

$$1 - \frac{\mathcal{P}_s}{\mathcal{P}_e} = 1 - \frac{1}{158} = 0,994 = 99,4 \%$$

18. a. D'après les données, un caractère est codé par un octet. Le SMS comportant 35 caractères, il y a transmission de 35 octets.

Le débit binaire correspond au nombre de bit ou octets transmis en une seconde, donc le débit de cette transmission est de :

$$\frac{35}{1,23} = 28,5 \text{ octet} \cdot \text{s}^{-1}$$

b. D'après les données, le codage RVB est utilisé ici, donc trois octets sont nécessaires pour représenter un pixel. L'image comportant $320 \times 240 = 76\,800$ pixels est donc décrite par :

$$3 \times 76\,800 = 230\,400 \text{ octets}$$

Pour la valeur du débit estimée précédemment, la durée de la transmission vaut :

$$\frac{230400}{28,5} = 8,08 \times 10^3 \text{ s} = 134 \text{ min} = 2,25 \text{ h}$$

Ce résultat n'est pas cohérent avec notre quotidien, puisque l'envoi d'une image classique, comme ici, ne dure que quelques secondes. L'évaluation du débit de la transmission à la question précédente est faussée par la durée d'initialisation plus grande que la durée de la transmission des données. Il faudrait connaître précisément cette durée d'initialisation pour établir une valeur significative du débit, qui serait bien plus importante que celle établie à la réponse précédente.

Exercices d'entraînement

19. D'après les caractéristiques du tableau, la technologie de communication en champ proche a l'avantage, vis-à-vis du service de paiement sans contact :

- d'être de courte portée (quelques centimètres) afin que le paiement s'effectue de manière volontaire par approche du téléphone mobile vers le lecteur et que la transmission des données bancaires soit sécurisée (pas d'interception des données, bien qu'elles soient transmises dans l'air en propagation libre) ;
- de nécessiter une durée courte (inférieure à 0,1 s) pour établir la connexion pour que le paiement soit rapide.

Le débit de la communication, limité dans le cas de la communication en champ proche, n'est pas restrictif pour un paiement car l'échange de données bancaires ne fait pas intervenir beaucoup de données.

20. a. C'est le débit binaire d'une transmission qui est indiqué sur le graphique.

b. La télévision par Internet, nécessitant un débit de plusieurs $\text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$, n'était pas possible en 1995.

c. ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) : ligne numérique asymétrique d'abonné.

FTTH (Fiber to the home) : fibre optique jusqu'au domicile.

Supports en abord de domicile :

- câble de cuivre du réseau téléphonique classique pour la technologie ADSL ;
- fibre optique pour la technologie FTTH.

21. a. Par mesure sur les graphiques :

$$U_e = 4,0 \text{ V et } U_s = 2,0 \text{ V ; d'où } \frac{U_e}{U_s} = 2,0$$

donc le signal subit un affaiblissement en amplitude d'un facteur deux.

b. Si les puissances sont proportionnelles aux carrés des amplitudes, alors :

$$\log \frac{\mathcal{P}_e}{\mathcal{P}_s} = \log \left(\frac{U_e}{U_s} \right)^2 = 2 \log \left(\frac{U_e}{U_s} \right)$$

$$\text{Or : } \alpha = \frac{1}{\ell} \times 10 \log \frac{\mathcal{P}_e}{\mathcal{P}_s} ;$$

$$\text{donc : } \alpha = \frac{1}{\ell} \times 20 \log \frac{U_e}{U_s} .$$

$$\text{A.N. : } \alpha = \frac{1}{16} \times 20 \log(2,0) = 0,38 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1} .$$

22. a. La fréquence d'échantillonnage doit être maximale pour que la numérisation soit la plus fidèle possible.

b. La fréquence d'échantillonnage f_e est maximale lorsque les $N = 1\ 000$ échantillons possibles sont réalisés. Pour l'enregistrement de durée Δt , cela revient à ce que la durée entre deux mesures soit :

$$\frac{\Delta t}{N} = \frac{0,040}{1000} = 4,0 \times 10^{-5} \text{ s}$$

Cette durée correspond à la période d'échantillonnage T_e la plus courte possible, donc la fréquence d'échantillonnage maximale vaut :

$$f_e = \frac{1}{T_e} = \frac{1}{4,0 \times 10^{-5}} = 2,5 \times 10^4 \text{ Hz}$$

c. Ici $f_e > 20f$, donc l'échantillonnage est satisfaisant.

23. a. Chaque chromophore possède une intensité lumineuse liée au nombre compris entre 0 et 255 (valeur de l'octet) qui lui correspond. Le nouveau code du pixel montre que les intensités lumineuses des chromophores sont plus petites, donc l'image a été assombrie.

b. Après sélection d'une zone restreinte autour de chaque œil, le logiciel convertit, dans le fichier image, les pixels correspondant rouges, de codes proches de « 255 ; 0 ; 0 », en pixels noirs, de codes proches de « 0 ; 0 ; 0 ».

24. a. Cette image comporte $3 \times 100 \times 200 = 60\ 000$ pixels.

b. En codage RVB, un pixel est défini par trois octets.

La taille de l'image est donc : $3 \times 60\ 000 = 180\ 000$ octets.

Puisque 1 Ko = 1024 octets, la taille du fichier vaut aussi :

$$\frac{180000}{1024} = 175,781 \text{ Ko}$$

c. Capacité du disque en Ko :

$$4,0 \text{ Go} = 4,0 \times 1024 \text{ Mo} = 4,0 \times (1024)^2 \text{ Ko} = 4,2 \times 10^6 \text{ Ko}$$

On peut donc enregistrer :

$$\frac{4,2 \times 10^6}{175,781} = 2,4 \times 10^4 \text{ images de ce type}$$

25. a. La voix est un signal analogique car elle transmet des informations sous la forme de variations continues de l'intensité sonore (l'information qu'elle contient est associée à une infinité de valeurs).

Elle est convertie en signal numérique au cours d'une communication VoIP, car l'information est alors représentée par un nombre limité de valeurs définies de la tension à transmettre.

b. Les deux paramètres essentiels de la modulation d'impulsion codée sont la fréquence d'échantillonnage et la résolution (nombre de bits) du convertisseur.

Pour l'exemple illustré :

- la fréquence d'échantillonnage vaut $f_e = \frac{1}{T_e} = \frac{1}{23 \times 10^{-6}} = 4,3 \times 10^4 \text{ Hz}$;

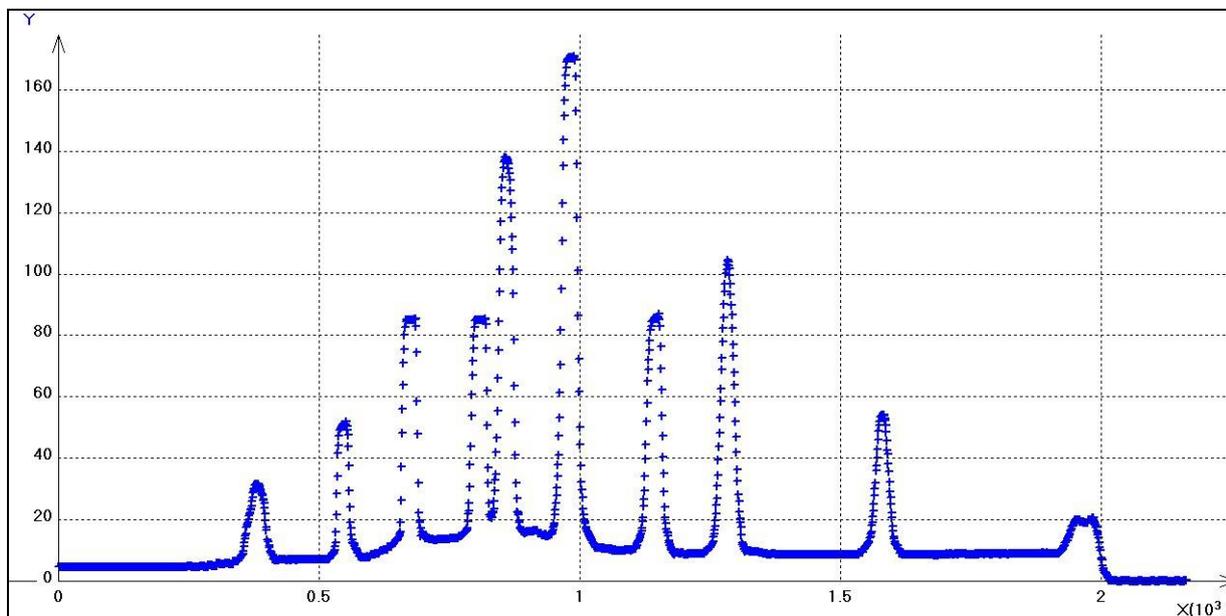
- il y a $16 = 2^4$ valeurs différentes possibles pour l'amplitude, donc le convertisseur a une résolution de 4 bits.

26. a. Une démarche possible :

- On identifie, grâce à la première photographie, les principales raies d'émission du mercure.
- On utilise les positions x (en pixels, à partir de la limite gauche de la photographie) de ces raies sur la deuxième photographie, ainsi que les longueurs d'onde λ correspondantes indiquées dans les données de l'exercice, pour réaliser une courbe d'étalonnage $x = f(\lambda)$ (ou pour attribuer une échelle au document, c'est-à-dire une correspondance position (en pixels) \leftrightarrow longueur d'onde (en nm), si la dispersion varie linéairement avec la longueur d'onde).
- On détermine les longueurs d'onde des raies principales du cadmium en exploitant la courbe d'étalonnage (ou en utilisant l'échelle de la photographie).

b. Détermination des longueurs d'onde des raies principales du cadmium :

- En utilisant *SalsaJ* (sélection rectangulaire de la plupart de la photo du deuxième spectre), on obtient le profil en intensité de la photographie. On utilise l'option "liste", puis on sélectionne toutes les coordonnées (CTRL + A), données qui sont copiées dans un tableur-grapheur (par exemple dans *Regressi*, faire : « Fichier » / « Nouveau » / « Presse-papiers »), permettant un pointage précis des positions x (en pixels) des raies.



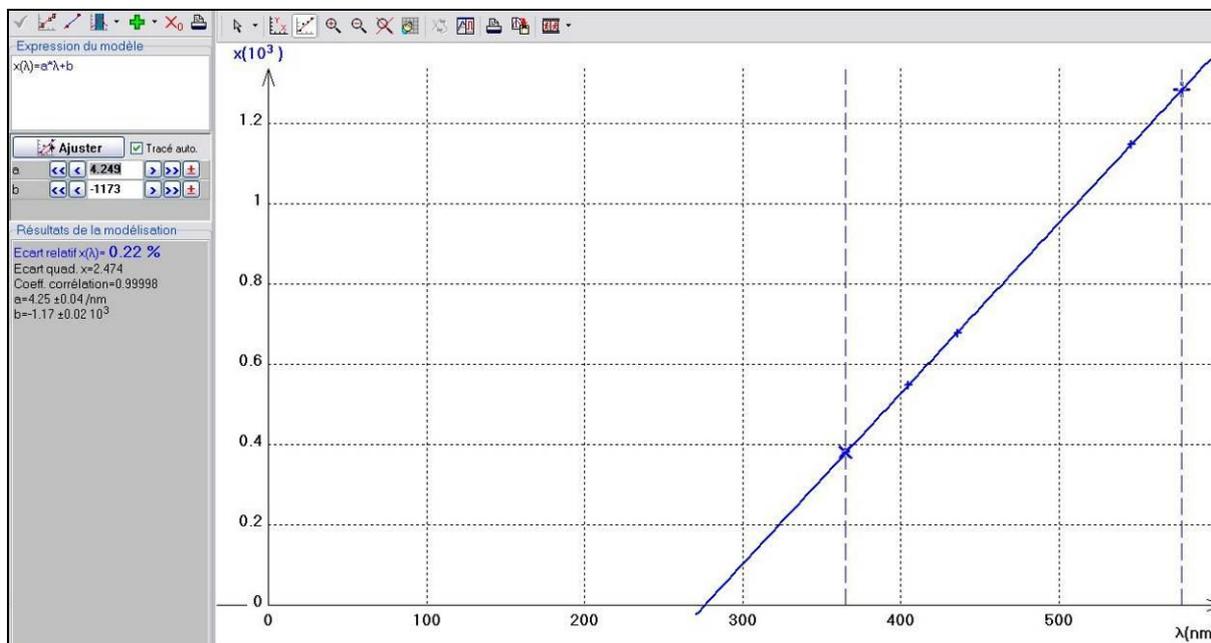
- On réalise le pointage des positions x des 5 raies du mercure identifiées d'après le premier spectre. Les valeurs obtenues, attribuées aux longueurs d'onde données dans l'énoncé, sont les suivantes :

Position de la raie sur la photographie (en pixels)	380	548	676	1147	1284
Longueur d'onde du rayonnement (en nm)	365	405	436	546	578

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur

Chapitre 26. Transmettre et stocker de l'information

- Dans le tableur, on réalise un nouveau fichier (sous *Regressi* : « Fichier » / « Nouveau » / « Clavier ») pour rentrer manuellement ces mesures. On trace la courbe d'étalonnage $x = f(\lambda)$: les points sont alignés (écart relatif du modèle affine de 0,22 %), donc la dispersion est une fonction affine de la longueur d'onde (la dispersion varie linéairement en fonction de la longueur d'onde dans le cas d'un réseau).



- Le pointage ou le calcul à partir du modèle donne alors les valeurs de longueurs d'onde suivantes pour les raies du cadmium :

Position de la raie sur la photographie (en pixels)	809	858	984	1580
Longueur d'onde du rayonnement (en nm)	466	480	508	648

Remarque : une des raies (celle à 481 nm) est en fait due à la présence de zinc dans les vapeurs de la deuxième source, qu'il a été choisi de passer sous silence pour ne pas compliquer cet exercice.

27. Éléments de réponse

a. Introduction possible

Le Wi-Fi et le Li-Fi sont des technologies de transmission libre (sans fil). Le Wi-Fi utilise des ondes hertziennes, et le Li-Fi des ondes lumineuses.

Le Wi-Fi est une technologie de réseau informatique sans fil à haut débit, qui est devenue un moyen d'accès à Internet populaire, avec beaucoup d'avantages mais aussi des inconvénients.

b. Avantages du Wi-Fi (d'après le document 1)

- propagation libre donc utilisation nomade ;
- haut débit d'information ;
- débits symétriques ;
- installation simple (pas de câble) ;
- coûts réduits ;
- bande de fréquence d'utilisation libre ;
- de nombreux équipements disposent de cette technologie ;

- le Wi-Fi peut apporter une solution d'accès alternative dans les zones blanches de l'ADSL ;
- l'avènement de nouveaux objets communicants et leurs usages promet encore un bel avenir au Wi-Fi ;
- des protocoles de sécurité existent pour cette transmission libre donc forcément disposée au piratage.

c. Problèmes liés au Wi-Fi (d'après les documents 1, 2 et 3)

Pour le Wi-Fi à domicile :

- portée limitée (cela peut-être un avantage pour la sécurité) et sensibilité aux obstacles ;
- cohabitation des fréquences, problèmes d'interférences et de brouillage ;
- manque de sécurité parfois.

Pour Wi-Fi en point d'accès au réseau Internet :

- portée limitée (cela peut-être un avantage pour la sécurité) et sensibilité aux obstacles ;
- cohabitation des fréquences, problèmes d'interférences et de brouillage, donc limitation de la capacité de transfert de données sur les fréquences hertziennes déjà saturées (problème de "capacité") ;
- problèmes énergétiques et économiques ("efficacité") ;
- accès pas possible partout ("disponibilité") ;
- problème de piratage ("sécurité").

d. Solutions qu'apporterait le Li-Fi (d'après les documents 2 et 3)

- il réduirait le problème de capacité de transmission de données car les fréquences utilisables sont davantage disponibles dans le domaine visible (et pas d'interférences si transmission en ligne droite) ;
- il serait plus efficace car utiliserait des dispositifs d'éclairage utiles par ailleurs ;
- il serait disponible dans certains cas où le Wi-Fi ne l'est pas (hôpitaux, avions, ...) ;
- il serait plus sécurisé car la transmission serait limitée à la zone d'éclairage.

e. Conclusion possible

Le Wi-Fi ne pourra sans doute être remplacé par le Li-Fi que pour des usages très particuliers. Mais le Li-Fi peut être un autre moyen de transmission pour éviter le problème de capacité des transferts de données, lié à la limitation du spectre encore disponible.

La sécurité n'est pas véritablement un problème du Wi-Fi, des solutions existent, qu'il faudra perfectionner.

Le problème énergétique n'est pas un problème pour le Wi-Fi à domicile, le Li-Fi peut être une solution parmi d'autres pour réduire la consommation énergétique des télécommunications.

Exercices de synthèse

28. a. Le signal transmis par la tête de la parabole est numérique car l'information qu'il transmet est associé à deux valeurs de la phase (valeur positive ou négative) auxquelles correspondent deux valeurs binaires représentant l'information.

b. $\alpha = \frac{1}{\ell} \times 10 \log \frac{\mathcal{P}_E}{\mathcal{P}_S}$; donc : $\frac{\mathcal{P}_E}{\mathcal{P}_S} = 10^{\frac{\alpha \times \ell}{10}}$; d'où : $\mathcal{P}_S = \mathcal{P}_E \times 10^{-\frac{\alpha \times \ell}{10}}$.

Ici, le signal possède une fréquence de 2 400 MHz, donc l'atténuation de la transmission vaut 38,8 dB pour une longueur de câble de 100 m, d'après les indications du fabricant.

Dans ces conditions, le coefficient d'atténuation du câble vaut :

$$\alpha = \frac{38,8}{100} = 0,388 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$$

Or, la longueur du câble vaut $\ell = 25$ m d'après les indications du fabricant.

Ainsi :

$$\mathcal{P}_S = 2,0 \times 10^{-0,388 \times 25} = 0,21 \text{ mW}$$

29. a. La technologie Blu-ray utilise un laser de lecture de petite longueur d'onde par rapport aux technologies CD et DVD, afin de réduire l'effet de la diffraction sur la taille du spot laser. Ce dernier n'est pas aussi étalé et permet la lecture de données enregistrées par des alvéoles plus petites : ceci augmente la capacité de stockage du disque.

b. Émetteur : lecteur Blu-ray ; récepteur : télévision ; support de propagation : câble HDMI.

c. La résolution est de 16 bits sur deux voies, donc il y a $2 \times 16 = 32$ bits de données pour chaque échantillon enregistré. D'après la fréquence d'échantillonnage utilisé pour l'enregistrement, il y a, en une seconde, $44,1 \times 10^3$ échantillons qui sont transférés, donc le débit de la transmission audio est de :

$$32 \times 44,1 \times 10^3 = 1,41 \times 10^6 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} = 1,41 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$$

d. Dans l'hypothèse du codage RVB, trois octets sont nécessaires à la détermination d'un pixel, donc une image est décrite par :

$$3 \times 1\,920 \times 1\,080 = 6\,220\,800 \text{ octets}$$

e. D'après la fréquence d'affichage du téléviseur, 60 images sont traitées en une seconde, donc le débit de la transmission vidéo est de :

$$60 \times 6\,220\,800 = 3,7 \times 10^8 \text{ octet} \cdot \text{s}^{-1}$$

Un octet correspondant à 8 bits, le débit se ramène à :

$$8 \times 3,7 \times 10^8 = 3,0 \times 10^9 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} = 3,0 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$$

Ce débit est plus de mille fois supérieur à celui lié à la transmission du signal audio.

f. Si on ne considère que le signal vidéo, la capacité totale du disque permet une durée d'enregistrement de :

$$\frac{50 \times (1024)^3}{3,7 \times 10^8} = 1,5 \times 10^2 \text{ s}, \text{ soit à peine plus de deux minutes}$$

Ce résultat n'est pas satisfaisant car on n'a pas pris en compte la compression des données vidéo alors décrites par un nombre plus faible d'octets sans modifier sensiblement la qualité de la vidéo. La durée totale d'enregistrement est ainsi bien plus grande en pratique.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 26. Transmettre et stocker de l'information

30. a. Contrairement à l'œil, l'appareil photographique est sensible à une partie du domaine du rayonnement infrarouge.

b. Par mesure graphique, on détermine la période du signal : $5T = 550$ ms, donc $T = 110$ ms.

$$\text{Ainsi : } f = \frac{1}{T} = \frac{1}{110 \times 10^{-3}} = 9,09 \text{ Hz.}$$

c. Il s'agit d'un signal numérique car l'information qu'il transporte est binaire. Un 1 est codé par une transition haute et un 0 par une transition basse de la tension toutes les $1\ 800\ \mu\text{s}$.

d. Les enregistrements ont des fréquences d'échantillonnages bien trop petites pour pouvoir apprécier cette fréquence.

Pour avoir accès à cette fréquence, l'enregistrement aurait dû utiliser une fréquence d'échantillonnage f_e au moins du même ordre que f_{IR} .

Or, pour $f_e = f_{\text{IR}} \approx 10^{14}$ Hz, il s'écoule une durée entre deux mesures de valeur :

$$T_e = \frac{1}{f_e} = \frac{1}{f_{\text{IR}}} \approx 10^{-14} \text{ s}$$

Le temps de réponse du montage captant le signal étant de $10\ \mu\text{s} = 1,0 \times 10^{-5}$ s, il ne peut pas faire apparaître des variations rapides comme celles qui seraient nécessaires pour déterminer sur l'enregistrement la fréquence du signal infrarouge.

31. a. Signal 1 : deux niveaux ; signal 2 : six niveaux.

b. Signal 1 : 1 bit est transmis toutes les $10\ \mu\text{s}$, donc le débit binaire est de :

$$\frac{1}{10 \times 10^{-6}} = 1,0 \times 10^5 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} = 1,0 \times 10^2 \text{ kbit} \cdot \text{s}^{-1}$$

Signal 2 : 3 bits sont transmis toutes les $20\ \mu\text{s}$, donc le débit binaire est de :

$$\frac{3}{20 \times 10^{-6}} = 1,5 \times 10^5 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} = 1,5 \times 10^2 \text{ kbit} \cdot \text{s}^{-1}$$

Le signal 2 permet un débit de transmission plus grand.

c. Les valeurs plus petites du signal s'expliquent par le phénomène d'affaiblissement (dissipation d'énergie vers le milieu extérieur).

d. Si les puissances sont proportionnelles aux carrés des tensions, alors :

$$\log \frac{\mathcal{P}_e}{\mathcal{P}_s} = \log \left(\frac{u_e}{u_s} \right)^2 = 2 \log \left(\frac{u_e}{u_s} \right)$$

Or :

$$\alpha = \frac{1}{\ell} \times 10 \log \frac{\mathcal{P}_e}{\mathcal{P}_s}$$

avec ℓ la longueur du parcours considéré dans le câble.

Donc :

$$\alpha = \frac{1}{\ell} \times 20 \log \frac{u_e}{u_s}$$

D'autre part, par comparaison avant et après transmission, on peut considérer que le rapport des tensions vaut deux environ pour chacun des signaux.

Ainsi :

$$\alpha = \frac{1}{100} \times 20 \log(2) = 0,06 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$$

e. C'est dans le cas (d) que des erreurs de transmission risquent d'être nombreuses, car des niveaux de tension se chevauchent à cause du bruit.

Dans le cas (c), on peut facilement repérer les niveaux haut et bas, par exemple en fixant le critère suivant :

- pour une tension supérieure à 1 V, le niveau est haut ;
- pour une tension inférieure à 1 V, le niveau est bas.

f. Pour avoir une transmission de haut débit, il faut que le signal porteur de l'information varie rapidement. Or, pour des fréquences grandes, l'atténuation devient importante et risque de faire superposer les niveaux de tensions (comme c'était le cas pour le signal (b) étudié précédemment) pour des transmissions à grande distance, rendant le signal reçu inexploitable.

g. Les répéteurs ont pour rôle de régénérer le signal numérique à l'identique de ce qu'il était à l'émission, de manière à s'affranchir de l'atténuation lors de la propagation du signal.

Il est probable que le traitement du signal par les répéteurs nécessite une certaine durée qui affecte le débit de la transmission.

32. Exemples d'éléments que l'on peut retrouver dans la synthèse

a. Introduction possible

Les offres des fournisseurs d'accès à Internet répondent à des situations variées qui doivent prendre en compte les multiples besoins de la population et les différentes configurations des territoires.

b. Différents besoins des usagers

Les besoins diffèrent d'un usager à l'autre et selon la situation dans laquelle il se trouve. Certains usagers ont besoin :

- d'un débit très élevé (en particulier pour les usages multimédia) ;
- de temps de réponse courts (applications interactives comme les jeux vidéo en ligne) ;
- d'une connexion permanente (mobilité de la téléphonie mobile par exemple) ;
- de débits symétriques (pour le télétravail par exemple).

D'autres privilégient le coût de l'abonnement.

c. Distinction entre les niveaux de transport, collecte et desserte

Le réseau Internet est structuré en trois niveaux aux besoins différents :

- le réseau de transport (au niveau international et national) doit supporter des débits énormes et utilise uniquement la fibre optique comme milieu de propagation des signaux, car celle-ci permet les meilleurs débits et des atténuations des signaux acceptables sur de longues distances ;
- le réseau de collecte (au niveau de la région et du département) utilise de la même manière la fibre optique, parfois le réseau téléphonique avec les technologies DSL moins performantes (débits moyens et portée limitée à cause d'une atténuation bien plus importante) mais nécessitant moins d'investissement, et les technologies sans fil (faisceaux hertziens, liaison satellite, ...) permettent un accès géographiquement plus large sans nécessité de réaliser beaucoup d'infrastructures ;
- le réseau de desserte (au niveau des villes et des quartiers) nécessite des débits plus limités, mais il doit atteindre un maximum d'abonnés et utilise ainsi divers supports et technologies de transmission selon la configuration des territoires.

d. Configuration du territoire et desserte des communications

Les technologies utilisées en desserte sont en grande partie déterminées par la configuration du territoire :

- les secteurs urbains et denses permettent l'emploi de technologies performantes mais souvent à fort investissement (fibres optiques jusqu'au domicile, ADSL2+, 3G, WiMAX, ...) ;
- les secteurs isolés et peu denses imposent d'autres technologies moins performantes du fait de l'atténuation importante pour les grandes distances de transmission (ADSL au lieu de ADSL2+, ReADSL, ...) mais nécessitant des investissements moins conséquents (ADSL ou ReADSL en propagation guidée, WiMAX ou Wi-Fi en propagation libre, ...) ;

- les secteurs avec peu d'obstacles et des points hauts se prêtent bien aux réseaux hertziens (WiMAX, Wi-Fi, ...);
- les infrastructures présentes (réseau téléphonique, réseau optique déjà présent, ...) permettent de réduire les coûts de mise en œuvre de certaines technologies en évitant des travaux lourds.

e. Complémentarité des technologies de desserte

Les technologies au niveau de la desserte peuvent se compléter :

- dans les zones peu denses, la desserte haut débit par les réseaux filaires n'est pas toujours assurée, on parle de « zones blanches ADSL », car la zone de desserte de l'ADSL est limitée à quelques kilomètres autour du répartiteur téléphonique et que le niveau de service est conditionné par la distance entre l'abonné et le répartiteur, à cause du phénomène d'affaiblissement : dans ce cas, le Wi-Fi ou le WiMAX par exemple sont des solutions possibles, car bien adaptées à la couverture rapide de zones où la clientèle est dispersée ; la desserte par satellite est également possible car elle couvre de très grandes étendues, mais offre des performances plus limitées ;
- contrairement à l'ADSL, l'offre SDSL autorise les débits symétriques généralement utiles aux entreprises mais pas aux particuliers.

Les technologies de desserte peuvent aussi se concurrencer selon les usages possibles, les performances et les coûts :

- dans une zone urbaine, un opérateur peut proposer de l'ADSL (peu coûteux, débit moyen) tandis qu'un autre offre du FttH (plus coûteux, débit élevé) ; chaque abonné choisit la technologie qui répond le mieux à ses besoins ;
- sur un même territoire, une technologie sans fil (WiMAX, Wi-Fi, ...) permet aux usagers de se connecter en déplacement mais aussi à leur domicile, tandis qu'une technologie filaire (DSL, fibre au domicile) offre des accès uniquement résidentiels mais généralement plus performants ;
- dans les zones peu denses, la desserte haut débit par les réseaux filaires n'est pas toujours assurée (zones blanches ADSL), dans ce cas, le Wi-Fi ou le WiMAX par exemple sont des solutions possibles, car bien adaptées à la couverture rapide de zones où la clientèle est dispersée ; la desserte par satellite est également possible car elle couvre de très grandes étendues, mais offre des performances limitées.

f. Conclusion possible

Du fait des situations variées selon les besoins et les contextes géographiques, aucune technologie n'offre de solution universelle à la desserte des communications Internet. Les fournisseurs d'accès à Internet font appel à une association de technologies complémentaires, chacune avec ses avantages et ses inconvénients, en termes de performances (débit, temps de réponse), de portée (liée à l'atténuation des signaux transmis et fonction des débits désirés), de coûts, de caractéristiques techniques (propagation libre ou guidée, mobilité, symétrie, facilité de mise en œuvre, ...).

Thème 3 – Exercices de fin de thème

Manuel pages 542 à 545

Ces exercices concernent les chapitres 21 à 26 du manuel.

1. 1. Dosage spectrophotométrique

a. $M_0 = M(\text{K}) + M(\text{Mn}) + 4 \times M(\text{O}) = 39,1 + 54,9 + (4 \times 16,0) = 158,0 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

b. $n_0 = c_0 \times V_0$ et $m_0 = n_0 \times M_0$.

D'où : $m_0 = c_0 \times V_0 \times M_0 = 1,00 \times 10^{-3} \times 1,00 \times 158,0 = 158 \text{ mg}$.

c. La solution mère S_0 doit être préparée dans une fiole jaugée de volume 1,0 L.

d. On peut réaliser un dosage par spectrophotométrie car l'espèce à doser dans l'eau de Dakin, l'ion permanganate, est une espèce colorée.

e. Par lecture graphique, on trouve $c = 0,063 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} = 6,3 \times 10^{-5} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

f. Le permanganate de potassium se dissocie totalement dans l'eau. Donc dans l'eau de Dakin, le permanganate de potassium est sous forme ionique ($\text{K}^+(\text{aq})$, $\text{MnO}_4^-(\text{aq})$). Ce dosage peut ainsi être réalisé par conductimétrie car l'eau de Dakin conduit le courant électrique.

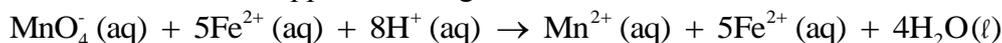
2. Dans le manuel élève, le fer (III) a été corrigé en fer (II).

Dosage par titrage

a. Le réactif titrant est l'ion fer (II) Fe^{2+} présent dans la solution acidifiée de sulfate de fer (II).

Le réactif titré est l'ion permanganate MnO_4^- .

b. L'équation de la réaction support du titrage s'écrit :



c. À l'équivalence :

$$\frac{n_D}{1} = \frac{n_i}{5} \text{ d'où } n_D = \frac{n_i}{5}$$

d. $n_D = c \times V_e$ et $n_i = c' \times V'$.

D'où : $c = \frac{c' \times V'}{5 \times V_e}$.

A.N. : $c = \frac{1,0 \times 10^{-3} \times 5,0}{5 \times 15,9} = 6,3 \times 10^{-5} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

e. Les résultats trouvés aux questions **1.e.** et **2.d.** sont identiques.

f. $m_1 = c \times V \times M_0$.

$m_1 = 6,3 \times 10^{-5} \times 0,100 \times 158,0 = 9,9 \times 10^{-4} \text{ g} = 0,99 \text{ mg}$.

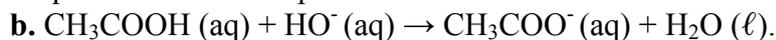
Dans 100 mL d'eau de Dakin, il y a 0,99 mg de permanganate de potassium.

g. Écart relatif : $\frac{|0,99 - 1,0|}{1,0} \times 100 = 1,0 \%$.

La valeur trouvée pour m_1 est très proche de celle indiquée sur l'étiquette du flacon.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Thème 3. Exercices de fin de thème

2. a. À l'équivalence, on observe un changement de couleur, la solution est incolore avant l'équivalence et rose après.



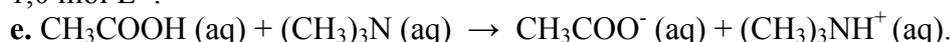
c. À l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques.

d. $\frac{n_{\text{CH}_3\text{COOH},i}}{1} = \frac{n_{\text{HO}^-,e}}{1}$.

$c_S V_S = c V_e$ donc $c_S = \frac{c V_e}{V_S}$,

$c_S = \frac{0,20 \times 10,0 \times 10^{-3}}{20,0 \times 10^{-3}} = 0,10 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

La concentration en acide éthanoïque dans le vinaigre est dix fois plus importante, soit $1,0 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.



3. Dans le manuel élève, quelques corrections ont été effectuées :

- le titre du document 1 est « Fibre optique à saut d'indice » (au lieu de « Dispersion dans une fibre optique ») ;

- dans le document 2, les deux courbes sont dessinées en rose ; dans la légende ont été précisé que l'allure du signal en entrée est à gauche et que l'allure du signal en sortie est à droite afin que les deux courbes soient identifiées sans ambiguïté ;

- dans le document 4, le deuxième signal représenté est une « fibre multimode à gradient d'indice » (au lieu de « fibre multimode à saut d'indice »).

1. $\alpha = \frac{1}{L} \times 10 \log \frac{\mathcal{P}_i}{\mathcal{P}_r}$ donc $\frac{\mathcal{P}_i}{\mathcal{P}_r} = 10^{\frac{\alpha \times L}{10}}$ soit $\frac{\mathcal{P}_r}{\mathcal{P}_i} = 10^{-\frac{\alpha \times L}{10}}$.

A.N. : $\frac{\mathcal{P}_r}{\mathcal{P}_i} = 10^{\frac{-1,0 \times 10^{-5} \times 1,0 \times 10^3}{10}} = 10^{-1,0 \times 10^{-3}}$

$\frac{\mathcal{P}_r}{\mathcal{P}_i} = 1,0 \times 10^2 \%$

À deux chiffres significatifs, 100 % de la puissance initiale est transmise au bout de 1,0 km.

2. a. $t_2 = \frac{L}{v}$ avec $v = \frac{c}{n_1}$ d'où $t_1 = \frac{L \times n_1}{c}$.

b. D'après le document 2, un rayon arrivant sous l'angle i_{\max} parcourt une distance :

$$L_2 = \frac{L}{\sin(\theta)} = \frac{L \times n_1}{n_2}$$

donc : $t_1 = \frac{L_2}{v} = \frac{L \times n_1^2}{c \times n_2}$

c. L'élargissement temporel de l'impulsion est due au retard d'un rayon arrivant sous l'angle maximal i_{\max} par rapport à un rayon arrivant sous incidence normale en entrée de fibre.

Ainsi : $\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{L \times n_1^2}{c \times n_2} - \frac{L \times n_1}{c} = \frac{L \times n_1}{c} \times \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right)$

d. A.N. : $\Delta t = \frac{1,0 \times 10^3 \times 1,456}{3,0 \times 10^8} \times \left(\frac{1,456}{1,410} - 1 \right) = 1,6 \times 10^{-7} \text{ s}$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Thème 3. Exercices de fin de thème

- 3. a.** Il s'agit d'un signal numérique car l'information transmise est binaire : elle est représentée soit par la présence, soit par l'absence d'impulsion pendant une durée T .
b. Un bit 1 ou 0 est transmis à chaque durée T écoulée, donc le débit binaire de ce signal vaut :

$$\frac{1}{T}$$

- 4. a.** Deux impulsions doivent être au moins séparées de la durée $T = \Delta t$.
b. Dans ce cas, le débit binaire vaut :

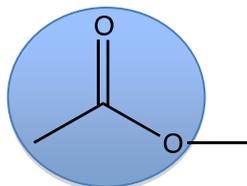
$$\frac{1}{T} = \frac{1}{\Delta T} = \frac{1}{1,6 \times 10^{-7}} = 6,3 \times 10^6 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} = 6,3 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$$

- c.** Le débit binaire pour la fibre étudiée est du même ordre que celui d'une ligne ADSL.
5. Le cœur d'une fibre à gradient d'indice est plus petit, donc la différence de parcours entre deux rayons est plus petite que pour une fibre à saut d'indice. Ainsi, la dispersion est moindre et le débit de transmission permis pour que deux impulsions en entrée de fibre ne se superposent pas en sortie est plus important.
De la même manière, une fibre monomode a un cœur très petit et les débits autorisés sont encore meilleurs.

Cap vers LE SUPÉRIEUR

Les exercices « Cap vers le supérieur » font appel à des compétences non exigibles en T^{erm} S : ils ont pour objectif de préparer aux études supérieures.

- 4.** Dans le manuel élève a été rajoutée la donnée suivante : la masse molaire de l'acétate d'isoamyle, $M = 130 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.
a. L'espèce chimique à odeur de banane appartient à la classe fonctionnelle des esters et possède un groupe caractéristique :

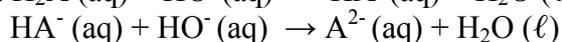
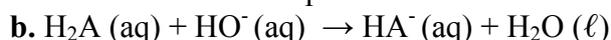


- b.** La réaction envisagée est une substitution.
c. L'alcool isoamylique et l'acide acétique sont les réactifs, l'APTS est un catalyseur. L'acide acétique est en très large excès ($n_{\text{acide}} = 5,3 \times 10^{-1} \text{ mol}$) et joue aussi le rôle de solvant.
d. Le réactif limitant est l'alcool isoamylique ($n_{\text{alcool}} = 9,2 \times 10^{-2} \text{ mol}$).
e. Après ajout d'eau, dans la phase organique, il y a l'alcool isoamylique n'ayant pas réagi et l'acétate d'isoamyle ; en phase aqueuse, il y a l'acide acétique. L'APTS (sous forme acide) est plus soluble en phase organique. En milieu acide, une partie de l'acide acétique est soluble en phase organique.
f. La phase aqueuse éliminée est acide.
g. L'étape de lavage avec une solution basique de carbonate de sodium, permet d'éliminer l'excès d'acide acétique et d'APTS utilisé lors de la réaction. En effet, les ions paratoluènesulfonate et acétate formés par réaction acide-base sont solubles dans l'eau et passent en phase aqueuse. On effectue un dernier lavage à l'eau pour s'assurer que la phase aqueuse finale est bien neutre. On a ainsi éliminé toute trace d'acides par lavage, d'où le terme de « lavage à neutralité ».

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Thème 3. Exercices de fin de thème

- h.** Le dégagement gazeux observé est du dioxyde de carbone produit par réaction acide-base entre les ions carbonate (CO_3^{2-}) et les acides organiques présents.
- i.** Il faut sécher la phase organique pour éliminer toute trace d'eau présente en phase organique.
- j.** La synthèse a permis de synthétiser $n_{\text{obtenu}} = 5,9 \times 10^{-2}$ mol d'ester. Le rendement calculé par rapport à l'alcool est alors de 64 %.
- k.** La valeur de l'indice de réfraction mesuré est en bon accord avec celui tabulé. On peut donc estimer que le produit synthétisé est pur et n'a donc pas besoin de purification.
- l.** Le spectre IR de l'acétate d'isoamyle permet de mettre en évidence deux bandes caractéristiques : une large bande située entre 2 700 et 2 960 cm^{-1} caractéristique des liaisons C-H, une bande fine vers 1 740 cm^{-1} caractéristique de la liaison C=O pour une classe fonctionnelle ester.

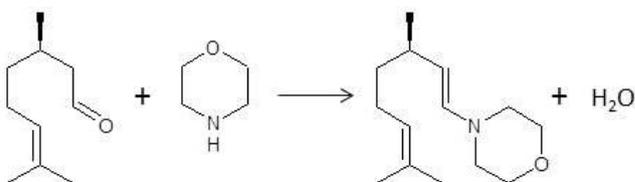
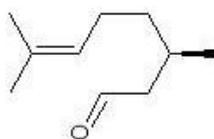
5. a. Il a deux sauts de pH successifs.



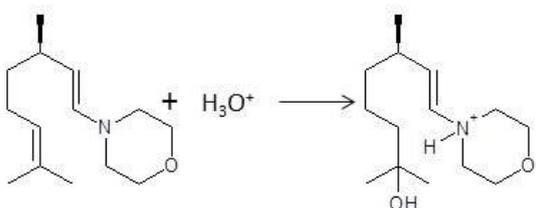
c. À la première équivalence, tout H_2A est transformé en HA^- . Il faudra donc autant d'ions HO^- pour titrer HA^- à la deuxième équivalence qu'il en a fallu pour titrer H_2A à la première équivalence.

d. Les indicateurs utilisés sont adaptés à ce titrage car leurs zones de virage sont comprises dans les zones de saut de pH.

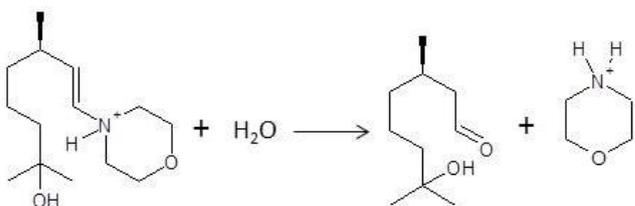
6. a. Citronellal ou 3,7-diméthyl-6-oct-2-énoal :



Cette équation correspond à la première étape du protocole.



Cette équation correspond à la deuxième étape du protocole.



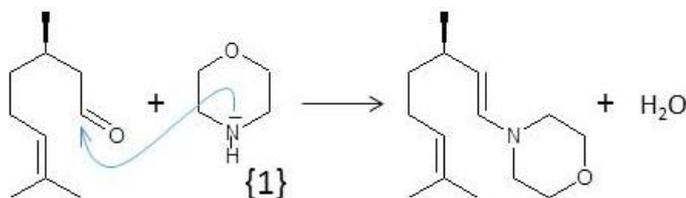
Cette équation correspond à la troisième étape du protocole.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Thème 3. Exercices de fin de thème

b. Parmi ces étapes, la première ci-dessus est une étape de protection, la troisième correspond à la déprotection.

c. Le groupe carbonyle est protégé.

d.



e. Les réactifs sont :

$$\text{- citronellal : } n = \frac{m}{M} = \frac{2,415}{154} = 15,7 \text{ mmol ;}$$

$$\text{- morpholine : } n = \frac{\rho V}{M} = \frac{0,999 \times 1,65}{87} = 18,9 \text{ mmol.}$$

Les autres espèces sont en excès, c'est donc le citronellal qui est le réactif limitant.

On recueille une quantité de produit :

$$n = \frac{m}{M} = \frac{2,56}{(154+18)} = 14,9 \text{ mmol soit un rendement } r = 95 \%$$

f. Cette synthèse utilise des solvants organiques, elle fait intervenir un grand nombre d'atomes qui ne se retrouvent pas dans le produit.

g. Le spectre IR fait apparaître une bande fine et forte à $1\,700 \text{ cm}^{-1}$ qui trahit la présence de C=O et une bande large et forte à $3\,400 \text{ cm}^{-1}$ qui trahit la présence de OH.

Le spectre est compatible avec le produit attendu.

Les deux sujets suivants ont pour objectif de donner un exemple de sujet ECE (nouvelle épreuve d'ECE 2013) et de préparer l'élève à la réalisation et à la rédaction de cette épreuve.

Sujet ECE 1

Travail à effectuer

a. - Diluer la solution de peroxyde d'hydrogène, de concentration $c_p = 1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 10 fois (pour des raisons de sécurité).

À l'aide d'une pipette jaugée de 10,0 mL, prélever un échantillon de volume $V_p = 10,0 \text{ mL}$ de la solution S_p . L'introduire dans une fiole jaugée de volume 100,0 mL. Compléter avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. Boucher et agiter.

À la fin de cette partie, la solution de peroxyde d'hydrogène a une concentration :

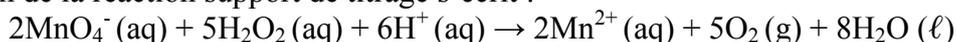
$$c_0 \approx \frac{c_p}{10} = 0,1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

On choisit arbitrairement de prélever avec une pipette jaugée un échantillon à titrer de volume : $V_0 = 10,0 \text{ mL}$.

- Préparer la burette graduée. La solution titrante est introduite dans une burette graduée de 25 mL, la valeur du volume à l'équivalence doit être comprise entre 0 et 25,0 mL.

On choisit arbitrairement $V_e = 10,0 \text{ mL}$ afin de choisir la concentration c de la solution titrante.

L'équation de la réaction support de titrage s'écrit :



À l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques, on peut donc écrire :

$$\frac{n_{\text{H}_2\text{O}_2, \text{i}}}{5} = \frac{n_{\text{MnO}_4^-, \text{e}}}{2}$$

$$\frac{c_0 V_0}{5} = \frac{c V_e}{2}$$

$$c = \frac{2}{5} \times \frac{c_0 V_0}{V_e}$$

$$c = \frac{2}{5} \times \frac{0,1 \times 10,0 \times 10^{-3}}{10,0 \times 10^{-3}} = 4 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

On choisit donc la solution de concentration de permanganate de potassium la plus proche soit

$$c = 2,00 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

- Réaliser le titrage. $V_e = 17,7 \text{ mL}$. En utilisant a., on obtient :

$$c_0 = \frac{5}{2} \times \frac{c V_e}{V_0}$$

$$c_0 = \frac{5}{2} \times \frac{2,00 \times 10^{-2} \times 17,7 \times 10^{-3}}{10,0 \times 10^{-3}} = 8,85 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

b. $c_p = 10 \times c_0 = 8,85 \times 10^{-1} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

c. Il y a une incertitude sur c , sur V_e et sur V_0 . Donc une incertitude sur c_p puis sur c_0 .

Réponses aux questions

1. - Une éprouvette graduée ne sera pas assez précise pour prélever un échantillon de volume 10,0 mL. Il faut utiliser une pipette jaugée de 10,0 mL.

- À la fin de la manipulation, il faut une solution homogène, il faut donc boucher et agiter.

À la fin de cette partie, la solution de peroxyde d'hydrogène a une concentration :

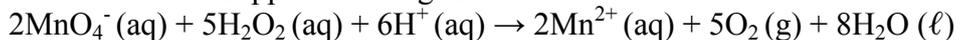
$$c_0 \approx \frac{c_p}{10} = 0,1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

On choisit arbitrairement de prélever, avec une pipette jaugée, un échantillon à titrer de volume $V_0 = 10,0 \text{ mL}$.

2. - La solution titrante est introduite dans une burette graduée de 25 mL, la valeur du volume à l'équivalence doit être comprise entre 0 et 25,0 mL.

On choisit arbitrairement $V_e = 10,0 \text{ mL}$ afin de choisir la concentration c de la solution titrante.

- L'équation de la réaction support de titrage s'écrit :



- À l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques, on peut donc écrire :

$$\frac{n_{\text{H}_2\text{O}_2, \text{i}}}{5} = \frac{n_{\text{MnO}_4^-, \text{e}}}{2}$$

$$\frac{c_0 V_0}{5} = \frac{c V_e}{2}$$

$$c = \frac{2}{5} \times \frac{c_0 V_0}{V_e}$$

$$c = \frac{2}{5} \times \frac{0,1 \times 10,0 \times 10^{-3}}{10,0 \times 10^{-3}} = 4 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

On choisit donc la solution de concentration de permanganate de potassium la plus proche soit

$$c = 2,00 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

3. a. $V_e = 17,7 \text{ mL}$.

b. En utilisant le **2.**, on obtient :

$$c_0 = \frac{5}{2} \times \frac{c V_e}{V_0}$$

$$c_0 = \frac{5}{2} \times \frac{2,00 \times 10^{-2} \times 17,7 \times 10^{-3}}{10,0 \times 10^{-3}} = 8,85 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

c. $c_p = 10 \times c_0 = 8,85 \times 10^{-1} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

c. Il y a une incertitude sur c , sur V_e et sur V_0 . Donc une incertitude sur c_p puis sur c_0 .

Sujet ECE 2

Cet exercice est également proposé dans l'exercice ECE 28 page 70 du chapitre 3.

Le fichier image indiqué dans l'énoncé est disponible sur le site élève :

www.nathan.fr/siriuslycee/eleve-termS

Les fiches techniques des logiciels sont à fournir au candidat. Elles sont données ci-après mais sont également disponibles sur le site élève avec l'exercice. Deux exemples de fiche technique sont données ici : une pour le logiciel de traitement d'image SalsaJ et l'autre pour le logiciel de traitement de données Regressi.

FICHE TECHNIQUE DU LOGICIEL SALSAJ (TRAITEMENT D'IMAGES)

- Pour lancer SalsaJ

Cliquer l'icône de raccourci « SalsaJ » :



- Quelques boutons et fonctions associées



Ouvrir un
fichier image



Annuler la dernière
opération



Tracer un trait



Zoom
avant/arrière

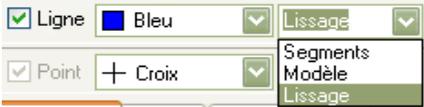


Déplacement
dans le cadre
de l'image

- Pour ouvrir un fichier image
 - 1) Effectuer « Fichier » puis « Ouvrir » ou cliquer sur le bouton adapté (voir tableau ci-dessus).
 - 2) Rechercher le fichier en se déplaçant dans l'arborescence.
 - 3) Cliquer sur le fichier désiré puis « Ouvrir ».
- Pour étalonner l'échelle d'une image
 - 1) Tracer un trait entre deux points séparés d'une distance connue. Pour cela, cliquer sur le bouton adapté (voir tableau ci-dessus) puis cliquer et glisser entre les deux points. Penser à utiliser le zoom avant (voir tableau ci-dessus) au préalable pour gagner en précision.
 - 2) Dans la barre de menu du logiciel, cliquer « Analyse » et « Indiquer l'échelle... ».
 - 3) Compléter ou modifier les informations dans la fenêtre qui apparaît, cocher « Global » puis cliquer « OUI ».
- Pour obtenir le graphe donnant l'intensité des pixels d'une image le long d'une ligne
 - 1) Tracer un trait le long de la ligne désiré. Pour cela, cliquer sur le bouton adapté (voir tableau ci-dessus) puis cliquer et glisser entre les deux points. Penser à utiliser le zoom avant (voir tableau ci-dessus) au préalable pour gagner en précision.
 - 2) Dans la barre de menu du logiciel, cliquer « Analyse » et « Coupe ».
 - 3) Déplacer le pointeur sur le graphe qui apparaît pour accéder au coordonnées des points.
 - 4) Cliquer le bouton « Liste » dans la fenêtre du graphique permet d'accéder aux coordonnées de chaque pixel de la ligne tracée.

Remarque : la valeur de l'abscisse tient compte de l'étalonnage de l'échelle de l'image si celui-ci a été réalisé au préalable.

FICHE TECHNIQUE DU LOGICIEL *REGRESSI* (TRAITEMENT DE DONNEES)

- Pour lancer *Regressi*
Cliquer l'icône de raccourci « *Regressi* » : 
- Pour préparer un tableau de données saisies au clavier
 - 1) Effectuer « Fichier » puis « Nouveau » et « Clavier »
 - 2) Renseigner chaque ligne de la fenêtre qui apparaît :
 - nom des grandeurs, dont les valeurs seront saisies au clavier ;
 - unité. Choisir celle du système international et pas un sous multiple. Exemple : m et non km ;Remarque : les lettres grecs sont accessibles par la touche Ctrl.
Exemple : Ctrl + Maj + w permet d'écrire Ω .
 - ne pas indiquer de minimum et de maximum.
 - 3) Cliquer « OK » une fois le nom de chaque grandeur et unité bien définies.
 - 4) Saisir les valeurs au clavier. La puissance de 10 se note « E ». Exemple : pour $2,0 \times 10^{-3}$, taper « 2E-3 ».
- Pour créer une grandeur
 - 1) Dans la fenêtre du tableur, cliquer sur l'icône « Y+ ».
 - 2) Choisir le type de grandeur (expérimentale, calculée, dérivée...) puis entrer le nom de la grandeur et son unité, pas de commentaire sauf si cela est demandé.
 - 3) Entrer la formule permettant le calcul de la nouvelle grandeur (la puissance de 10 se note "E"). Valider.
- Pour supprimer ou modifier l'expression d'une grandeur créée
 - 1) Dans la fenêtre du tableur, mettre l'intercalaire « Expressions » au premier plan.
 - 2) Supprimer ou modifier l'expression de la grandeur.
 - 3) Effectuer une mise à jour en cliquant sur l'icône  qui clignote.
- Pour afficher une courbe
 - 1) Dans la fenêtre du grapheur, cliquer sur l'icône « Coordonnées ». 
 - 2) Choisir la grandeur à placer en abscisse puis la grandeur à placer en ordonnée.
Cliquer sur  si plusieurs grandeurs doivent être en ordonnée.
 - 3) Choisir le type de tracé (points et/ou lignes : segments, modèle, lissage) et valider. 
- Pour modéliser une courbe
 - 1) Dans la fenêtre du grapheur, afficher uniquement la courbe à modéliser
 - 2) Cliquer sur l'icône « Modélisation » (icône ci-contre) pour ouvrir l'encadré destiné à saisir l'expression du modèle.
 - 3) Il y a alors deux possibilités :
 - 1^{re} possibilité : dans l'encadré blanc de la fenêtre de modélisation qui apparaît, saisir au clavier l'expression du modèle. Effectuer une mise à jour en cliquant sur l'icône  qui clignote ;
 - 2^e possibilité : dans la fenêtre de modélisation qui apparaît, cliquer sur l'icône « Modèle prédéfini » et choisir parmi les neuf modèles proposés celui qui convient le mieux à la courbe que l'on souhaite modéliser puis valider.
 - 4) Ajuster.

5) Les paramètres de la modélisation apparaissent (expression du modèle, valeurs numériques des coefficients, erreurs...).

- Pour accéder aux coordonnées d'un point du graphe

Dans la fenêtre du grapheur, cliquer sur la flèche  « Outils gr. » en haut à gauche pour dérouler le menu « Outils graphiques » ou « Curdeur » et choisir  Réticule .
Les coordonnées du curseur sont indiquées en bas à gauche de la fenêtre graphique.

Remarques

Pour affiner le déplacement, appuyer sur les flèches du clavier plutôt que de déplacer la souris.

Pour accéder à l'écart horizontal (de durée par exemple, si l'axe des abscisses est un axe des temps t) entre deux points, cliquer sur le point de départ, et sans relâcher la pression sur le clic gauche de la souris, aller jusqu'au deuxième point. Sans relâcher la pression, lire l'écart en bas à gauche de la fenêtre graphique (exemples : « $\delta t = \dots$ » ou « $\Delta t = \dots$ »).

Résultats du travail à effectuer par le candidat

1. a. Protocole 1

Lancer le logiciel de traitement d'images *SalsaJ* puis ouvrir le fichier contenant l'image du spectre présenté dans les documents au format jpeg. Agrandir la fenêtre.

Étalonner l'échelle du spectre d'Hydra en utilisant les raies de longueurs d'onde connues. Pour gagner en précision, penser à utiliser les raies les plus éloignées : ici, a et g avec :

$$\lambda_g - \lambda_a = 112,7 \text{ nm}$$

Mesurer le décalage Doppler $\Delta\lambda$ de longueur d'onde de la raie H. Pour cela, obtenir le graphe donnant l'intensité lumineuse de chaque pixel le long d'une ligne passant par-dessus la flèche matérialisant ce décalage et l'utiliser pour déterminer la longueur de cette flèche.

En déduire les valeurs de $\lambda' = \lambda + \Delta\lambda$ (avec $\lambda = 396,85 \text{ nm}$ d'après l'énoncé) et $v = \frac{c\Delta\lambda}{\lambda}$.

b. $\lambda' = \lambda + \Delta\lambda = 396,85 + 83 = 469,85 \text{ nm}$.

c. Vitesse v de la récession d'Hydra :

$$v = \frac{c\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{3,00 \times 10^8 \times 83 \times 10^9}{396,85 \times 10^9} = 6,3 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

2. a. Protocole 2

Renouveler le protocole 1 dans le cas des quatre autres galaxies.

Consigner les résultats dans le tableau.

Utiliser le logiciel de traitement de données pour tracer la courbe $v = f(D)$ et la modéliser.

b. Résultats obtenus après la mise en œuvre du protocole :

Galaxie	Hydra	Bootes	Corona Boréalis	Ursa Major	Virgo
$D \text{ (m)}$	$2,4 \times 10^{25}$	$1,4 \times 10^{25}$	$1,0 \times 10^{25}$	$4,5 \times 10^{24}$	$1,3 \times 10^{24}$
$v \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	$6,3 \times 10^7$	$4,0 \times 10^7$	$2,5 \times 10^7$	$1,7 \times 10^7$	$0,4 \times 10^7$
NB : valeurs de $\Delta\lambda$	83 nm	53 nm	33 nm	22 nm	5 nm

v en ordonnée et D en abscisse. $v = H_0 \times D$.

c. Le modèle convient. L'écart relatif est de 7,4 %. Il est inférieur à 15 %.

$$H_0 = (2,69 \pm 0,27) \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$$

D'après le document, $H_0 = 77 \text{ (km/s)/Mpc}$ avec une incertitude de 15 %.

Dans le système d'unité international :

$$H_0 = \frac{77 \times 10^3}{3,086 \times 10^{16} \times 10^6} = 2,5 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1} \text{ avec une incertitude de 15 \%}$$

ce qui signifie que : $2,1 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1} \leq H_0 \leq 2,9 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$

La valeur que nous avons obtenue appartient à cet encadrement. Elle est donc compatible avec la valeur de la constante Hubble du texte introductif.

FICHE D'ÉVALUATION

Compétences expérimentales	Exemples de compétences contextualisées	Question	Évaluation A, B, C ou D
S'approprier	Extraire et exploiter les informations présentes dans l'énoncé du sujet afin de comprendre les objectifs fixés	2.c.	
Analyser	Concevoir un protocole	1.a.* et 1.b.*	
Réaliser	Suivre un protocole, utiliser le matériel (dont l'outil informatique) de manière adaptée, effectuer des mesures avec précision (zoom, pointage précis...)	Mise en œuvre des protocoles	
Valider	Exploiter des résultats expérimentaux et valider le choix du modèle, commenter, porter un jugement critique sur le résultat de la mesure de H_0	1.b., 1.c., 2.b. et 2.c.	
Communiquer	Utiliser les notions et le vocabulaire scientifique adaptés, présenter et formuler une argumentation de manière cohérente complète et compréhensible	Cette compétence est transversale : elle est mobilisée sur l'ensemble de l'épreuve sans être nécessairement évaluée	
Être autonome et faire preuve d'initiative	Travailler seul avec discernement et responsabilité, prendre des initiatives, demander une aide pertinente	Cette compétence est transversale : elle est mobilisée sur l'ensemble de l'épreuve en participant à la définition du niveau de maîtrise des autres compétences	

Niveau A : le candidat a réalisé l'ensemble du travail demandé de manière satisfaisante selon les critères précisés dans le sujet ou avec une ou deux interventions de l'examineur, concernant des difficultés identifiées et explicitées par le candidat et auxquelles il apporte une réponse quasiment de lui-même.

Niveau B : le candidat a réalisé l'ensemble du travail demandé de manière satisfaisante selon les critères précisés dans le sujet mais avec quelques interventions de l'examineur concernant des difficultés ou erreurs non identifiées par le candidat mais résolues par celui-ci :

- après avoir réfléchi suite à un questionnement ouvert mené par l'examineur ;
- ou par l'apport d'une solution partielle dans le cas d'une compétence affectée d'un fort coefficient.

Niveau C : le candidat reste bloqué dans l'avancement de la tâche demandée, malgré les questions posées par l'examineur. Des éléments de solutions lui sont apportés, ce qui lui permet de poursuivre la tâche.

Niveau D : le candidat a été incapable de réaliser la tâche demandée malgré les éléments de réponses apportés par l'examineur. Cette situation conduit l'examineur à fournir une solution complète de la tâche : par exemple un protocole à réaliser ou des valeurs à exploiter pour permettre l'évaluation des autres compétences du sujet.

Exercices Objectif BAC

Les exercices suivants sont des exercices de type BAC (nouveau BAC 2013) et ont pour objectif de préparer l'épreuve écrite.

1 Dans le manuel élève a été corrigé, par rapport au spécimen, l'unité de volume « hm^3 » à la 5^e ligne du Doc 1 (au lieu de « cm^3 »).

Intérêt de l'astronomie infrarouge pour l'étude des nuages interstellaires

Le document doit faire apparaître les notions suivantes. Les expressions surlignées doivent obligatoirement être citées sous une forme équivalente.

Les nuages de poussières créent des zones obscures en lumière visible à cause de la diffusion et de l'absorption.

- Les poussières renvoient la lumière dans toutes les directions. C'est la diffusion.
- L'importance de la diffusion diminue lorsque la longueur d'onde augmente. Par suite, les rayonnements infrarouges sont moins fortement diffusés.

Il en résulte que les nuages de poussières peuvent être transparents dans certains domaines du rayonnement infrarouge, ce qui permet d'observer des objets cachés par les nuages.

- L'énergie lumineuse des étoiles voisines est transformée en énergie thermique. C'est l'absorption.

- Grâce à cette énergie thermique, les nuages émettent un rayonnement thermique. La température d'un nuage de poussières est très basse et ce rayonnement thermique n'est intense que dans le domaine infrarouge.

Par suite, on peut étudier la structure d'un nuage en l'observant en infrarouge.

Commentaire du document 3

Sur la photographie B, on aperçoit un grand nombre d'étoiles qui n'apparaissent pas sur la photographie A.

On attend surtout que l'explication suivante soit proposée : le rayonnement infrarouge étant faiblement diffusé, on voit sur la photographie B de nombreuses étoiles qui, en lumière visible (photographie A) sont dissimulées par les nuages de poussières.

On appréciera que l'argument suivant soit en plus mentionné : des étoiles trop froides pour émettre dans le visible peuvent apparaître dans ce domaine de rayonnement.

On remarque que, sur les photographies B, C et D, le nuage est de plus en plus brillant alors que la longueur d'onde d'observation augmente.

Sur la photographie B, le nuage est peu visible parce que sa température est très basse et le rayonnement thermique qu'il émet dans ce domaine est encore très faible.

Sur les photographies C et D, le rayonnement thermique devient intense dans le domaine de rayonnement étudié. Le nuage est très brillant sur la photographie D, ce qui indique que le nuage y est photographié dans un domaine de longueur d'onde voisin de son maximum d'émission.

2 Voici les modifications apportées dans le manuel élève par rapport au spécimen :

- la deuxième problématique a été supprimée ;
- Doc 2 et 3 : les deux points A et B sont ajoutés tel que $AB = D$;
- Doc 2, 2^e figure : il est précisé que la valeur de la sensibilité verticale est valable pour les voies 1 et 2 ;
- Doc 3, 2^e figure : le signal de la voie 1 est une sinusoïde et sa période vaut 5 divisions sur la figure ;
- Partie C : « de chaque propagation » remplace « des différentes étapes » à la question 2 et « $3,6 \times 10^4$ » remplace « 36 000 km » à la question 3.

Partie A. - Une onde mécanique progressive est le phénomène de propagation d'une perturbation sans transport de matière, mais avec transport d'énergie.

- Mesure de la célérité du son dans le fil :

Première méthode

Détermination du retard τ : le retard correspond à 4 divisions, pour une sensibilité de 5 ms/div donc $\tau = 5 \times 4 = 20$ ms.

$$\text{Calcul de la célérité } v : v = \frac{D}{\tau} = \frac{20}{20 \times 10^{-3}} = 1 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Deuxième méthode

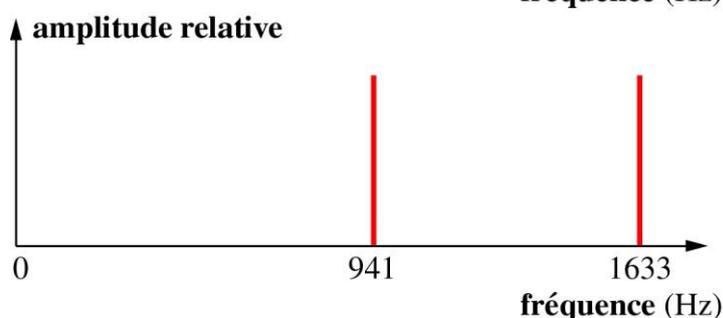
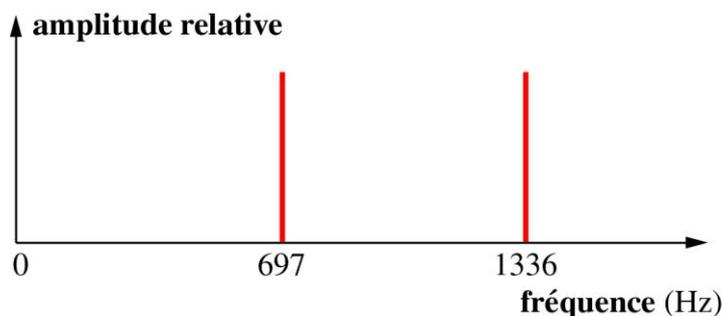
Période de l'onde qui se propage dans le fil : la période correspond à 5 divisions, pour une sensibilité de 1ms/div donc $T = 1 \times 5 = 5$ ms.

Calcul de la célérité v de cette onde : l'onde est sinusoïdale donc,

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{5,0}{5 \times 10^{-3}} = 1 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Partie B. - Les signaux électriques correspondent à la somme de deux sinusoïdes de même amplitude et de fréquence différente.

- Allure des spectres correspondant aux touches 2 et D :



© CORÉDOC. NATHAN 2012

Partie C.

1. Chaîne de transmission :



2. Le signal transmis est un signal électromagnétique. La propagation est guidée dans les câbles de télécommunication et libre dans l'air ou le vide.

3. Contrairement aux satellites à défilement, les satellites géostationnaires sont fixes dans le référentiel terrestre, on connaît leur position : les signaux électromagnétiques peuvent donc être envoyés dans leur direction.

La durée minimale ne tenant compte que de l'aller-retour de l'onde électromagnétique est :

$$\Delta t = \frac{2D}{c} = \frac{2 \times 3,6 \times 10^4}{3 \times 10^8} = 0,24 \text{ s}$$

3 1. a. Les cuvettes sont situées dans le polycarbonate.

b. L'intérêt est qu'elles sont ainsi protégées des rayures et des poussières. Elles sont en effet très peu profondes et seraient très vite abimées si elles étaient à l'extérieur.

c. Les plats et les cuvettes du CD se déplacent à vitesse constante devant le laser. On peut donc utiliser la relation $d = v\Delta t$:

$$d = 1,2 \times 231,4 \times 10^{-9} = 2,8 \times 10^{-7} \text{ m} = 0,28 \text{ }\mu\text{m}$$

d. Dans le polycarbonate, les ondes électromagnétiques se déplacent moins vite que dans le vide. La longueur d'onde est donc plus courte :

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} = \frac{780}{1,55} = 503 \text{ nm}$$

2. a. Les ondes qui se réfléchissent sur le plat et les ondes qui se réfléchissent sur le fond d'une cuvette sont cohérentes et peuvent interférer. Si l'éclairement est minimal, c'est que les interférences sont destructives.

b. La lumière faisant un aller-retour, la différence de marche est égale à $2e$.

c. La plus petite profondeur correspond à la plus petite différence de marche qui donne des interférences destructives.

$$\delta = \frac{(2k + 1)\lambda}{2} \text{ est minimale pour } k = 0$$

$$2e = \frac{\lambda}{2}$$

$$e = \frac{\lambda}{4} = 126 \text{ nm} = 0,126 \text{ }\mu\text{m}$$

d. L'éclairement de la photodiode n'est pas nul car les deux faisceaux qui interfèrent n'ont pas la même intensité. La partie du faisceau qui se réfléchit sur le plat est plus importante que celle qui se réfléchit sur le fond de la cuvette.

4 Voici les modifications apportées dans le manuel élève :

- Partie B, légende du Doc 2 : les masses ne sont plus numérotées, et les variables « x » sont désormais toutes nommées « x_0 » ;

- Partie B, titre du Doc 3 : « Ressort lié à deux objets » (au lieu de « Généralisation »).

- Partie C, données : la masse molaire de l'azote a été ajoutée, $M(\text{N}) = 14,0 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$;

- Partie C, question 2. c. : la question est désormais formulée de la manière suivante « Comment expliquer que la chaîne carbonée reliée à l'atome d'oxygène n'ait quasiment aucun effet sur la position de la bande caractéristique de la liaison O-H d'un alcool en phase gazeuse ($3\ 600 \text{ cm}^{-1}$) ? ».

Partie A. a. Calculons l'allongement x et le rapport $\frac{x}{m}$ pour chacun des deux ressorts :

Ressort 1

m (g)	10	20	30	40
l_{eq} (cm)	3,8	4,6	5,4	6,2
$x = l_{eq} - l_0$ (cm)	0,8	1,6	2,4	3,2
$\frac{x}{m}$ (cm·g ⁻¹)	0,08	0,080	0,080	0,080

Ressort 2

m (g)	10	20	30	40
l_{eq} (cm)	3,2	3,4	3,6	3,8
$x = l_{eq} - l_0$ (cm)	0,2	0,4	0,6	0,8
$\frac{x}{m}$ (cm·g ⁻¹)	0,02	0,02	0,02	0,02

On vérifie donc bien que pour chaque ressort, le rapport $\frac{x}{m}$ est constant : l'allongement x est proportionnel à la masse m .

b. Le coefficient de proportionnalité entre x , m , $\frac{g}{k}$, a pour unité SI le m·kg⁻¹.

Puisque g , le champ de pesanteur, s'exprime lui-même en N·kg⁻¹, on en déduit que $k (= \frac{mg}{x})$ s'exprime lui-même en N·m⁻¹.

c. Le coefficient de proportionnalité correspondant au ressort 2 est quatre fois plus faible que pour le ressort 1. Puisque le champ de pesanteur est constant, c'est nécessairement que la constante de raideur du ressort 2 est quatre fois plus grande que celle du ressort 1 :

$$\frac{g}{k_1} = 4 \times \frac{g}{k_2} \text{ équivaut à } k_2 = 4k_1 \text{ (0,08 = 4 \times 0,02)}$$

Remarque : on peut calculer les valeurs numériques des constantes de raideur, mais les arrondis ne jouent pas en notre faveur...

$$k_1 = \frac{9,8}{\frac{0,080 \times 10^{-2}}{10^{-3}}} = 12 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$k_2 = \frac{9,8}{\frac{0,02 \times 10^{-2}}{10^{-3}}} = 49 \text{ (} 5 \times 10^1 \text{ avec un seul CS) N} \cdot \text{m}^{-1}$$

Partie B. 1^{er} bloc de questions

a. Si on compare les graphiques des expériences 1 et 3 d'une part, 4 et 5 d'autre part (on souhaite que seul le paramètre masse varie), on constate dans les deux cas que la période des oscillations augmente lorsque la masse augmente. On peut préciser que lorsque la masse quadruple, la période double :

$$T_3 = 2T_1 = 0,36 \text{ s} \quad \text{et} \quad T_5 = 2T_4 = 0,18 \text{ s}$$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Fin de thèmes et objectifs bac

b. Si on compare désormais les graphiques des expériences 1 et 4 d'une part, 3 et 5 d'autre part, on constate que la période des oscillations diminue lorsque la constante de raideur augmente. On peut préciser que lorsque la constante de raideur quadruple, la période est divisée par deux :

$$T_4 = \frac{T_1}{2} = 0,09 \text{ s} \quad \text{et} \quad T_5 = \frac{T_3}{2} = 0,18 \text{ s}$$

c. Entre les deux expériences 1 et 2, seule l'élongation initiale change. Si l'amplitude des oscillations est directement affectée par ce facteur, on constate que la période des oscillations est strictement la même :

$$T_1 = T_2 = 0,18 \text{ s}$$

d. Par analyse dimensionnelle :

$$\dim T = \dim m^\alpha \times \dim k^\beta \quad (\text{puisque } c \text{ est sans dimension})$$

Or : $\dim T = T$; $\dim m = M$ et $\dim k = \frac{\dim(\text{force})}{L} = \text{MLT}^{-2}\text{L}^{-1} = \text{MT}^{-2}$

On extrait de l'équation $T = M^\alpha \times (\text{MT}^{-2})^\beta$ le système suivant :

$$1 = -2\beta \quad \text{et} \quad 0 = \alpha + \beta$$

d'où :
$$\alpha = -\beta = +\frac{1}{2}$$

e. $T = c\sqrt{\frac{m}{k}}$ avec c constante : on retrouve bien que quadrupler la masse revient à doubler la période, et que quadrupler la constante de raideur revient à diviser par deux la période.

Partie B. 2^e bloc de questions.

a. Lorsque $m_1 = m_2 = m$, on trouve que $\mu = \frac{m^2}{m+m} = \frac{m}{2}$: la masse réduite correspond donc à la moitié de chacune des masses.

b. Lorsque $m_1 \ll m_2$, on trouve que $\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \approx \frac{m_1 m_2}{m_2} = m_1$: la masse réduite correspond donc à la masse négligeable.

Partie C. 1. a. Par définition, $\sigma = \frac{1}{\lambda}$. Par ailleurs, on sait que pour une onde électromagnétique :

$$\lambda = cT$$

c étant la célérité de l'onde électromagnétique (de la lumière) dans le vide : $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

b. On en déduit donc que :

$$\sigma = \frac{1}{cT}$$

c. Puisque la période de l'onde électromagnétique doit coïncider avec celle des oscillations libres de la liaison, on en déduit que :

$$\sigma = \frac{1}{cT} = \frac{1}{2\pi c} \times \sqrt{\frac{k}{\mu}}$$

et donc :

$$k = \mu \times 4\pi^2 \sigma^2 c^2$$

Pour la molécule de monoxyde de carbone, on peut calculer la masse réduite :

$$\mu = \frac{m(\text{C}) \times m(\text{O})}{m(\text{C}) + m(\text{O})}$$

$$\mu = \frac{M(\text{C})}{N_A} \times \frac{\frac{M(\text{O})}{N_A}}{\frac{M(\text{C})}{N_A} + \frac{M(\text{O})}{N_A}} = \frac{M(\text{C}) \times M(\text{O})}{N_A \times (M(\text{C}) + M(\text{O}))}$$

A.N. :
$$\mu = \frac{12,0 \times 16,0}{6,02 \times 10^{23} \times (12,0 + 16,0)} = 1,14 \times 10^{-23} \text{ g} = 1,14 \times 10^{-26} \text{ kg}$$

On en déduit donc : $k = 1,14 \times 10^{-26} \times 4\pi^2 \times (2170 \times 10^2)^2 \times (3,0 \times 10^8)^2 = 1,91 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$

2. a. Dans la masse réduite n'intervient *a priori* que la masse de chaque atome de la liaison impliquée, et pas le reste de la molécule.

b. L'argument précédemment utilisé n'est rigoureusement utilisable que pour une espèce diatomique. Pour les espèces polyatomiques, les masses du (ou des) groupe(s) d'atomes lié(s) à chaque atome interviennent en fait (un peu) dans la masse réduite de la liaison étudiée. Ainsi, pour une molécule de la classe fonctionnelle des aldéhydes, l'atome de carbone du groupe fonctionnel n'est lié qu'à une seule chaîne alkyle, tandis que pour une cétone, le même atome de carbone est lié à deux chaînes alkyle. Il en résulte, en général, une masse réduite « équivalente » plus grande pour l'atome de carbone de la liaison C=O d'une cétone, et donc :

$$\mu(\text{CO}_{\text{cétone}}) = \frac{1}{\frac{1}{m(\text{O})} + \frac{1}{m(\text{C}_{\text{cétone}})}} > \frac{1}{\frac{1}{m(\text{O})} + \frac{1}{M(\text{C}_{\text{aldéhyde}})}} = \mu(\text{CO}_{\text{aldéhyde}})$$

Si l'on suppose désormais que la force de la liaison chimique, donc $k_{\text{C=O}}$ reste sensiblement le même, on en déduit :

$$T(\text{CO}_{\text{cétone}}) > T(\text{CO}_{\text{aldéhyde}}) \text{ et donc } \sigma(\text{CO}_{\text{cétone}}) < \sigma(\text{CO}_{\text{aldéhyde}})$$

c. Dans le cas d'une liaison O-H (ou C-H ou N-H), puisque $m(\text{H}) \ll m(\text{O})$ (approximation d'autant meilleure que l'atome d'oxygène est en plus lié à une chaîne alkyle), alors :

$$\mu(\text{O-H}) \approx m(\text{H}) \quad (\text{cf. B. 2}^{\text{ème}} \text{ partie, question b.})$$

Quel que soit le groupe alkyle lié à l'atome d'oxygène, la masse réduite du système se réduit à la masse de l'atome d'hydrogène. Puisque par ailleurs, la force de la liaison étudiée est toujours la même, on en déduit que la période, et donc le nombre d'onde caractéristique de l'absorption de cette liaison ne dépend quasiment pas de l'alcool.

3. a. Désormais, les deux atomes engagés dans la liaison ont tous, en première approximation, une masse équivalente :

$$m(\text{O}) \approx m(\text{C}) \approx m(\text{N})$$

Dans tous les cas :

$$\mu \approx \frac{m(\text{N})}{2} \quad (\text{l'azote étant de masse intermédiaire entre l'oxygène et le carbone})$$

b. Le seul paramètre qui varie significativement entre les trois séries de valeurs est la multiplicité de la liaison. Puisque la masse réduite est la même, c'est donc que le facteur qui varie ici est la force de la liaison. On en déduit donc que cette dernière évolue directement avec la multiplicité de la liaison.

c. On peut préciser les choses, puisque :

$$\sigma(\text{triple}) > \sigma(=) > \sigma(-), \text{ c'est que } T(\text{triple}) < T(=) < T(-)$$

Or $\mu \approx \text{cte}$, donc cette inégalité équivaut à :

$$k(\text{triple}) > k(=) > k(-)$$

Ce qui signifie donc que la force d'une triple liaison est plus importante que celle d'une double liaison, qui est elle-même plus importante que celle d'une simple liaison. Ceci est un résultat effectivement avéré (validé par l'expérience, notamment pas calorimétrie).

5 A. 1. Spectre de RMN du proton de la choline

La choline comporte quatre groupes de protons équivalents. Cependant, on repère seulement trois signaux sur son spectre de RMN. Il est probable que le signal du proton du groupe hydroxyle (souvent aplati et peu intense) n'apparaisse pas sur ce spectre.

Les 9 protons appartenant aux trois groupes méthyle $-\text{CH}_3$ sont équivalents et donnent le signal à 3,2 ppm : c'est en effet ce signal qui correspond au plus grand nombre de protons d'après la courbe d'intégration.

Le saut à 3,2 ppm est environ 4,5 fois plus grand que chacun des deux autres sauts de la courbe d'intégration à 3,5 ppm et 4,0 ppm.

Chacun des signaux à 3,5 ppm et 4,0 ppm correspondent donc à 4,5 fois moins de protons que le signal à 3,2 ppm (9 protons) : chacun des signaux à 3,5 et 4,0 ppm correspond donc aux deux protons de l'un des deux groupes $-\text{CH}_2-$ de la choline, mais il est difficile de les attribuer plus précisément.

Spectre de RMN du proton du lactate

Le spectre fait apparaître deux signaux : un doublet à 1,3 ppm, et un quadruplet à 4,2 ppm. D'après la courbe d'intégration, le signal à 1,3 ppm correspond à trois fois plus de protons que le signal à 4,2 ppm.

Or, sur la formule semi-développée du lactate, il apparaît trois groupes de protons équivalents : les trois protons (a) du groupe méthyle, le proton (b) lié au carbone central de la chaîne carbonée (à trois atomes de carbone) et le proton (c) lié au groupe hydroxyle. Les protons (a) et (b) sont voisins : les protons (a) apparaissent sous la forme d'un doublet (ils sont voisins du proton (b)) et le proton (b) apparaît sous forme d'un quadruplet (il a pour voisins les trois protons (a)).

Comme dans le spectre de la choline, le proton du groupe hydroxyle n'apparaît pas sur ce spectre.

On remarque aussi que les protons (a) ont un déplacement chimique bien inférieur à celui du proton (b), plus proche des atomes électro-négatifs (d'oxygène) de la molécule.

Spectre de RMN de la créatine

Le spectre de RMN fait apparaître deux signaux. Le signal à 3,0 ppm correspond à un saut de 2 cm sur la courbe d'intégration et celui à 4,0 ppm correspond à un saut de 1,3 cm. Le signal à 3,0 ppm correspond donc à 1,5 fois plus de protons que le signal à 4,0 ppm.

On en déduit que sur ce spectre, les protons directement liés à un atome d'azote n'apparaissent pas. Le signal à 3,0 ppm (singulet) correspond aux trois protons du groupe méthyle, et le signal à 4,0 ppm correspond aux deux protons du groupe $-\text{CH}_2-$.

2. La plupart des atomes d'hydrogène du cholestérol sont sur une chaîne carbonée analogue à celle d'un alcane, et éloignés d'atomes électro-négatifs. La table simplifiée de valeurs de déplacement chimique indique l'intervalle [0,8 ppm – 2,5 ppm] pour ce type de protons, et on observe effectivement que la majorité des signaux du cholestérol appartient à cet intervalle.

On repère également un autre signal ayant un déplacement chimique caractéristique : le triplet à 5,2 ppm correspond à un proton lié à une double liaison $\text{C}=\text{C}$. Et dans le cholestérol, il y a effectivement un (et un seul) atome d'hydrogène lié à la double liaison $\text{C}=\text{C}$ (et cet atome d'hydrogène a bien deux atomes d'hydrogène voisins).

B. 1. Sur le spectre du cerveau sain obtenu par SRM, chacune des espèces étudiées est repérée par un seul signal.

2. Spectre de la choline

Il fait apparaître trois signaux, mais l'un des trois correspond à beaucoup plus de protons que les autres (cf. courbe d'intégration) : le signal correspondant est donc beaucoup plus grand que les deux autres, et c'est lui qui est repéré sur un spectre du cerveau (à 3,2 ppm).

Spectre du lactate

C'est là encore le signal le plus grand (1,3 ppm) qui est repéré sur le spectre du cerveau.

Spectre de la créatine

C'est le signal le plus grand (à 3,0 ppm) qui est étudié dans le spectre du cerveau. Néanmoins, on peut aussi repérer le signal à 4,0 ppm, mais les médecins ne n'y intéressent pas.

3. Les lipides sont repérés par un massif vers 1,3 ppm. Le cholestérol présente bien un massif important autour de ce déplacement chimique, et c'est vraisemblablement le cas pour d'autres lipides.

4. Dans le spectre SRM du cerveau sain comme dans celui du cerveau atteint d'une tumeur, on observe un signal pour la créatine (3,0 ppm) et un signal pour la choline (3,2 ppm).

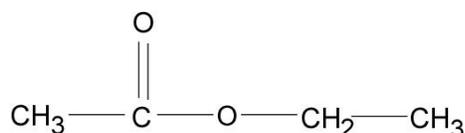
Dans le cerveau sain, le signal de la créatine est légèrement plus grand que celui de la choline, alors que dans le cerveau atteint, le signal de la choline est beaucoup plus grand. Or, d'après le document, la créatine sert de référence, sa concentration variant peu lors d'une pathologie, alors que la présence de la choline en concentration supérieure à la normale peut traduire « la prolifération de cellules membranaires dans le cas d'une tumeur ».

Cette comparaison des deux spectres confirme donc le diagnostic médical de suspicion de processus tumoral dans le cas du spectre de la fig. 6.

5. La SRM est une technique non invasive (pas de prélèvement) et non douloureuse, contrairement à la biopsie. Elle ne nécessite pas d'anesthésie.

Par rapport à l'IRM, la SRM peut apporter des informations complémentaires ; si une tumeur a été détectée par IRM, la SRM peut permettre d'avoir des précisions sur la nature de cette tumeur.

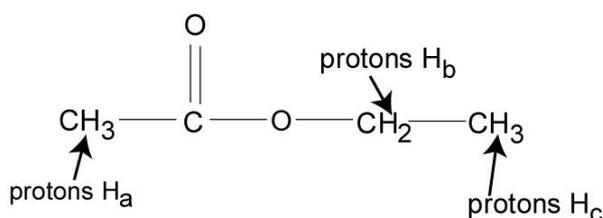
6 1. Formule semi-développée de l'éthanoate d'éthyle :



2. Le signal (a) est un singulet : il s'agit donc de protons n'ayant pas de protons voisins, ceux du groupe méthyle CH_3 - lié à l'atome de carbone du groupe caractéristique.

Le signal (b) est un quadruplet : il s'agit donc de protons ayant trois protons voisins ($4 - 1 = 3$). Les protons H_b sont donc les protons du groupe $-\text{CH}_2-$.

Le signal (c) est un triplet et correspond donc aux trois protons du groupe méthyle lié au $-\text{CH}_2-$ et ayant donc pour voisins les deux protons H_b .



3. a.

1 ^{er} noyau d'atome d'hydrogène voisin des atomes d'hydrogène H _c	↑	↓	↑	↓
2 ^e noyau d'atome d'hydrogène voisin des atomes d'hydrogène H _c	↓	↑	↑	↓
Bilan	↑↓	↓↑	↑↑	↓↓

b. On voit qu'il y a quatre situations différentes, mais seulement trois bilans différents. Dans les deux premiers cas, le champ magnétique perçu par les atomes H_c est le même, et il est égal au champ créé par le spectromètre (la somme des deux petits champs magnétiques est nulle). Le champ magnétique dans lequel se trouve un atome d'hydrogène H_c peut donc avoir trois valeurs différentes, la valeur intermédiaire étant deux fois plus probable que les deux autres. Pour les noyaux d'atomes d'hydrogène H_c, trois fréquences de résonance, et donc trois valeurs de déplacement chimique peuvent être mesurées ; l'une de ces trois valeurs étant deux fois plus probable que les autres.

Cette modélisation donne un résultat cohérent avec le spectre expérimental : le signal des protons H_c est bien un triplet, et le saut de la courbe d'intégration pour le pic central est bien deux fois plus haut que les deux autres.

4. Remplissons un tableau analogue à celui de la question précédente, mais pour un proton ayant trois protons voisins. C'est le cas des atomes d'hydrogène H_b.

1 ^{er} noyau d'atome d'hydrogène voisin des atomes d'hydrogène H _b	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓
2 ^e noyau d'atome d'hydrogène voisin des atomes d'hydrogène H _b	↑	↑	↓	↓	↑	↑	↓	↓
3 ^e noyau d'atome d'hydrogène voisin des atomes d'hydrogène H _b	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Bilan	↑↑↑	↑↑↓	↑↓↑	↓↑↑	↓↑↓	↓↓↑	↓↓↓	↓↓↓

Dans ce cas, huit situations différentes sont possibles, mais il y a seulement quatre bilans différents : les trois situations en rouge dans le tableau conduisent au même bilan, de même que les trois situations en bleu.

On doit donc observer quatre fréquences de résonance, et donc quatre valeurs de déplacement chimique différentes, les deux valeurs intermédiaires étant trois fois plus probables que les deux valeurs extrêmes : on observe bien un quadruplet, et le saut de la courbe d'intégration correspondant à chacun des deux pics centraux est bien trois fois plus grand que celui de chacun des deux pics extrêmes.

5. a. Si les protons H_e et H_f sont des environnements chimiquement semblables, on peut considérer qu'ils jouent le rôle de petits champs magnétiques de même intensité, et la modélisation réalisée à la question 3. reste valable : on observera un triplet.

La règle des $(n + 1)$ -uplets s'applique.

b. Pour modéliser le fait que le proton H_e et le proton H_f sont dans des environnements chimiques différents, on va choisir deux flèches de longueurs différentes.

Noyau d'atome d'hydrogène H_e	↑	↓	↑	↓
Noyau d'atome d'hydrogène H_f	↑↑	↑↑	↓↓	↓↓
Bilan	↑↑	↓↑	↑↓	↓↓

Ici, on a quatre situations différentes équiprobables, donc quatre valeurs de déplacement chimique. Le signal comportera donc quatre pics de hauteurs voisines (le saut de la courbe d'intégration sera le même pour chaque pic).

Comme dans le cas de la question 4, le signal comporte quatre pics, mais il n'a pas la même forme. On ne peut le qualifier de quadruplet.

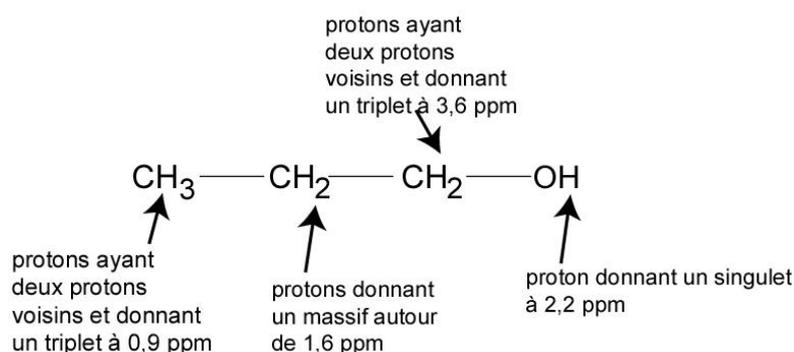
6. a. La formule semi-développée du propan-1-ol est : CH₃-CH₂-CH₂-OH.

b. Le seul proton qui n'a pas de protons voisins est celui du groupe hydroxyle : le signal correspondant est le singulet à 2,2 ppm.

Les trois protons du groupe méthyle CH₃- ont deux protons voisins : ces trois protons donnent donc un triplet. Le saut de la courbe d'intégration correspondant à ces trois protons doit être trois fois plus grand que celui correspondant au signal du proton du groupe hydroxyle : c'est donc, d'après la courbe d'intégration, le triplet à 0,9 ppm qui correspond aux trois protons du groupe méthyle.

L'autre triplet, à 3,6 ppm, correspond aux deux protons liés à l'atome de carbone lié au groupe hydroxyle : ces protons sont couplés à deux autres protons. Le saut de la courbe d'intégration correspondant au signal de ces deux protons, à 3,6 ppm, est bien deux fois plus grand que le saut correspondant au proton du groupe hydroxyle à 2,2 ppm.

On en déduit l'attribution du quatrième signal, qui correspond aux protons situés sur l'atome de carbone central de la chaîne carbonée.



c. Les protons situés sur l'atome de carbone central de la chaîne carbonée (et donnant le massif autour de 1,6 ppm) ont au total cinq protons voisins, avec deux types de protons voisins différents : ceux du groupe méthyle et ceux du -CH₂- voisin (donnant le triplet à 3,6 ppm). Si l'on considère qu'on est dans le cas de la question 5. a., et que les deux types de protons voisins sont dans des environnements chimiques semblables, on s'attend à observer un sextuplet (règle des (n + 1)-uplets).

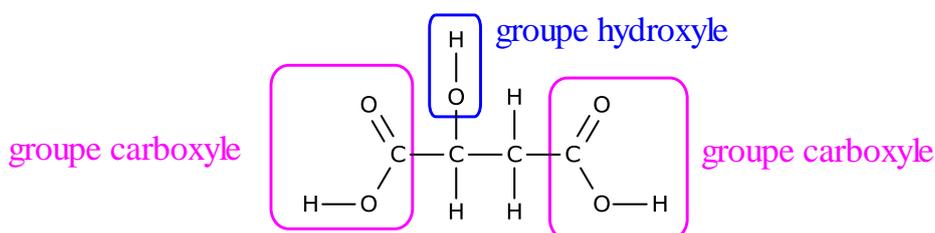
Or ici, le massif est plus complexe qu'un sextuplet, cette modélisation ne convient donc pas. En effet, si l'on observe la molécule, on voit bien que les deux types de protons voisins n'ont pas le même environnement chimique, ceux donnant le triplet à 3,6 ppm étant beaucoup plus proches d'un atome électro-négatif – celui d'oxygène – que ceux donnant le triplet à 0,9 ppm.

7 Voici les modifications apportées dans le manuel élève :

- les abscisses des spectres 1 et 2 : il est précisé qu'elles sont en « δ (ppm) » et les valeurs sont différentes, l'échelle des abscisses indique désormais seulement 2, 3 et 4 ppm (au lieu de respectivement 20, 30 et 40) pour le spectre 1, et 3 et 4 (au lieu de respectivement 30 et 40) pour le spectre 2 ;
- une aide a été rajoutée pour l'élève à la fin de la question 3. : « Aide. Le plus souvent, un atome d'hydrogène porté par un atome d'oxygène n'est pas considéré comme voisin d'autres atomes d'hydrogène. »

1. Les bactéries sont des organismes vivants. Ils peuvent produire une enzyme qui catalyse la transformation.

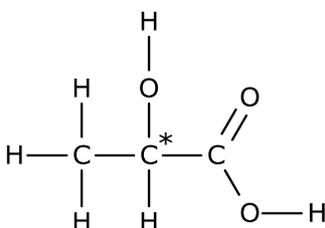
2. a.



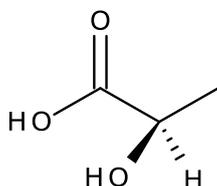
Le groupe hydroxyle est associé à une fonction alcool et le groupe carboxyle à la fonction acide carboxylique.

b. L'un des groupes carboxyle est modifié et remplacé par un groupe CH₃. La transformation est une modification de groupe caractéristique.

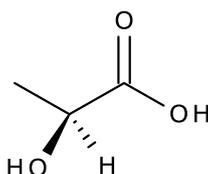
c. Sur la formule développée ci-dessous, le carbone asymétrique (lié à quatre atomes ou groupes d'atomes différents) est représenté par un astérisque :



d. La représentation de Cram du stéréo-isomère représenté est la suivante :



Son énantiomère est son image dans un miroir plan. Sa représentation de Cram est :



3. Le spectre 1 présente deux signaux :

Signal	Déplacement chimique	Multiplicité	Intégration	Conclusion
a	1,4 ppm	doublet	3	3 protons équivalents voisins d'un unique proton
b	4,3 ppm	quadruplet	1	1 proton voisin de 3 protons équivalents

Remarque : les conclusions que l'on peut tirer de la comparaison des hauteurs des paliers des courbes d'intégration sont relatives : le signal a implique b fois plus de protons que le signal 2. Au vu du nombre total d'atomes d'hydrogène des molécules, il ne peut s'agir que des valeurs 3 et 1.

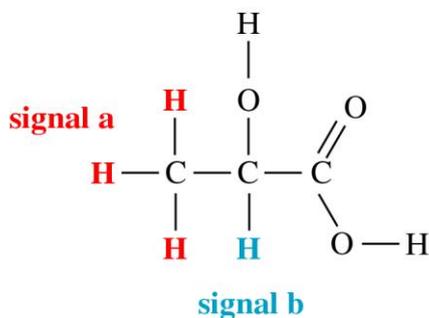
Les conclusions montrent l'existence d'une structure CH-CH₃ dans la molécule, qui n'existe que dans l'acide lactique.

Le spectre 2 présente deux signaux :

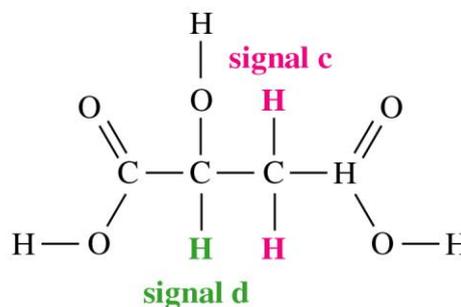
Signal	Déplacement chimique	Multiplicité	Intégration	Conclusion
c	3,1 ppm	doublet	2	2 protons équivalents voisins d'un unique proton
d	4,8 ppm	triplet	1	1 proton voisin de 2 protons équivalents

Les conclusions montrent l'existence d'une structure CH-CH₂ dans la molécule, qui n'existe que dans l'acide malique.

D'où :

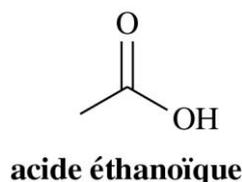
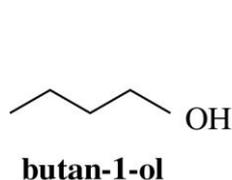


Spectre 1 : acide lactique

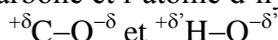


Spectre 2 : acide malique

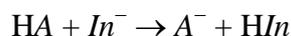
4. a.



b. Les liaisons polaires du butan-1-ol sont les liaisons C-O et O-H. L'atome d'oxygène est plus électronégatif que l'atome de carbone et l'atome d'hydrogène d'où :

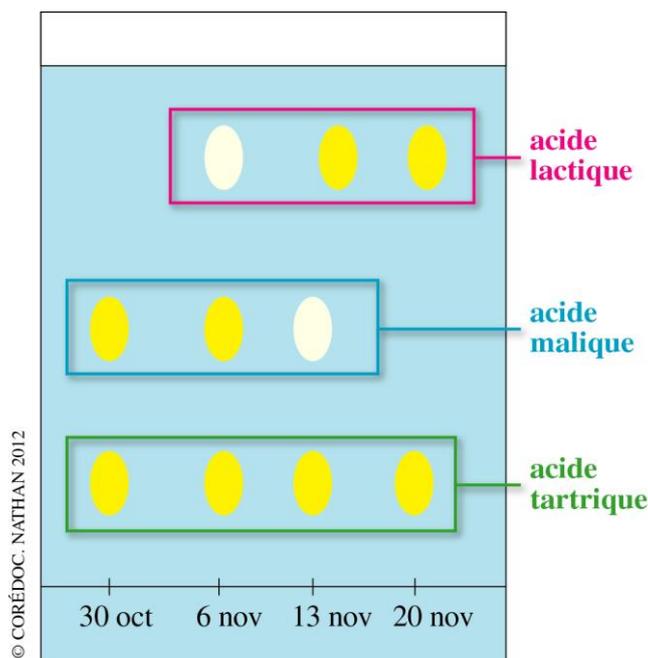


5. a. L'éluant est de couleur bleue. Le bleu de bromophénol y est donc majoritairement sous sa forme basique bleue In^- . En présence d'un acide HA il peut se produire la réaction acido-basique d'équation :



La réaction produit l'acide HIn de couleur jaune d'où l'observation de taches jaunes là où des espèces acides ont migré.

b. La tache qui n'évolue pas au cours du temps correspond à l'acide tartrique toujours présent. La tache qui disparaît progressivement est celle de l'acide malique et celle qui apparaît correspond à l'acide lactique :



c. On peut définir la durée t_d de la fermentation comme la durée nécessaire pour que la tache de l'acide malique ne soit plus visible sur le chromatogramme. D'après la figure, la date correspondante est comprise entre le 13 et le 20 novembre, ce qui correspond à une durée comprise entre 15 et 22 jours :

$$t_d \in [15 \text{ jours} ; 22 \text{ jours}] \quad \text{ou} \quad t_d = 18 \pm 4 \text{ jours}$$

6. a. Une enzyme est une protéine, c'est-à-dire une macromolécule constituée d'un enchaînement déterminé d'acides α -aminés. Dans une transformation, elle joue le rôle de catalyseur.

b. Dressons le tableau d'évolution de la transformation. La réaction est totale donc l'avancement final est égal à l'avancement maximal.

État	avancement	malate + glutamate + NAD \rightarrow aspartate + oxoglutarate + NADH					
initial	0	n	excès	excès	0	0	0
en cours	x	$n - x$	excès	excès	x		
final	$x_f = n$	$n - x_f = 0$	excès	excès	$x_f = n$	$x_f = n$	$x_f = n$

On montre ainsi que la quantité de NADH formée est égale à la quantité initiale de malate. Le dosage de NADH permettra donc la détermination de la quantité n de malate à partir de laquelle on pourra déterminer la concentration du malate dans le vin.

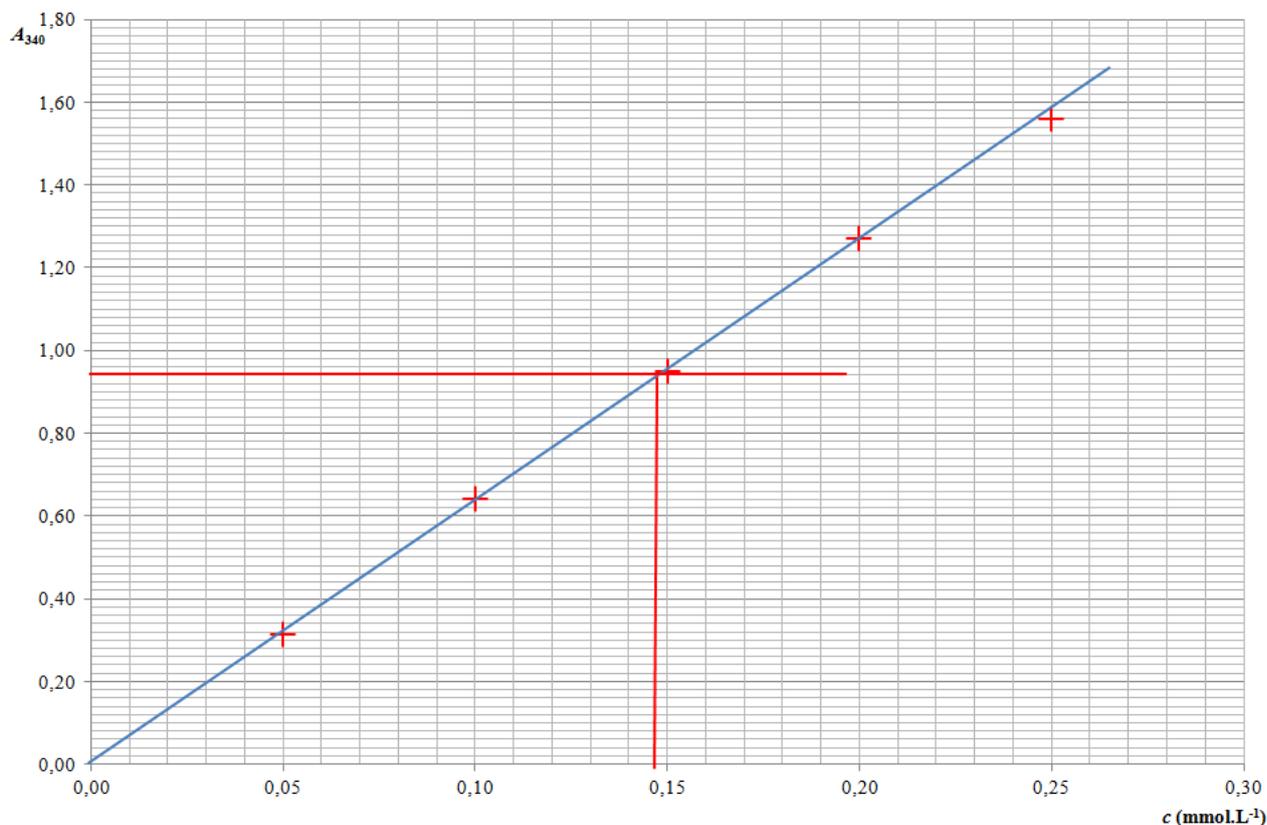
c. Les grandeurs doivent vérifier la loi de Beer-Lambert :

$$A_{340} = \epsilon_{340} \ell c$$

où ε_{340} est le coefficient d'absorption molaire de NADH à 340 nm.

d. Pour vérifier la proportionnalité entre les grandeurs A_{340} et c , on peut, au choix :

- Placer les points $(c ; A_{340})$ sur un graphe et vérifier qu'ils s'alignent sur une droite passant par l'origine.



- Calculer le rapport $\frac{A_{340}}{c}$ et vérifier qu'il est constant :

c (mmol·L ⁻¹)	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
A_{340}	0,31	0,64	0,95	1,27	1,56
$\frac{A_{340}}{c}$ (mmol ⁻¹ ·L)	6,2	6,4	6,3	6,4	6,2

e. En utilisant la courbe d'étalonnage précédente, on peut déterminer la concentration c de NADH dans la cuve : on trouve $c = 0,15$ mmol·L⁻¹. Cette concentration est égale à la concentration initiale en malate dans la cuve, elle-même 100 fois plus petite que la concentration c_0 , d'où $c_0 = 15$ mmol·L⁻¹.

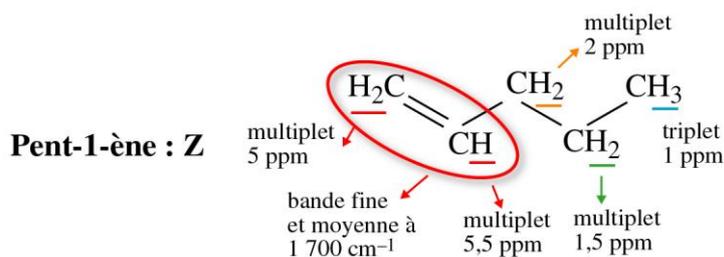
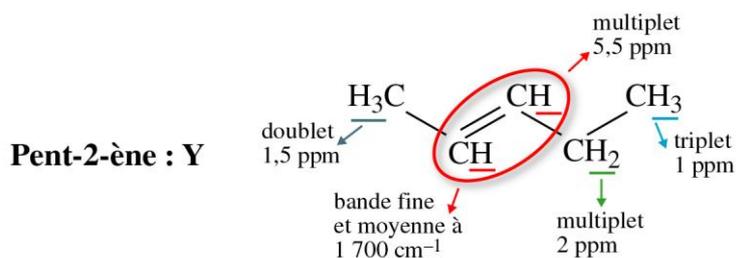
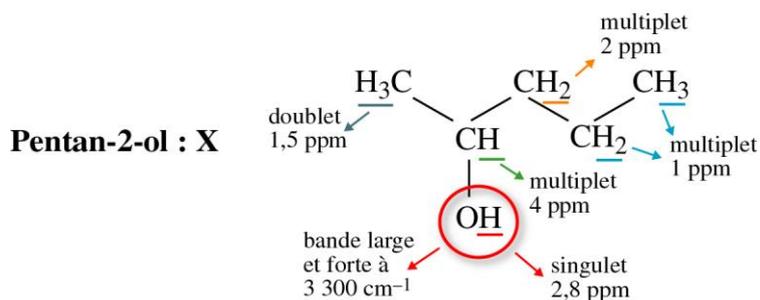
f. La concentration massique c_m de l'acide malique est $c_m = c_0 M$ où M est la masse molaire de l'acide malique.

A.N. : l'acide malique a pour formule brute C₄H₆O₅ :

$$M = 4 \times 12 + 6 \times 1 + 5 \times 16 = 134 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$$

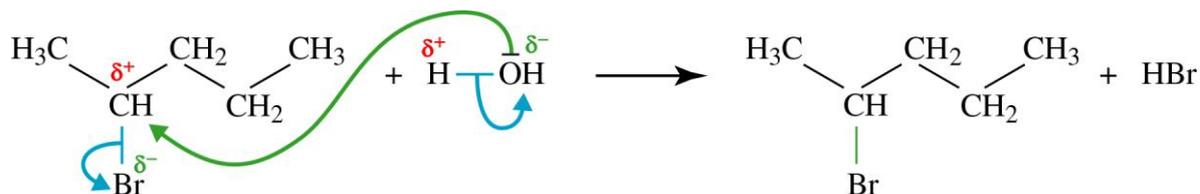
$$c_m = 15 \times 10^{-3} \times 134 = 2,01 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$$

8 a.

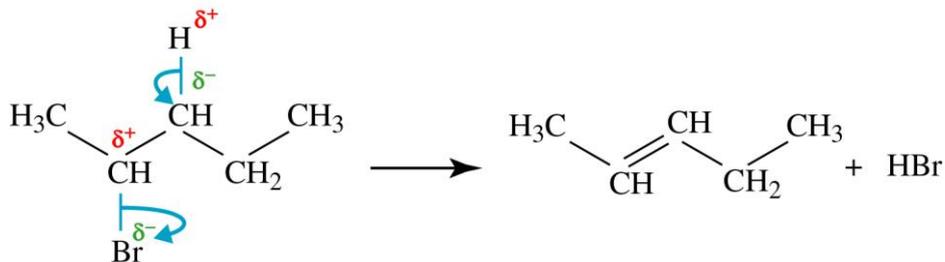


b. c. d. et e.

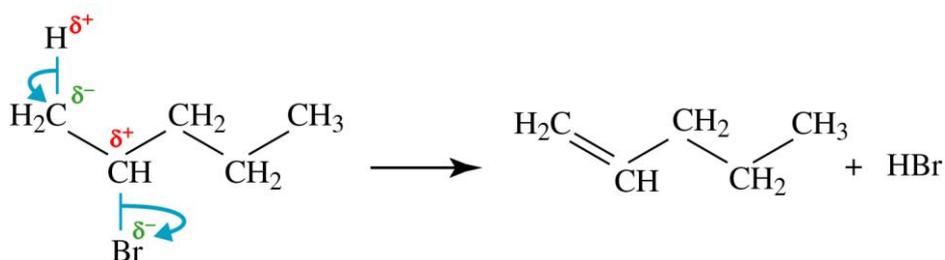
Formation du pentan-2-ol : il s'agit d'une substitution.



Formation du pent-2-ène : il s'agit d'une élimination.



Formation du pent-1-ène : il s'agit d'une élimination.



9 Dans le manuel élève a été corrigée la figure du doc 1 qui était fautive et le titre est désormais « Niveau d'énergie d'une molécule à l'intérieur d'un niveau d'énergie électronique. »

a. Lorsqu'une molécule absorbe une radiation de fréquence ν , son énergie varie de la valeur $\Delta\mathcal{E}$ avec $\Delta\mathcal{E} = h\nu$ où h est la constante de Planck.

b. La spectroscopie IR est une spectroscopie d'absorption : la molécule absorbe une radiation lumineuse et son énergie varie de :

$$\Delta\mathcal{E} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = hc\sigma$$

où σ est le nombre d'onde de la radiation absorbée. Au niveau quantique, le domaine des radiations IR correspond d'un point de vue énergétique à l'écart d'énergie de deux niveaux vibrationnels (doc 1). Ainsi, on parle souvent de vibration de la liaison qui absorbe la radiation lors de cette spectroscopie.

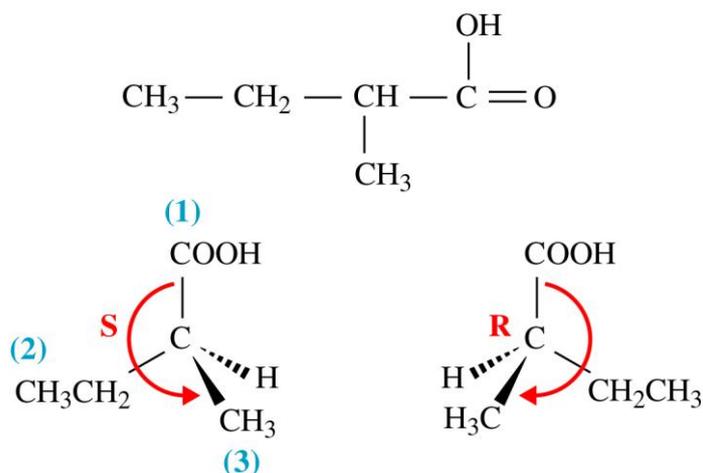
Le spectre IR « classique » du monoxyde de carbone (doc 2) fait apparaître deux bandes d'absorption à environ 2120 cm^{-1} et 2180 cm^{-1} . On peut donc penser que la transition énergétique se fait entre le niveau vibrationnel de plus basse énergie ($\mathcal{E}_{\text{vib}0}$) et le suivant ($\mathcal{E}_{\text{vib}1}$) (bande d'absorption de plus bas nombre d'onde) mais qu'il y a aussi une transition énergétique entre le niveau ($\mathcal{E}_{\text{vib}1}$) et celui juste au-dessus ($\mathcal{E}_{\text{vib}2}$) (bande d'absorption de plus haut nombre d'onde). Les écarts entre ces deux niveaux d'énergie n'étant pas tout à fait le même, on a bien deux bandes d'absorption.

L'analyse du spectre haute résolution (doc 3) montre deux « paquets » de pics d'absorption, centrés eux aussi sur 2120 cm^{-1} et 2180 cm^{-1} . On retrouve bien ici les transitions entre niveaux d'énergie vibrationnelle. Toutefois, ces niveaux d'énergie vibrationnelle sont sous-divisés en niveaux d'énergie rotationnelle. Il y a donc une multitude de transitions d'énergie possible entre deux niveaux rotationnels appartenant à deux niveaux d'énergie vibrationnelle différents. Chacune de ces transitions correspond à un pic d'absorption.

10 a. Le doc 1 rappelle que, depuis Pasteur, le terme racémique désigne le mélange, en quantités égales (on peut dire équimolaire), de deux énantiomères.

b. C'est le doc 2 qui apporte la réponse à cette question : les méthodes classiques de séparation des mélanges basées sur des différences de propriétés physiques (température d'ébullition pour la distillation fractionnée ou affinité pour les chromatographies) ne sont pas applicables à la séparation des mélanges d'énantiomères qui ont des propriétés physiques identiques à l'exception de leur action sur la lumière polarisée rectilignement.

c.



L'atome de carbone (2) de l'acide 2-méthylbutanoïque est un atome de carbone asymétrique : la molécule est chirale et les deux énantiomères (+) et (-) sont présents en égale quantité dans le mélange racémique.

En suivant l'idée proposée dans le doc 3, on peut imaginer un protocole pour mettre en œuvre les réactions suivantes entre espèces chirales.

On dispose de l'isomère (+) de l'amine qui présente des propriétés basiques : nous le notons B(+). Le mélange racémique des énantiomères de l'acide 2-méthylbutanoïque est noté AH(±) (notation suggérée à la fin du doc 1).

	Protocole	Interprétation, justification
Étape 1 Réaction acide + base	Faire réagir le mélange racémique avec l'amine ; il doit se former différents isomères du sel : le 2-méthylbutanoate de méthylbenzylammonium. D'après le doc 3, ce sont des sels solides.	$\text{AH}(\pm) + \text{B}(+)$ \downarrow $\text{A}(+)\text{B}(+) \text{ et } \text{A}(-)\text{B}(+)$ Chacun de ces composés contient 2 atomes de carbone asymétriques ; on se trouve dans la situation où ce sont des diastéréoisomères.
Étape 2 Séparation des diastéréoisomères	Dans le cas d'une solubilité différente dans un solvant (ou dans l'eau), on verse le solvant sur le mélange de sels, on agite, avec éventuellement un chauffage, pour faciliter la dissolution puis on filtre. L'un des sels (S ₁) reste dans le filtre, l'autre (S ₂) se trouve dans le filtrat (isolement possible par évaporation).	Comme le rappelle le doc 2, les propriétés physiques des diastéréoisomères sont différentes : solubilité dans l'eau, température de fusion...
Étape 3 Régénération de l'acide 2-méthylbutanoïque	Placer S ₁ et S ₂ dans des récipients distincts, ajouter une solution d'acide chlorhydrique dans chacun des récipients.	$\text{A}(+)\text{B}(+) + \text{H}^+ \rightarrow \text{AH}(+) + \text{B}(+)$ $\text{A}(-)\text{B}(+) + \text{H}^+ \rightarrow \text{AH}(-) + \text{B}(+)$

Les deux énantiomères, AH(+) et AH(-) se trouvent séparés, dans des récipients distincts ; le dédoublement des énantiomères a été réalisé.

11 Voici les modifications apportées dans le manuel élève par rapport au spécimen :

- Doc 1, 1^{re} figure, l'ordonnée de la courbe bleue est « B_0 » (au lieu de « R_0 ») ;
- Doc 1, 2^e figure, les abscisses sont en « s » (et non en « ms »), les ordonnées en « $x(m)$ » (au lieu de « $z(m)$ ») ;
- Doc 1, 3^e figure, les abscisses sont en « s » (et non en « ms ») ;
- Données : « $z_0 = 0 m$ » (au lieu de « $y_0 = 0 m$ »).

1. À l'instant du rebond, à la date $t_R = 0,56 s$, la balle touche le sol, on a alors $z_R = 0$, l'abscisse vaut $x_R = 1,1 m$.

De la courbe $v_x(t) = \text{cst}$, on déduit : $a_x = \frac{dv_x}{dt} = 0$; le vecteur accélération \vec{a} est donc vertical.

La courbe $v_z(t)$ représente une fonction linéaire du temps.

La coordonnée a_z du vecteur accélération est $a_z = \frac{dv_z}{dt} = \alpha$, coefficient directeur de la droite.

Ici $\alpha = -10$. On en déduit $a_z = -10 m \cdot s^{-2}$.

Le vecteur accélération est constant, de valeur $a = 10 m \cdot s^{-2}$, de direction verticale et son sens va vers la Terre : il est égal au vecteur \vec{g} .

Après le rebond (après $t > 0,56 s$), on retrouve :

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = 0 \quad \text{et} \quad a_z = \frac{dv_z}{dt} = -10$$

Le vecteur accélération garde les mêmes caractéristiques : $\vec{a} = \vec{g}$.

2. Juste avant le rebond, le vecteur vitesse a pour coordonnées :

$$v_x = 2 m \cdot s^{-1} \quad \text{et} \quad v_z = -5,5 m \cdot s^{-1}$$

Juste après le rebond :

$$v_x = 2 m \cdot s^{-1} \quad \text{et} \quad v_z = +4 m \cdot s^{-1}$$

Le vecteur vitesse qui était dirigé vers la Terre est maintenant tourné en sens inverse.

Sa valeur $v = \sqrt{v_x^2 + v_z^2}$ a diminué au cours du rebond (v_x est constant mais $|v_z|$ a diminué).

Elle est passée de $v_1 = 5,9 m \cdot s^{-1}$ avant le rebond à $v_2 = 4,5 m \cdot s^{-1}$ après le rebond.

3. a. L'énergie mécanique de la balle s'exprime par :

$$\mathcal{E}_m = \mathcal{E}_c + \mathcal{E}_p = \frac{1}{2} m v^2 + m g z$$

b. Avant le rebond, l'accélération de la balle est $\vec{a} = \vec{g}$. La balle n'est donc soumise qu'à son poids \vec{P} , force conservative. Le système {balle} garde donc une énergie mécanique constante pendant cette phase.

On calcule sa valeur, par exemple à la date $t = 0 s$ (on a alors $v_x = 2 m \cdot s^{-1}$, $v_z = 0$ et $z = 1,5 m$) :

$$\mathcal{E}_{m_1} = \frac{1}{2} m (v_x^2 + v_z^2) + m g z = \frac{1}{2} \times 45 \times 10^{-3} \times 2^2 + 45 \times 10^{-3} \times 9,8 \times 1,5 = 0,75 J$$

c. Après le rebond, l'énergie mécanique devient \mathcal{E}_{m_2} .

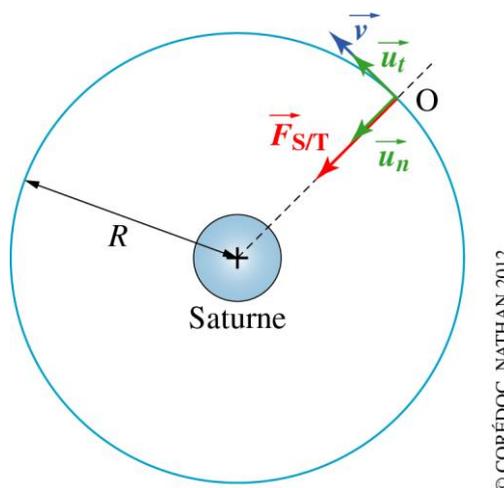
Calculons sa valeur juste à cet instant (où $z = 0$) :

$$\mathcal{E}_{m_2} = \frac{1}{2} \times 45 \times 10^{-3} \times (2^2 + 4^2) + 45 \times 10^{-3} \times 9,8 \times 0 = 0,45 J$$

Lors du rebond, il y a interaction entre la balle et le sol, une partie de l'énergie a été transférée au sol, notamment par le travail des forces d'interaction.

- 12** Voici les modifications apportées dans le manuel élève par rapport au spécimen :
- Problématique : une donnée supplémentaire est indiquée « la période de révolution de Titan autour de Saturne est $T = 15,9$ jours terrestres » ;
 - Données : le décalage Doppler-Fizeau est donnée avec la valeur absolue de $\Delta\lambda$;
 - Doc 1 : la dernière ligne a été supprimée ;
 - Doc 2 : le titre est modifié en « Effet de la rotation de Saturne » (au lieu de « Période de rotation de Saturne ») ;
 - Doc 2 : partout dans le texte, la figure et les questions de la partie B, le point W remplace le point O .
 - Question A. 2. b. : suppression de « $(\vec{u}_n = -\vec{u})$ » et l'expression de \vec{a} dans la base orthonormée (\vec{u}_t, \vec{u}_n) est « $\vec{a} = a_t \vec{u}_t + a_n \vec{u}_n$ » ;
 - Question A. 3. c. : « dans la problématique » remplace « dans le texte d'introduction » ;

A. 1. a.



b. D'après le doc 1, Titan et Saturne sont à répartition sphérique de masse. D'après la loi d'interaction gravitationnelle, la force exercée par Saturne sur Titan est :

$$\vec{F}_{S/T} = G \frac{M_S M_T}{R^2} \vec{u}_n$$

A. 2. a. Le référentiel d'étude du mouvement de Titan est le référentiel saturnocentrique, considéré comme galiléen pendant la durée de l'étude.

En considérant que M_T est constante, l'application de la deuxième loi de Newton donne la relation :

$$\vec{F}_{S/T} = M_T \cdot \vec{a} \quad \text{soit} \quad \vec{a} = G \frac{M_S}{R^2} \vec{u}_n$$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Fin de thèmes et objectifs bac

b. Dans $(O, \vec{u}_t, \vec{u}_n)$, on peut écrire :

$$\vec{a} \begin{cases} 0 \\ G \frac{M_s}{R^2} \end{cases} \quad \text{et} \quad \vec{a} \begin{cases} a_t = \frac{dv}{dt} \\ a_n = \frac{v^2}{R} \end{cases}$$

A. 3. a. L'égalité des coordonnées de \vec{a} sur (O, \vec{u}_t) conduit à la relation $\frac{dv}{dt} = 0$ à chaque instant ; soit $v = \text{cte}$: le mouvement du satellite est uniforme.

L'égalité des coordonnées de \vec{a} sur (O, \vec{u}_n) conduit à la relation :

$$G \frac{M_s}{R^2} = \frac{v^2}{R}$$

soit, après simplification :

$$v = \sqrt{\frac{GM_s}{R}}$$

b. La période de révolution est la durée de parcours d'une circonférence de longueur $L = 2\pi R$. Le mouvement étant uniforme :

$$v = \frac{L}{T} \quad \text{soit} \quad T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi R}{\sqrt{\frac{GM_s}{R}}} = 2\pi R \sqrt{\frac{R}{GM_s}} \quad \text{soit} \quad T_s = 2\pi \sqrt{\frac{R^3}{GM_s}}$$

c. L'expression précédente donne $T^2 = \frac{4\pi^2 R^3}{GM_s}$ et conduit à :

$$M_s = \frac{4\pi^2 R^3}{GT^2} \quad \text{soit} \quad M_s = \frac{4\pi^2 (1,22 \times 10^6 \times 10^3)^3}{6,67 \times 10^{-11} \times (15,9 \times 24 \times 3600)^2} = 5,69 \times 10^{26} \text{ kg}$$

On retrouve la valeur de la masse de Saturne donnée dans le document.

B. a. W se rapprochant de l'observateur terrestre :

$$f_{\text{récepteur}} > f_{\text{source}} \quad \text{et donc} \quad \lambda_{\text{récepteur}} < \lambda_{\text{source}}$$

La partie correspondant à W est donc décalée vers les courtes longueurs d'onde. La partie supérieure de la raie correspond à W. Celle de la partie centrale de la raie, qui ne subit donc pas de décalage correspond à S car ce point n'a pas de mouvement relatif par rapport à la terre suivant la direction de visée : $f_{\text{récepteur}} = f_{\text{source}}$.

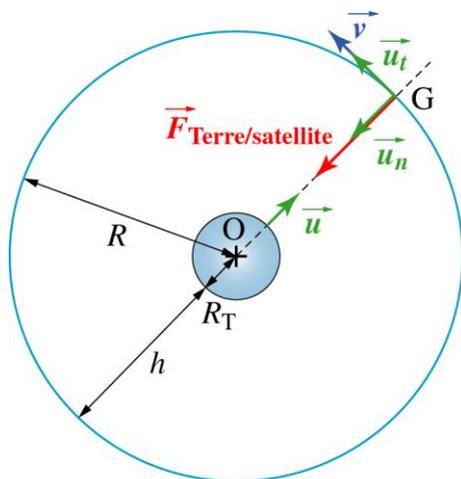
b. $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{2v}{c} \Leftrightarrow v_o = \frac{c\Delta\lambda}{2\lambda} = \frac{3,00 \times 10^8 \times (447,620 - 447,5925) \times 10^{-9}}{2 \times 447,5925 \times 10^{-9}} = 1,02 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

c. $T_s = \frac{2\pi R_s}{v_o} = \frac{2\pi (6,0 \times 10^4 \times 10^3)}{1,02 \times 10^4} = 3,7 \times 10^4 \text{ s.}$

D'après l'énoncé, $T_s = 10\text{h}47 = 38\,820 \text{ s}$, ce qui fait un écart relatif de 4,7 %. Cet écart est faible (inférieur à 5 %) : les valeurs sont compatibles.

13 Dans le manuel élève, question 1. b. : l'élève est renvoyé aux « notations de l'encadré Données » (au lieu des « notations du texte » dans le spécimen).

1. a.



© CORÉDOC. NATHAN 2012

Le système étudié est le satellite ponctuel de masse m , dont le mouvement est étudié dans le référentiel géocentrique, galiléen.

b. D'après les notations des données, le satellite étant supposé ponctuel et la Terre à répartition sphérique de masse, la loi d'interaction gravitationnelle permet de donner l'expression de la force exercée par la Terre sur le satellite :

$$\overrightarrow{F_{\text{Terre/Satellite}}} = -G \frac{m_{\text{sat}} M_{\text{T}}}{(R_{\text{T}} + h)^2} \vec{u}$$

\vec{u} est un vecteur unitaire de direction (OG) orienté de O vers G (voir énoncé et schéma).

c. En considérant que m_{sat} est constante, l'application de deuxième loi de Newton donne la relation :

$$\overrightarrow{F_{\text{Terre/Satellite}}} = m_{\text{sat}} \cdot \vec{a} \quad \text{soit} \quad \vec{a} = -G \frac{M_{\text{T}}}{R^2} \vec{u}$$

d. Dans $(G, \vec{u}_t, \vec{u}_n)$, $\vec{u}_n = -\vec{u}$, on peut ainsi écrire :

$$\vec{a} \left| \begin{array}{l} 0 \\ G \frac{M_{\text{T}}}{R^2} \end{array} \right. \quad \text{et} \quad \vec{a} \left| \begin{array}{l} a_t = \frac{dv}{dt} \\ a_n = \frac{v^2}{R} \end{array} \right.$$

L'égalité des coordonnées de \vec{a} sur (G, \vec{u}_t) conduit à la relation $\frac{dv}{dt} = 0$ à chaque instant ; soit

$v = \text{cte}$: le mouvement du satellite est uniforme.

L'égalité des coordonnées de \vec{a} sur (G, \vec{u}_n) conduit à la relation :

$$G \frac{M_{\text{T}}}{R^2} = \frac{v^2}{R}$$

soit, après simplification :

$$v^2 = \frac{GM_{\text{T}}}{R}$$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Fin de thèmes et objectifs bac

e. La période de révolution est la durée de parcours d'une circonférence de longueur $L = 2\pi R$.
 Le mouvement étant uniforme :

$$v = \frac{L}{T} \quad \text{et} \quad v = \sqrt{\frac{GM_T}{R}} \quad \text{soit} \quad T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi R}{\sqrt{\frac{GM_T}{R}}} = 2\pi R \sqrt{\frac{R}{GM_T}} \quad \text{soit} \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{R^3}{GM_T}}$$

A.N. :
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{(6,38 \times 10^3 \times 10^3 + 23,6 \times 10^3 \times 10^3)^3}{6,67 \times 10^{-11} \times 5,98 \times 10^{24}}} = 5,17 \times 10^4 \text{ s}$$

2. a. Galileo :

$$R = R_T + h = 3,00 \times 10^4 \text{ km} ;$$

$$T = 5,17 \times 10^4 \text{ s} ;$$

$$R^3 = 2,69 \times 10^{13} \text{ km}^3 ;$$

$$T^2 = 2,67 \times 10^9 \text{ s}^2.$$

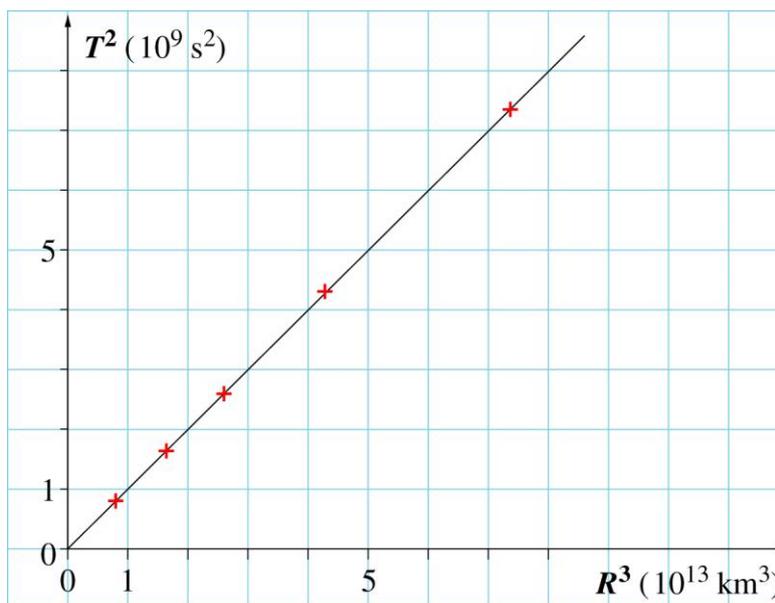
b. L'expression

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R^3}{GM_T}} \quad \text{donne} :$$

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM_T} R^3, \quad \text{soit}$$

$$T^2 = kR^3.$$

T^2 est proportionnel à R^3 , ce que confirme le graphique puisque la représentation de T^2 en fonction de R^3 est une droite passant par l'origine.



© CORÉDOC. NATHAN 2012

c. La troisième loi de Kepler est vérifiée dans le cas de satellites en orbite circulaire autour de la Terre : le carré de la période de révolution de ceux-ci est proportionnel au cube du rayon de leur trajectoire.

14 A. a. Les oscillations sont libres :

- Doc 1, extrait 1 : « allées et venues accomplies par les boules elles-mêmes » ;
- Doc 1, extrait 2 : « le même pendule fait ses vibrations », « une fois qu'on l'aura laissé en liberté ».

b. Le « temps déterminé » d'un pendule s'appelle actuellement la période du pendule.

c. La durée d'une « aller et venue » (période) :

- ne dépend pas de la masse du pendule, Galilée utilise deux pendules de masses différentes mais de même longueur et trouve « que tous deux ont un rythme de mouvement rigoureusement identique » (extrait 1) ;
- dépend de la longueur du pendule : la période reste rigoureusement identique « sauf l'allongement ou le raccourcissement de la ficelle d'arriver à la faire osciller autrement que dans son temps déterminé » (extraits 2 et 3) ;
- ne dépend pas de l'amplitude des oscillations (extrait 2) ;
- « le même pendule fait ses vibrations avec la même fréquence [...] que les arcs sur cette circonférence soient très grands ou très petits [...], dans les deux cas les vibrations auront la même fréquence. » (extrait 2).

B. d. - La période des oscillations est indépendante de la masse du pendule : dans l'expression de la période T_0 , la masse du pendule n'intervient pas.

- La période dépend de la longueur du pendule : la valeur de la période T_0 augmente lorsque la longueur du pendule augmente. De la relation, on peut déduire que le résultat de l'extrait 3 est correct : d'après la relation donnant T_0 , lorsque la longueur du pendule est multipliée par 4, la période T_0 est multipliée par $\sqrt{4} = 2$.

- La courbe représentant $\frac{T}{T_0}$ montre que la valeur de la période dépend de l'amplitude des oscillations. L'affirmation de Galilée concernant l'amplitude est donc fausse.

e. Période d'un pendule de 4 coudées de long :

- amplitude faible : $T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}} = 2\pi \sqrt{\frac{4 \times 0,50}{9,8}} = 2,8 \text{ s}$;

- amplitude de 90 : on lit sur la courbe $\frac{T}{T_0} = 1,1$.

On obtient donc $T = 1,1 \times 2,8 = 3,1 \text{ s}$.

L'écart relatif entre ces deux résultats est :

$$\frac{T - T_0}{T_0} = \frac{0,3}{2,8} = 11 \%$$

À son époque, Galilée ne disposait pas d'horloges suffisamment précises pour mesurer un écart faible de 0,3 s.

15 Dans le manuel élève, encadré « Données » : les valeurs arrondies de la constante de Planck et de la célérité de la lumière ont été supprimées, seules les valeurs exactes subsistent.

1. Fréquence ν de l'onde électromagnétique : la fréquence représente le nombre de période en une seconde, elle est donc de :

$$\nu = 9\,192\,631\,770 \text{ Hz} \quad \text{soit} \quad \nu = 9,2 \times 10^9 \text{ Hz}$$

2. D'après le doc 2, cette onde appartient au domaine des micro-ondes.

3. La valeur de la différence d'énergie $\Delta \mathcal{E}$ entre les deux niveaux est égale au quantum d'énergie absorbé soit :

$$\Delta \mathcal{E} = h\nu \quad \text{soit} \quad \Delta \mathcal{E} = h\nu = 6,63 \times 10^{-34} \times 9,2 \times 10^9 = 6,1 \times 10^{-24} \text{ J}$$

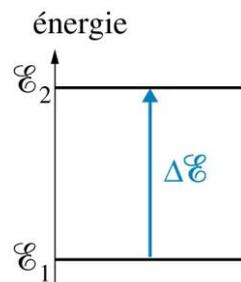
4. Incertitude pour une durée de 1 jour (soit $24 \times 3\,600 \text{ s}$) :

- Horloge à quartz :

$$\Delta t = 10^{-10} \times 24 \times 3\,600 = 9 \times 10^{-6} \text{ s}, \text{ soit de l'ordre de } 10 \mu\text{s}$$

- Horloge atomique commerciale :

$$\Delta t = 10^{-14} \times 24 \times 3\,600 = 9 \times 10^{-10} \text{ s}, \text{ soit de l'ordre de } 1 \text{ ns}$$



16 Voici les modifications apportées dans le manuel élève par rapport au spécimen :

- Les n° des procédés sont inversés dans la problématique ;
- Les docs à fond blanc sont numérotés de 1 à 5 ;
- Question A. 1. : une précision a été rajoutée « Montrer que, lors de la décantation, l'expression de la valeur ν de la vitesse... » ;
- Doc « Dégradation et acidité d'une huile » de la partie B. : le 3^e paragraphe, doublon du 2^e paragraphe, a été supprimé.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Fin de thèmes et objectifs bac

A. 1. Dans un référentiel terrestre considéré comme galiléen, le système étudié est la goutte d'eau à laquelle s'appliquent les forces extérieures suivantes :

- son poids \vec{P} tel que $P = m_{\text{eau}}g = \rho_{\text{eau}}Vg$;
- la force de frottement \vec{f} tel que $f = k \cdot v$;
- la poussée d'Archimède $\vec{\Pi}$ tel que $\Pi = m_{\text{huile}}g = \rho_{\text{huile}}Vg$.

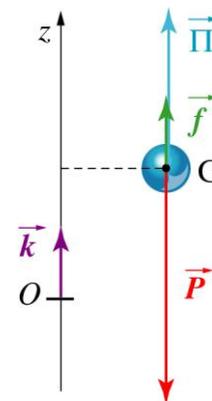
Le mouvement de la goutte étant rectiligne et uniforme, d'après la première loi de Newton ou principe de l'inertie :

$$\sum \vec{F}_{\text{ext}/S} = \vec{0}, \text{ ainsi } \vec{P} + \vec{f} + \vec{\Pi} = \vec{0}$$

En projection sur (O, \vec{k}) , on a :

$$P_z + f_z + \Pi_z = 0 \quad \text{soit} \quad -P + f + \Pi = 0$$

$$-\rho_{\text{eau}}Vg + kv + \rho_{\text{huile}}Vg = 0 \quad \Leftrightarrow \quad kv = \rho_{\text{eau}}Vg - \rho_{\text{huile}}Vg \quad \Leftrightarrow \quad v = \frac{\rho_{\text{eau}} - \rho_{\text{huile}}}{k} Vg$$



© CORÉDOC, NATHAN 2012

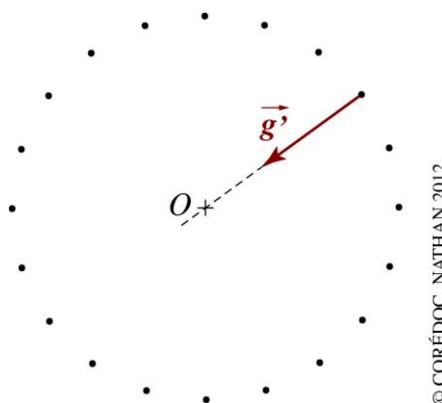
2. a. D'après la figure C, le mouvement de M est bien :

- circulaire car la trajectoire est un cercle. M est mobile en restant à égale distance d'un point O ;
- uniforme car la valeur de sa vitesse est constante. M parcourt des distances égales pendant des durées égales.

b. Les caractéristiques du vecteur accélération de M sont :

- le point d'application M ;
- la direction : la droite (OM). L'accélération est radiale ;
- le sens : orienté vers le centre O de la trajectoire. L'accélération est centripète ;
- la valeur : $a_M = \frac{v_M^2}{r}$.

c.



© CORÉDOC, NATHAN 2012

La goutte tend à adopter un mouvement dont la direction est celle :

- du champ de pesanteur \vec{g} dans le cas de la décantation ;
- de \vec{g}' dans le cas de la centrifugation, c'est-à-dire la droite perpendiculaire à l'axe de rotation passant par la goutte de centre G.

D'après le doc 2, « le champ de pesanteur \vec{g}' est l'opposé du vecteur accélération ». Le sens du mouvement est donc de O vers M.

d. $v_M = 2\pi r f \quad \Leftrightarrow \quad g' = a_M = \frac{(2\pi r f)^2}{r} \quad \Leftrightarrow \quad g' = 4\pi^2 r f^2$

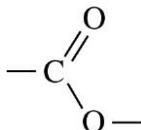
Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Fin de thèmes et objectifs bac

$$\text{A.N. : } g' = 4\pi^2 \times 0,10 \times \left(\frac{2,5 \times 10^3}{60} \right)^2 = 6,9 \times 10^3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}.$$

e. $\frac{g'}{g} = 6,9 \times 10^2$ donc g' est près de 700 fois plus grand que g ! Si la relation en 1. s'applique,

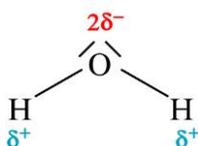
(le modèle de force de frottement $f = k \times v$ pouvant changer en $f' = k'v'^2$ par exemple), il en est de même pour v . Dans tous les cas, dans un tel champ d'accélération, la centrifugation permet nécessairement un gain de temps pour séparer l'huile et l'eau.

B. 1. a.



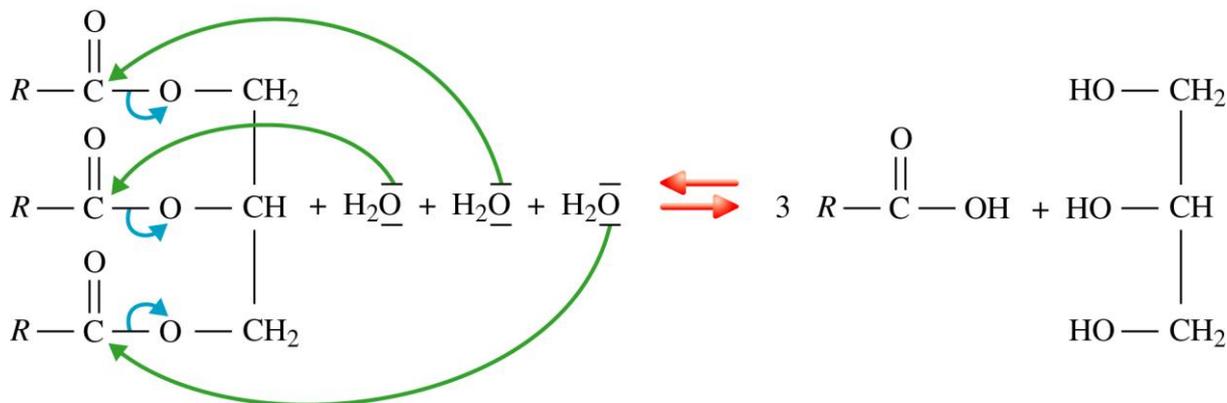
Il s'agit de la classe fonctionnelle ester.

b.



D'après les données (page 573) : $\chi(\text{H}) < \chi(\text{O}) \Rightarrow \text{O}$ possède une charge partielle négative et H une charge partielle positive. La molécule d'eau possède un site donneur de doublets d'électrons, l'oxygène, et un site accepteur d'électrons, l'hydrogène.

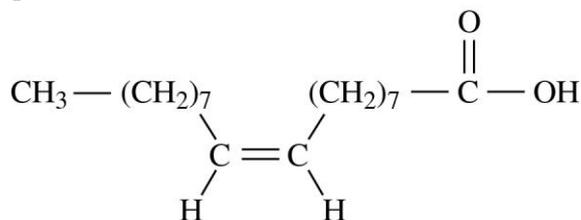
c.



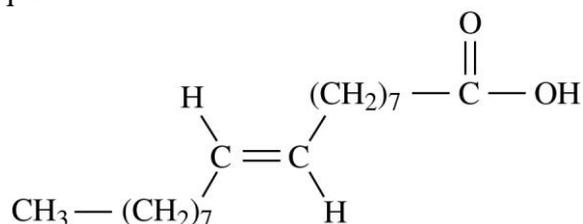
Les atomes de carbone du tryglycéride forment des liaisons avec les atomes d'oxygène apportés par l'eau. Le site accepteur de doublets d'électrons est le carbone fonctionnel du groupe ester car il est relié à deux atomes d'oxygène et non un seul, ce qui accroît la valeur de sa charge partielle positive. Le site donneur de doublets d'électrons est l'oxygène de l'eau.

2. a. Isomères de l'acide octadec-9-énoïque

acide (Z)-octadec-9-énoïque :

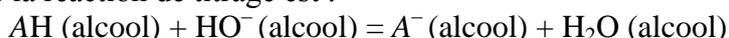


acide(*E*)-octadec-9-énoïque :



b. Il s'agit de diastéréoisomères : ils ont en effet la même formule brute, la même formule semi-développée mais des configurations spatiales différentes, non symétriques l'une de l'autre par rapport à un plan. Les molécules ne sont pas images l'une de l'autre à travers un miroir plan.

3. a. L'équation de la réaction de titrage est :



b. À l'équivalence, les réactifs sont introduits en proportions stœchiométriques :

$$n(\text{AH})_{\text{introduit}} = n(\text{HO}^-)_{\text{versé}}$$

c. La relation précédente donne :

$$n_0 = C_1 V_E$$

d. En supposant que AH est uniquement l'acide oléique, la masse de cet acide contenue dans le prélèvement est :

$$m_0 = n_0 M_{\text{AH}} \text{ pour une masse } m = 2,0 \text{ g d'huile}$$

L'acidité de l'huile est :

$$A = \frac{m_0}{m} = \frac{C_1 V_E M_{\text{AH}}}{m} = \frac{4,0 \times 10^{-3} \times 8,1 \times 10^{-3} \times 282}{2,0} = 4,5 \times 10^{-3} = 0,45 \%$$

e. $A < 0,8 \%$: l'huile peut faire partie de la catégorie des huiles d'olive vierge extra.

C. Les procédés présentés sont :

- le système d'extraction par presse et décantation (procédé 1) ;
- le système d'extraction avec centrifugation à deux phases (procédé 2).

Pourquoi donc préférer de nos jours le procédé 2 au procédé 1 ?

La première raison concerne le gain de temps. Comme nous l'avons expliqué dans la partie **A.**, la décantation est un procédé de séparation plus lent que la centrifugation. Le procédé 2 permettra donc de séparer plus rapidement l'huile et l'eau ainsi que l'huile et les grignons ou margines. Le contact avec l'eau étant réduit en termes de durée, la quantité d'acide oléique produit par hydrolyse (étude menée dans la partie **B.**) est plus faible. Le tableau de la partie **C.** le confirme d'ailleurs. L'acidité de l'huile est réduite, ce qui permet d'obtenir une huile de meilleure qualité : l'acidité de l'huile est de 0,5 à l'issue du procédé 2 contre 1 pour le procédé 1 (extrait du doc de la partie **C.**), ce qui conduit à qualifier l'huile d'huile « d'olive vierge extra » avec le procédé 2 et plutôt « d'huile d'olive vierge » simplement avec le procédé 1 (extrait du doc de la partie **A.**).

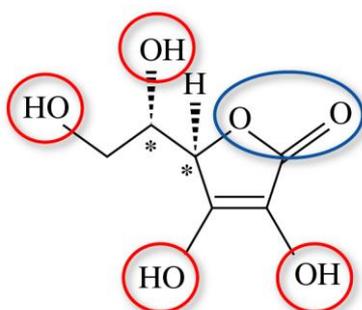
L'analyse du document de la partie **C.** permet d'ajouter le fait que le procédé 1 conduit à une quantité de margines bien plus élevées (plus de 20 fois plus) que le procédé 2. Or, celles-ci constituent des « eaux » très polluantes. Le procédé 2 produit plus de grignons (près de deux fois plus) mais ceux-ci sont valorisables. Ainsi le procédé 2 a moins d'impact environnemental que le procédé 1.

Enfin, le procédé 2 permet d'obtenir une huile contenant davantage d'antioxydants que celle obtenue grâce au procédé 1 donc une huile qui se conserve mieux.

Le procédé 2 est donc préféré au procédé 1 car il offre de nombreux avantages :

- durée du processus de fabrication réduite ;
- acidité plus faible, ce qui permet un classement de l'huile dans la catégorie des huiles d'olive vierge extra (critère de choix du consommateur) ;
- impact environnemental plus faible ;
- durée de conservation plus longue.

17 1. a.

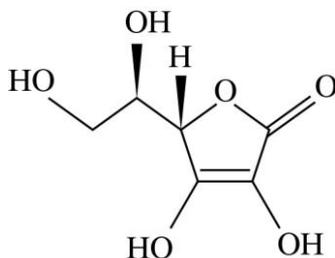


Le groupe caractéristique OH est le groupe hydroxyle.

b. La molécule de l'acide L-ascorbique possède deux atomes de carbone asymétriques, notés C*.

c. Cette molécule possédant deux atomes de carbone asymétriques, elle a donc quatre stéréoisomères de configuration.

d. Molécule de l'acide D-ascorbique :



2. a. L'équation de la réaction entre le diiode et l'acide L-ascorbique s'écrit :



b. Le diiode est introduit en excès car le mélange garde une couleur jaune orangé.

3. a. Le mélange M absorbe le bleu ($\lambda_{\text{max}} = 470 \text{ nm}$) ; il apparaît donc de la couleur complémentaire : l'orangé. Ceci est en accord avec l'observation faite.

b. Par lecture graphique, on trouve $c' = 2,6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$.

La quantité n' de diiode présent dans le mélange M est :

$$n' = c' \times V' = 2,6 \times 10^{-3} \times 0,0700 = 1,8 \times 10^{-4} \text{ mol}$$

c. La quantité n_c de vitamine C présente initialement dans le mélange M correspond à la quantité de diiode ayant réagi. D'où :

$$n_c = c \times V - n' = 1,5 \times 10^{-2} \times 0,0500 - 1,8 \times 10^{-4} = 5,7 \times 10^{-4} \text{ mol}$$

d. La concentration c_c en vitamine C est donnée par la relation :

$$c_c = \frac{n_c}{V_c} = \frac{5,7 \times 10^{-4}}{0,020} = 2,9 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

e. La quantité de vitamine C présent dans la fiole de 200 mL est :

$$c_c \times V_{\text{fiole}} = 2,9 \times 10^{-2} \times 0,200 = 5,7 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Fin de thèmes et objectifs bac

f. La masse d'acide L-ascorbique contenu dans une ampoule est :

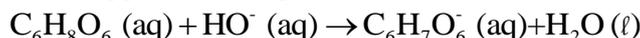
$$m_C = c_C \times V_{\text{ fiole }} \times M_C = 2,9 \times 10^{-2} \times 0,200 \times (6 \times 12,0 + 8 \times 1,0 + 6 \times 16,0) = 1,0 \text{ g}$$

Cette valeur correspond à celle indiquée par le fabricant.

4. a. La vitamine C étant caractérisée par un pK_a , il s'agit donc d'un acide faible.

b. La vitamine C étant un acide faible, son titrage nécessite une solution de base forte, comme une solution d'hydroxyde de sodium.

c. L'équation de la réaction support du titrage s'écrit :



18 a. Le chlorure d'hydrogène étant un acide fort, il se dissocie totalement dans l'eau pour former des ions oxonium H^+ et des ions chlorure Cl^- .

L'équation de la réaction s'écrit :



b. La réaction peut être suivie par conductimétrie car il y a formation d'ions au cours du temps.

c. La conductivité σ de la solution est donnée par la relation :

$$\sigma = \lambda_{H_3O^+} [H_3O^+] + \lambda_{Cl^-} [Cl^-]$$

d. D'après l'équation de la réaction, l'avancement x est donné par la relation :

$$x = [H_3O^+] \times V = [Cl^-] \times V$$

Or : $[H_3O^+] = [Cl^-]$

D'où : $\sigma = (\lambda_{H_3O^+} + \lambda_{Cl^-}) \times [H_3O^+]$ soit $[H_3O^+] = \frac{\sigma}{\lambda_{H_3O^+} + \lambda_{Cl^-}}$

Donc : $x = \frac{V\sigma}{\lambda_{H_3O^+} + \lambda_{Cl^-}}$

e. L'avancement x est proportionnel à la conductivité σ du milieu réactionnel. Donc, lorsque l'avancement x est égal à la moitié de l'avancement maximal, la conductivité σ est également égale à la moitié de la conductivité maximale.

Par lecture graphique :

$$\sigma_{\text{max}} = 8,0 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1} \text{ et } \frac{\sigma_{\text{max}}}{2} = 4,0 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1} \text{ pour } t_{1/2} = 1,0 \text{ min}$$

Le temps de demi-réaction est $t_{1/2} = 1,0 \text{ min}$.

f. À l'état final :

$$[H_3O^+]_f = \frac{\sigma_f}{\lambda_{H_3O^+} + \lambda_{Cl^-}} = \frac{0,80}{35,0 \times 10^{-3} + 7,63 \times 10^{-3}} = 19 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3} = 1,9 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

g. $pH = -\log [H_3O^+]_f = -\log (1,9 \times 10^{-2}) = 1,7$.

19 1. Un matériau réfractaire résiste à de hautes températures. Son point de fusion est très élevé : plus de 1 630 °C.

2. La stéatite est une roche naturelle et écologique car elle est composée de talc, magnésite et penninite.

Sa forte conductivité thermique prouve que c'est un bon conducteur de la chaleur, qui ne s'oppose pas au transfert thermique et qui permet ainsi une diffusion rapide de la chaleur.

Sa forte capacité thermique massique permet une accumulation importante de l'énergie thermique.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Fin de thèmes et objectifs bac

3. Pour 1 m² de stéatite dont la température atteint 100°C, l'énergie dégagée pendant 24 h a pour valeur :

$$\mathcal{E} = 80 \% \times \mathcal{P} \times t = 0,80 \times (0,95 \times 10^3) \times (24 \times 3\,600)$$

$$\mathcal{E} = 6,6 \times 10^1 \text{ MJ soit } 18 \text{ kWh}$$

4. Le flux thermique :

$$\Phi = \lambda \times \frac{S}{e} \times (T_A - T_B) = 6,4 \times \frac{0,45}{7 \times 10^{-2}} \times (200 - 100) = 4,1 \times 10^3 \text{ W}$$

20 Dans le manuel élève, doc 3, la molécule 4 du procédé de la société Boots possède bien un atome d'oxygène sur la double liaison de droite, et l'atome d'N de la molécule 11 possède une triple liaison (au lieu d'une double).

Rédiger une synthèse de documents (ou de connaissances) consiste à extraire des informations de documents et à les mettre en relation avec des connaissances afin de répondre à une problématique.

Elle est parfois guidée, ce qui n'est pas le cas ici.

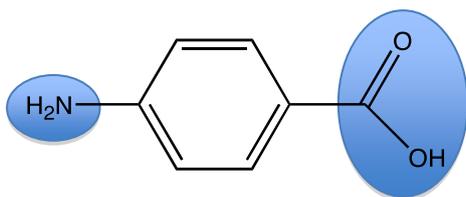
La rédaction d'une synthèse ne fait pas appel à d'autres sources, tels que le dictionnaire ou Internet. Les documents, le cours et la culture générale suffisent à sa rédaction.

Le barème de notation peut être le suivant :

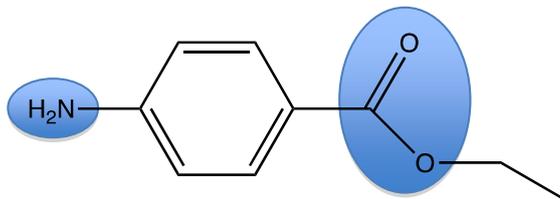
Synthèse satisfaisante		Synthèse non satisfaisante		Aucune synthèse	
Les éléments scientifiques sont présents (documents et connaissances) et mis en relation ; ils permettent de répondre à la problématique. La réponse est organisée sous forme d'une synthèse correctement rédigée.	Des éléments scientifiques solides sont présents mais de manière incomplète ou ils sont tous présents mais non mis en relation. La réponse est organisée et correctement rédigée.	Des éléments scientifiques solides et bien choisis mais non mis en relation. La réponse est organisée et correctement rédigée.	Des éléments scientifiques incomplets ou mal choisis et mis en relation. La réponse est organisée sous forme de synthèse et correctement rédigée.	Des éléments scientifiques corrects.	Pas d'éléments scientifiques corrects.
6 points	4 ou 5 points	3 points	2 points	1 point	0 point

Le tableau ci-après regroupe les éléments attendus dans la synthèse et permet également de construire un barème de correction.

21 1. a. PABA :

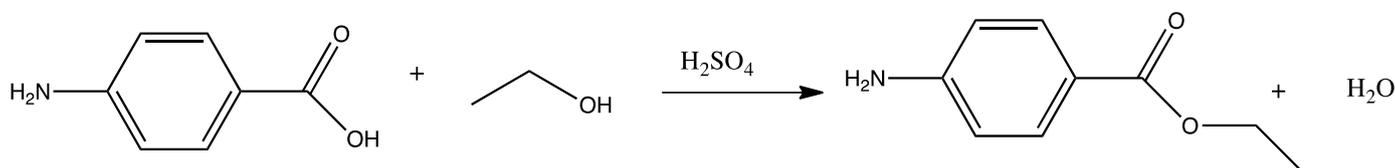


Benzocaïne :



Le groupe azoté est un groupe caractéristique amine.

b. Équation de la transformation :

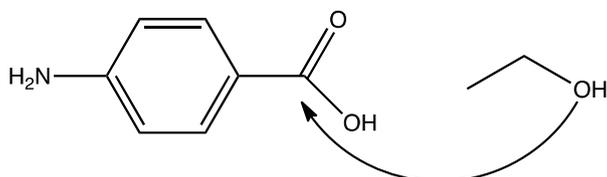


La formation de benzocaïne s'accompagne de la formation d'une molécule d'eau.

c. La transformation est sélective, seul le groupe caractéristique acide carboxylique est transformé dans le PABA. C'est une réaction de substitution.

d. L'atome d'oxygène de la molécule d'éthanol est donneur de doublets d'électrons.

e. Modélisation du transfert électronique :

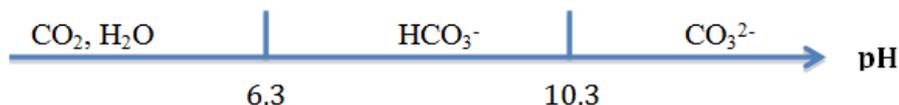


2. a. Réactifs : PABA, éthanol ; solvant : éthanol ; catalyseur : acide sulfurique.

Le réactif limitant est le PABA, l'autre réactif est aussi le solvant donc en très large excès.

b. À la fin de la transformation, il y a le solvant éthanol, le catalyseur, le produit formé (benzocaïne) et du réactif PABA n'ayant pas réagi, de l'eau a été formée. Le milieu est donc acide.

c. Diagramme de prédominance :



Lors du traitement du brut réactionnel par une solution basique de carbonate de sodium, il se produit une réaction acide-base entre les ions carbonate et l'acide présent dans le milieu. On observe un dégagement de dioxyde de carbone.

d. La benzocaïne possède un seul pKa, donc il n'y a qu'un seul groupe caractéristique qui possède des propriétés acido-basiques : le groupe amine.

Le PABA possède deux valeurs de pKa, donc il y a deux groupes caractéristiques qui possèdent des propriétés acido-basiques : le groupe amine et le groupe acide carboxylique.

e. Diagramme de prédominance pour la benzocaïne :

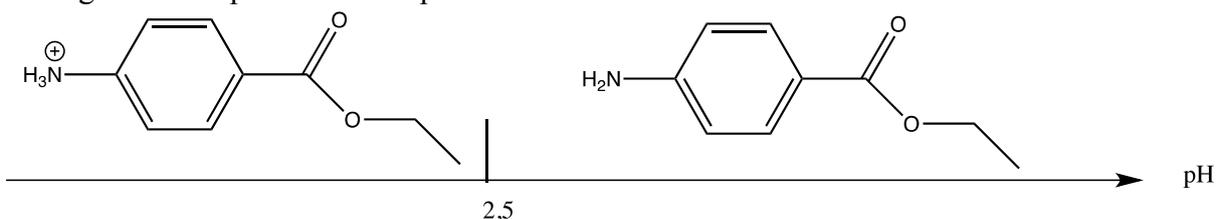
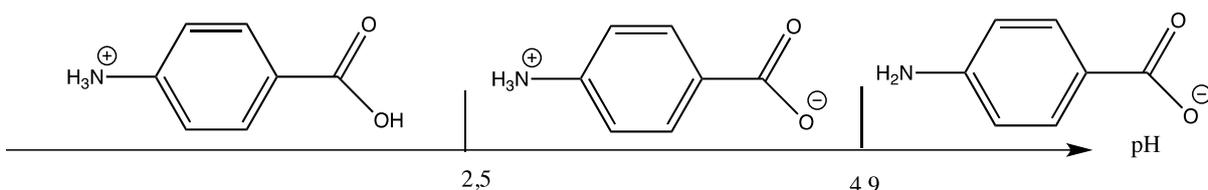


Diagramme de prédominance pour le PABA :



À pH = 9, le PABA se trouve sous forme ionique (chargée globalement négativement) et la benzocaïne se trouve sous forme neutre. La benzocaïne précipite donc à pH = 9 mais pas le PABA.

f. Il faut refroidir le contenu du bécher avec un bain de glace pour diminuer la température et ainsi diminuer la solubilité de la benzocaïne. On récupère ainsi plus de produit d'intérêt.

g. Le schéma doit comporter une fiole à vide attachée et un bûchner.

3. a. et b. D'après la CCM, le produit brut, ainsi que le produit recristallisé, ne contiennent que de la benzocaïne et pas de PABA. Le filtrat contient à la fois le PABA et la benzocaïne : le rendement de la synthèse sera certainement assez faible.

L'examen des températures de fusion montre que la recristallisation a quand même permis de purifier le produit brut qui devait contenir un peu de PABA, non détectable par analyse CCM. La purification était donc nécessaire. Le produit recristallisé peut être considéré comme pur.

c. La quantité de matière de benzocaïne obtenue est :

$$n_{\text{obtenu}} = 1,5 \text{ mmol}$$

Le rendement est donc de 29 % (faible comme prévu par la CCM).

d. Le spectre A est un spectre IR, l'axe des abscisses s'exprime en nombre d'onde (cm^{-1}) ; le spectre B est un spectre RMN, l'axe des abscisses s'exprime en déplacement chimique (ppm).

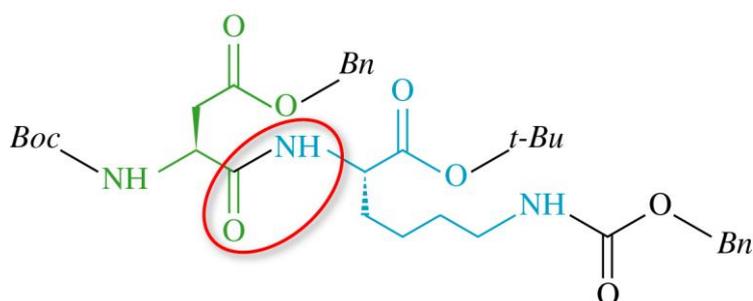
e. Dans le spectre IR, on retrouve des bandes vers $3\ 500 \text{ cm}^{-1}$ correspondant à la liaison N-H du groupe caractéristique amine et une bande fine vers $1\ 700 \text{ cm}^{-1}$ correspondant à la liaison C=O du groupe caractéristique ester.

f. Analyse du spectre RMN :

Déplacement chimique (ppm)	Nombre de H concernés (d'après la courbe d'intégration)	Forme du signal	Attribution	Nombre de H voisins
1,4	3	triplet	-CH ₃ (éthanoate)	2
4 à 4,5	2 + 2	massif	-NH ₂ et -CH ₂ (éthanoate)	
6,8	2	doublet	H du cycle	1
8,0	2	doublet	H du cycle	1

La forme des signaux se justifie avec le nombre de H voisins.

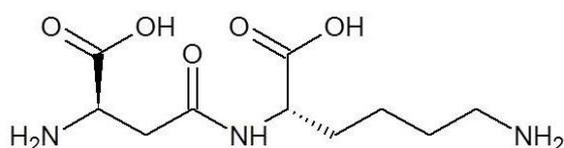
22 a. et b.



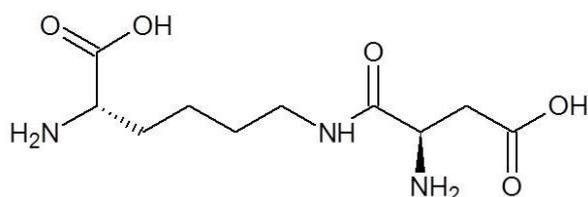
c. Il y a quatre groupes protecteurs sur la molécule ; ils apparaissent en noir sur la figure ci-dessus ; les groupes caractéristiques protégés sont, de gauche à droite : un groupe amino, un groupe carboxyle, un groupe carboxyle et un groupe amino.

d. Tous les groupes amino peuvent interagir avec les groupes carboxyles, il est donc nécessaire de protéger pour effectuer le couplage souhaité.

En l'absence de protection, on pourrait former :



ou



23 Voici les modifications apportées dans le manuel élève :

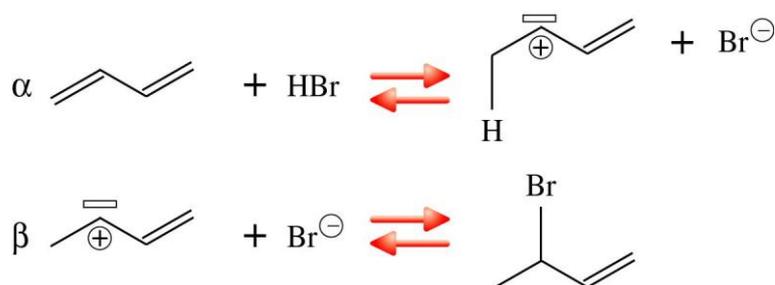
- Doc 2, représentation graphique de gauche : les abscisses sont en « min » et les ordonnées sont en « proportions (%) » allant de 0 à 100 (au lieu de 0 à 1,0) ;

- Doc 2, représentation graphique de droite : les ordonnées sont également en « proportions (%) » allant de 0 à 100 (au lieu de 0 à 1,0), les abscisses, en revanche, restent en heure ;

- Doc 4 : les lettres δ et γ échangent leur place, et la molécule de droite de la 3^e réaction en partant du bas possède une double liaison au milieu et une simple liaison à droite.

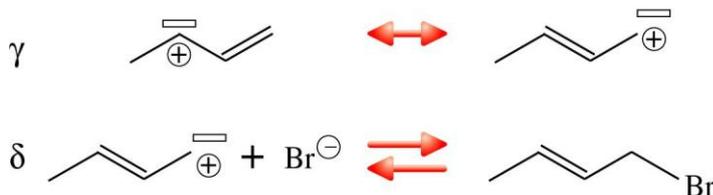
Éléments pour la synthèse de documents

Lorsque le réactif R est mis à réagir en présence de HBr, il se forme très rapidement P₁, produit cinétique selon la suite de transformations :



Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Exercices Objectif BAC

Si on apporte de l'énergie (par transfert thermique) au système chimique, les transformations suivantes peuvent aussi avoir lieu :



Ces transformations sont renversables ; le système évolue vers son état d'équilibre qui est l'état le plus stable c'est-à-dire P_2 , produit thermodynamique.

24 a. La lumière se déplace à vitesse constante. Pendant la durée Δt elle parcourt un aller-retour soit une distance $2D$:

$$2D = c\Delta t$$

b. Calculons la durée nécessaire pour que la lumière parcoure 1 cm dans le vide :

$$\tau = \frac{1 \times 10^{-2}}{3,00 \times 10^8} = 3,3 \times 10^{-11} \text{ s}$$

Il faut donc mesurer la durée avec une incertitude maximale de 33 ps.

c. $d = D\alpha = 3,80 \times 10^5 \times 2,0 \times 10^{-5} = 7,6 \text{ km}$.

d. La tache de lumière sur la lune a une aire :

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \pi \times \frac{(7,6 \times 10^3)^2}{4} = 4,5 \times 10^7 \text{ m}^2$$

On en déduit le rendement :

$$\rho_A = \frac{0,30}{4,5 \times 10^7} = 6,6 \times 10^{-9}$$

le rendement est extrêmement faible !

e. Le phénomène de diffraction est plus marqué au retour car la surface sur laquelle se réfléchit le faisceau laser est beaucoup plus petite que la surface du miroir du télescope qui émet le faisceau depuis la Terre. À l'aller, la lumière traverse un trou dont le diamètre est de 1,50 m (diamètre du télescope) alors qu'au retour, la taille est voisine de 0,5 m.

f. Le rendement au retour est égal au rapport des carrés des diamètres :

$$\rho_R = \frac{1,50^2}{(22 \times 10^3)^2} = 4,6 \times 10^{-9}$$

On en déduit le rendement total :

$$\rho = \rho_A \times \rho_R = 3,1 \times 10^{-17}$$

g. Énergie d'un photon :

$$\mathcal{E} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{532 \times 10^{-9}} = 3,74 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Chaque impulsion transporte une énergie de 300 mJ.

On en déduit :

$$n = \frac{0,300}{3,74 \times 10^{-19}} = 8,02 \times 10^{17} \text{ photons}$$

h. À partir du rendement, on peut calculer le nombre de photons qui pénètrent dans le télescope au retour :

$$n_R = 8,02 \times 10^{17} \times 3,1 \times 10^{-17} = 24 \text{ photons dans le meilleur des cas}$$

- i.** On filtre la lumière reçue pour être sûr que les photons détectés sont bien les photons qui se sont réfléchis sur les réflecteurs lunaires et non des photons parasites provenant de la diffusion de la lumière par l'atmosphère.
- j.** Il faut un minimum de 100 tirs pour obtenir un écho détectable. Comme le laser émet 10 impulsions par seconde, 10 secondes au minimum sont nécessaires pour obtenir une mesure de la distance Terre-Lune.

25 Dans le manuel élève, doc 1, 5^e paragraphe, la phrase a été corrigée de la manière suivante : « Mais les atomes reçoivent, pour chaque photon incident, une variation de quantité de mouvement toujours dans la même direction ».

- 1. a.** On appelle transition électronique d'un atome, le passage d'un état d'énergie à un autre par modification du cortège électronique.
- b.** Une énergie résonante est une énergie qui, absorbée par l'atome, lui permet de subir une transition.
- c.** L'effet Doppler est le changement de la fréquence du signal reçu par rapport à celle du signal émis lorsque le récepteur est en mouvement relatif par rapport à la source.
- 2. a.** La longueur d'onde doit être une longueur d'onde résonante. Il faut une longueur d'onde bien précise. On met à profit la monochromaticité du laser.
- b.** La quantité de mouvement d'un photon est donnée par l'expression :

$$p_{\text{photon}} = \frac{h}{\lambda}$$

- c.** Le système {photon-atome} étant considéré comme isolé, il y a conservation de sa quantité de mouvement :

$$\begin{array}{ccc} \text{avant l'interaction} & & \text{après l'interaction} \\ \vec{p}_{\text{atome}} + \vec{p}_{\text{photon}} & = & \vec{p}'_{\text{atome}} \end{array}$$

$$p_{\text{atome}} - p_{\text{photon}} = p'_{\text{atome}}$$

$$mv_i - \frac{h}{\lambda} = mv_f$$

$$\Delta v = v_f - v_i = -\frac{h}{\lambda m} = -5,9 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

- d.** Les réémissions se font dans des directions aléatoires. En moyenne, les variations de vitesse s'annulent.
- e.** Le nombre de cycles nécessaire est :

$$n = \frac{v}{|\Delta v|} = 5,1 \times 10^4 \text{ cycles}$$

Si le laser continuait à agir, les variations de vitesse continueraient à se produire, ce qui signifie que l'atome serait de nouveau accéléré.

- 3. a.** Le mouvement désordonné des atomes dans le gaz est l'agitation thermique. Dans le cas décrit dans le doc 1, on ralentit le mouvement d'ensemble des atomes alors que dans le deuxième cas, on diminue les vitesses du mouvement désordonné des atomes, ce qui est l'équivalent d'une diminution de la température du gaz.
- b.** Par effet Doppler, la longueur d'onde du photon reçu est plus grande que la longueur d'onde d'émission lorsque l'atome s'éloigne de la source, ce qui augmente l'écart avec la longueur d'onde résonnante et diminue la probabilité d'absorption. C'est l'inverse lorsque

l'atome se rapproche de la source. Dans le cas de la figure, les photons du laser 2 ont une probabilité plus grande d'être absorbés.

Il s'ensuit qu'il y a toujours diminution de la vitesse de l'atome puisque que l'absorption est plus grande du côté du déplacement.

26 Éléments de réponse

- Explosion du trafic de données, donc les débits nécessaires doivent augmenter.
- La mobilité nécessaire aux nouveaux usages et la propagation libre des signaux est davantage privilégiée.
- Obligation que les différents signaux n'aient pas la même fréquence (interférence), donc rareté des possibilités de fréquences radio encore libres.
- Compromis entre fréquence grande (grand débit d'information) et fréquence petite (meilleure propagation du signal) : les fréquences les plus appréciables sont comprises vers les 800 MHz (elles permettent une couverture étendue et une meilleure qualité de service à l'intérieur des bâtiments) ; celles des 2,6 GHz sont bien adaptées au milieu urbain (zone moins étendue et débits nécessaires plus importants car milieu dense, donc fréquences plus grandes privilégiées).

Une conclusion possible

Le spectre radio fait partie du domaine public de l'État. C'est une ressource rare gérée en particulier par l'ARCEP, qui est en charge des fréquences ouvertes aux services de télécommunications. Elle en autorise l'utilisation afin d'optimiser la gestion du spectre, limité. Les enjeux économiques liés aux nouveaux services 4G étant considérables, les quantités de fréquences ne sont pas suffisantes pour satisfaire tous les opérateurs, qui sont alors contraints de répondre à des appels à candidature.

27 *Voici les modifications apportées dans le manuel élève :*

- *Titre de l'exercice : « 4G » a bien-sûr été supprimé du titre, cette erreur s'est glissée en raison du titre de l'exercice précédent ;*
- *Doc 2, la 6^e ligne avant la fin a été modifiée de la façon suivante : « il faut que la fréquence d'échantillonnage f_e soit au moins égale au double de la fréquence maximale f_{max} ... ».*

1. Les sons audibles par l'Homme ont des fréquences comprises entre 20 Hz et 20 kHz environ. Les sons de plus hautes fréquences seront donc correctement échantillonnés si la fréquence d'échantillonnage vaut au moins $2 \times 20 = 40$ kHz, ce qui est le cas pour un enregistrement de qualité CD pour lequel $f_e = 44,1$ kHz.

On n'utilise pas une fréquence d'échantillonnage plus importante pour limiter les données enregistrées afin que la durée totale d'enregistrement soit la plus grande possible.

2. Résolution : $R = \frac{120}{D} = \frac{120}{60} = 2,0''$.

Échantillonnage optimal = $\frac{R}{2} = \frac{2,0}{2} = 1,0''/\text{pixel}$.

Focale : $f = \frac{206 \times 5,6}{1,0} = 1,2 \times 10^3$ mm.

La focale de la lunette doit ici être adaptée à 1 200 mm environ pour que l'échantillonnage de l'image soit optimal.

3. Analogies et différences :

	Son	Image
Signal analogique de départ	son capté par le microphone	image formée sur le capteur CCD
Échantillonnage	fréquence d'échantillonnage (Hz) : fréquence des prélèvements des valeurs du signal analogique → échantillonnage dans le temps	échantillonnage (°/pixel) : portion angulaire de l'espace correspondant à un pixel → échantillonnage spatial
Limitation	domaine des fréquences audibles par l'Homme	résolution de l'instrument d'observation (lié à la diffraction)
Critère	$f_e \geq 2f_{\max}$	échantillonnage optimal = $\frac{R}{2}$
Compromis	f_e pas trop grande pour limiter l'espace mémoire nécessaire	champ de la photographie pas trop petit : on se place à l'échantillonnage optimal

Sur le doc 1 :

- à gauche : les photosites du capteur sont trop grands pour discerner tous les détails de l'image (la résolution du capteur est inférieure à la résolution de l'instrument) : l'image numérique paraît fortement pixellisée ;
 - à droite : les détails se répartissent sur plusieurs pixels voisins (la résolution du capteur est supérieure à la résolution de l'instrument) : la luminosité et le champ de la photographie sont réduits.
-