

1905 : UN NOUVEL ESPACE UN NOUVEAU TEMPS

Galilée et Maxwell sont deux physiciens qui, à trois siècles d'intervalle, ont posé les bases de deux branches de la physique : la mécanique dite « classique » pour le premier, l'électromagnétisme pour le second. Nous allons voir comment la confrontation de ces deux théories a conduit les physiciens du XX^{ème} siècle à rénover leurs théories et modèles.

La mécanique de Galilée (1564 – 1642) :



« La vitesse d'un objet dépend du référentiel dans lequel elle est mesurée. »

L'électromagnétisme de Maxwell (1831 – 1879) :



La lumière est une onde électromagnétique.
La théorie des ondes électromagnétiques de Maxwell permet de prévoir théoriquement sa célérité indépendamment du référentiel d'étude. Cette induit donc que *quel que soit le référentiel d'étude et quelle que soit la vitesse de la source* : $c = 299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

1^{ère} partie : Fin du XIX^{ème} siècle, deux théories se contredisent

Nous allons voir dans cette partie, pourquoi l'électromagnétisme de Maxwell est incompatible avec la relativité galiléenne.

► Conséquences du principe de relativité galiléenne :

- 1) On considère un TGV qui avance à une vitesse $v = 300\text{ km}\cdot\text{h}^{-1} = 83,3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ par rapport au sol. Le passager est assis sur un siège. Peut-on affirmer que « le passager est immobile » ? Que peut-on affirmer exactement ?
- 2) Le passager, pour se rendre à la voiture bar, marche vers l'avant du train à une vitesse de $5\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Quelle est sa vitesse par rapport au train ? par rapport au sol ?
- 3) Même question, lorsque le passager quitte la voiture bar pour retourner à sa place.

► Galilée et la vitesse de la lumière :

Le passager précédent, toujours dans le TGV, est à nouveau assis, il regarde dans le sens contraire au sens de la marche du TGV. Il allume une lampe de poche pour éclairer un document placé devant lui.

- 4) **Prévision d'après la relativité galiléenne** : si on étend le principe de relativité galiléenne à la lumière, à quelle vitesse la lumière émise par la lampe se propage-t-elle par rapport au TGV ? Par rapport au sol ?
- 5) Expliquer pourquoi la réponse précédente n'est pas compatible avec la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell.

2^{ème} partie : L'hypothèse de l'« éther »

Nous avons vu qu'à la fin du XIX^{ème} siècle, les lois de l'électromagnétisme ne semblent pas valables dans tous les référentiels. Cela suggère qu'il existe un référentiel « absolu », le seul dans lequel les lois de l'électromagnétisme sont valables. Mais cela est en totale contradiction avec le principe de Galilée !

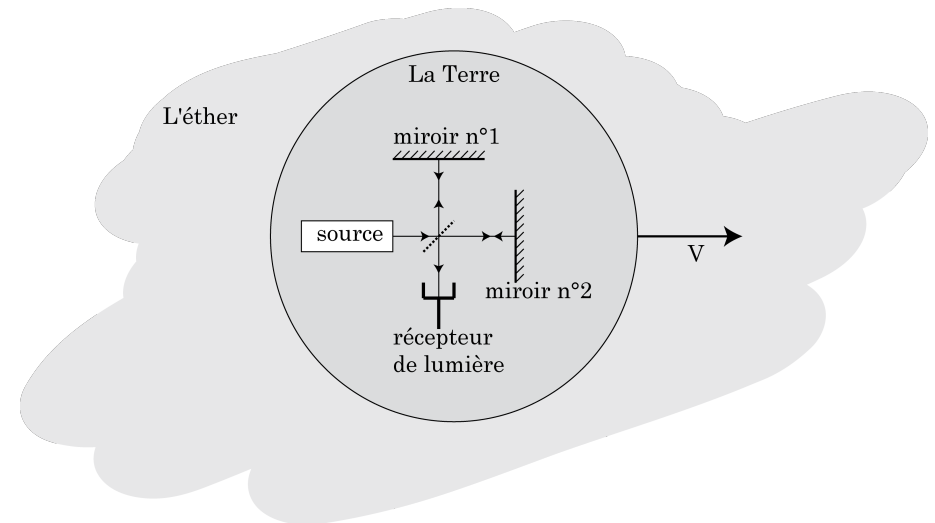
La plupart des physiciens ont fait cette proposition :

On conserve le principe de Galilée, donc on corrige la théorie des ondes électromagnétiques. Ils ont énoncé 3 hypothèses :

- Il existe un fluide appelé l'« éther », immobile et tellement peu dense que les objets (planètes, etc.) peuvent s'y déplacer sans être freinés.
- L'éther est le référentiel absolu : la théorie des ondes électromagnétiques n'est valable que par rapport à l'éther, donc **la célérité de la lumière vaut $c = 299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ seulement par rapport à l'éther.**
- La célérité de la lumière, dans un référentiel en mouvement par rapport à l'éther, se calcule selon le théorème d'addition des vitesses de Galilée.

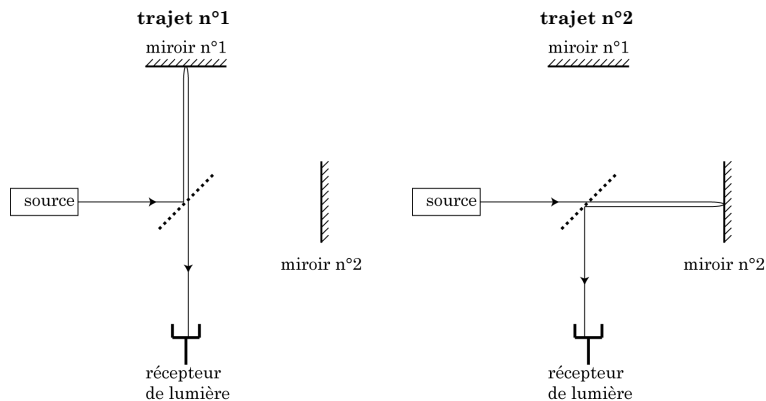
L'expérience de Michelson et Morley :

Deux physiciens, Michelson et Morley, ont alors entrepris de mesurer la vitesse de la Terre par rapport à l'éther. Ils ont pour cela conçu le système schématisé ci-dessous, appelé « interféromètre », composé d'une source de lumière, de deux miroirs et d'une lame semi-réfléchissante, posé horizontalement sur le sol terrestre. Ils étaient partisans de l'idée selon laquelle la Terre était en mouvement à la vitesse V dans l'éther, fluide immobile :



Bien sûr ce schéma ne respecte aucune échelle mais l'orientation du dispositif par rapport à la vitesse de la Terre est respectée.

Dans l'interféromètre la lumière était divisée en deux faisceaux qui suivaient l'un ou l'autre de ces trajets :



Les deux miroirs étaient à égale distance de la lame semi-réfléchissante. Enfin, l'interféromètre permettait, grâce au phénomène d'interférences lumineuses (que nous n'étudions pas ici), de mesurer l'écart de temps τ entre le parcours 1 et le parcours 2 de la lumière. Voir aussi les deux animations :

http://galileoandinstein.physics.virginia.edu/more_stuff/flashlets/mmexpt6.htm
<http://www.kcvs.ca/site/projects/specialRelativity.html>

► Questions :

- 1) Selon l'hypothèse de l'éther, la lumière a-t-elle une célérité de valeur c par rapport à la terre ? Pourquoi ?
- 2) Expliquer pourquoi Michelson et Morley s'attendaient à mesurer un écart de temps entre les 2 parcours possibles de la lumière. Rédiger un court paragraphe mais aucun calcul n'est demandé.

3ème partie : la fin de l'hypothèse de l' « éther » et la relativité d'Einstein

L'expérience de Michelson et Morley n'eut pas le résultat attendu par ses auteurs. Elle eut beau être renouvelée, améliorée, etc. : l'écart de temps mesuré était toujours rigoureusement nul. Pour Einstein, la notion de référentiel absolu n'avait aucun sens : il lui semblait incohérent que la mécanique puisse obéir à certaines lois et l'électromagnétisme à d'autres lois. C'est essentiellement pour cette raison, semble-t-il, qu'il énonça en 1905 un postulat qui allait bouleverser la physique :

Le postulat d'Einstein (1870 – 1952) :



« La vitesse de la lumière est une constante absolue. Elle se propage à la même vitesse: $c = 299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pour tous les observateurs. »

► Questions :

- 1) Répondre à nouveau à la question 4) de la première partie en admettant cette fois le postulat d'Einstein et non plus celui de Galilée.
- 2) Montrer que le postulat d'Einstein permet d'interpréter le résultat de l'expérience de Michelson et Morley.
- 3) Expliquer pourquoi le concept d' « éther » n'est ainsi plus pertinent selon Einstein.

- 4) Ce postulat, à partir de 1905, a conduit les physiciens à corriger certaines théories admises jusqu'alors. Est-ce l'électromagnétisme de Maxwell ou la mécanique de Galilée qu'il a fallu corriger ?

4ème partie : Les muons

Document 1 :

Sur Terre, les muons sont produits par la désintégration de pions chargés. Les pions sont créés dans la haute atmosphère par des rayons cosmiques et ont un temps de vie faible (environ deux microsecondes). Cependant, les muons ont une grande énergie, **ainsi l'effet de dilatation temporelle décrite par la relativité restreinte les rend observables à la surface de la Terre.** En effet, si on appelle Δt_0 le temps propre du muon et Δt_m ce temps mesuré depuis la Terre :

$$\Delta t_m = \gamma \times \Delta t_0, \text{ avec : } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \text{et} \quad \beta = \frac{v}{c} \quad (\text{facteur de Lorentz}).$$

Document 2 :

Les muons ont une durée de vie courte (environ deux microsecondes), mais on peut les faire vivre plus longtemps! En effet, cette durée de vie Δt_0 est mesurée « du point de vue » du muon (dans son référentiel). D'après la théorie de la relativité restreinte, si ce muon se déplace à une très grande vitesse par rapport à un observateur, ce dernier mesurera des temps Δt_m plus longs que ceux « vus du muon ». Ainsi, les muons cosmiques, très rapides, ont une durée de vie nettement supérieure aux quelques microsecondes attendues quand on mesure celle-ci dans le référentiel terrestre.

<http://quarks.lal.in2p3.fr/afficheComposants/Images/clicmuon.pdf>

► Questions:

- 1) Quelle est la valeur moyenne de la durée de vie des muons ?
- 2) Quelle distance devraient-ils parcourir en moyenne dans le cadre de la mécanique classique si leur vitesse est $v = 0,995c$?
- 3) Déterminer la valeur moyenne de la durée de vie des muons mesurée dans le référentiel terrestre dans le cadre de la mécanique relativiste.
- 4) En déduire la distance moyenne parcourue réellement par les muons dans l'atmosphère.
- 5) Expliquer la phrase du document 1 : *«...ainsi l'effet de dilatation temporelle décrite par la relativité restreinte les rend observables à la surface de la Terre. »*

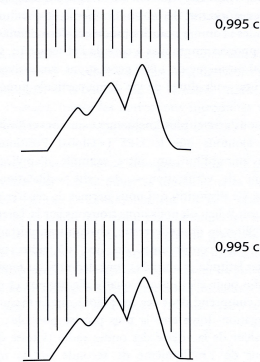


Figure V-3. Dilatation de la durée de vie des muons

Les traits verticaux représentent les trajectoires parcourues par les muons avant de se désintégrer. D'après les prévisions de la mécanique classique (figure du haut) les muons se désintègrent pratiquement tous dans la haute atmosphère. En leur prévoyant une durée de vie beaucoup plus longue, la théorie relativiste explique leur détection jusqu'au niveau de la mer.

CORRIGÉ DE LA QUATRIÈME PARTIE:

Muons

Eléments de réponse :

- Quelle est la valeur moyenne de la durée de vie des muons ?

La durée de vie propre de la particule (c'est à dire son temps moyen d'existence « à sa propre montre ») peut être mesurée en laboratoire. On constate que cette durée de vie propre est de l'ordre de $\Delta t_0 = 2 \mu\text{s}$.

- Quelle distance devraient-ils parcourir en moyenne dans le cadre de la mécanique classique si leur vitesse est voisine de $0,995c$?

Si les durées étaient invariantes par changement de référentiel, pendant cette durée de vie propre, le muon parcourrait : $d = \Delta t_0 \times 0,995 c = 600 \text{ m}$ environ.

- Déterminer la valeur moyenne de la durée de vie des muons mesurée dans le référentiel terrestre dans le cadre de la mécanique relativiste.

Dans le référentiel terrestre, la durée moyenne de vie du muon est $\Delta t = \gamma \Delta t_0$, avec $\gamma = (1 - 0,995^2)^{-0,5} = 10$ donc $\Delta t = 20 \mu\text{s}$.

- En déduire la distance moyenne parcourue réellement par les muons dans l'atmosphère.

Il parcourt donc une distance moyenne $d = \Delta t \times 0,995 c = 6000 \text{ m}$ environ.

- Expliquer la phrase du document 1 : « ...ainsi l'effet de dilatation temporelle décrite par la relativité restreinte les rend observables à la surface de la Terre. »

Sans considération relativiste, le nombre de muons atteignant la surface de la Terre devrait être négligeable car ils sont produits dans la haute atmosphère avec une courte durée de vie.

L'effet de dilation du temps prévu par la théorie de la relativité permet d'expliquer pourquoi le flux de muons est parfaitement détectable sur Terre au niveau de la mer.