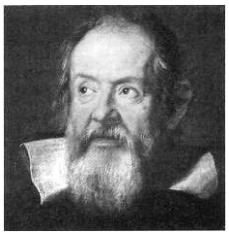
TS-RELATIVIE RESTREINTE

1905 : Pourquoi il fallait changer les lois de la physique?

- 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) :



Principe de « relativité galiléenne » :

La vitesse d'un système ne peut être définie que relativement à un référentiel.
Il n'existe pas de référentiel « absolu » : les lois de la physique sont les mêmes dans tous les référentiels galiléens. Si une expérience de mécanique est conduite et étudiée dans un référentiel galiléen, son résultat ne dépend pas de la vitesse de ce référentiel.
Ce principe sert de fondement à la mécanique de Newton.
En physique classique le temps s'écoule de la même façon quel que soit le référentiel d'étude.

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. Cela induit que *quel que soit le référentiel d'étude et quelle que soit la vitesse de la source :*
$c = 299\,792\,458\ m.s^{-1}$

I. 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.

1. Conséquences du principe de relativité galiléenne

1.1. On considère un TGV Est qui avance à une vitesse $v = 306\ km.h^{-1} = 85\ m.s^{-1}$ par rapport au sol. Le passager est assis sur un siège. Peut-on affirmer que « le passager est immobile » ? Que peut-on affirmer exactement ?

1.2. Le passager, pour se rendre à la voiture bar, marche vers l'avant du train à une vitesse de 5 $km.h^{-1}$. Quelle est sa vitesse par rapport au train ? Par rapport au paysage ?

1.3. Même question, lorsque le passager quitte la voiture bar pour retourner à sa place.

2. 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.

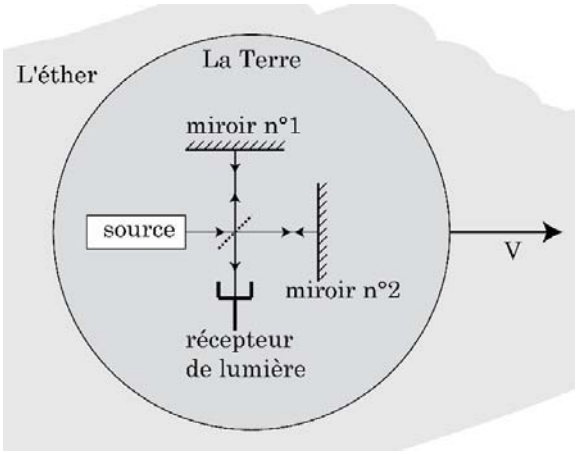
2.1. **Prévision d'après la relativité galiléenne** : si on étend le principe de relativité galiléenne à la lumière, à quelle vitesse la lumière émise par la lampe se propage-t-elle par rapport au TGV ? Par rapport au paysage ?

2.2. Expliquer pourquoi la réponse précédente n'est pas compatible avec la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell.

II. L'hypothèse de l' « éther »

- Pour sortir de cette impasse les physiciens choisissent de conserver les deux théories
- Ils admettent que le principe de Galilée reste valable pour la mécanique mais pas l'électromagnétisme.
- Ils font l'hypothèse que la lumière a besoin d'un support pour se propager et qu'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 serait le référentiel absolu : la théorie des ondes électromagnétiques n'est valable que par rapport à l'éther, donc **la célérité de la lumière vaut $c = 299\,792\,458\ m.s^{-1}$ 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-contre, 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 dont l'un fait un aller-retour dans une direction perpendiculaire au déplacement de la Terre (miroir 1) et l'autre dans une direction parallèle (miroir 2), les deux miroirs étaient à égale distance de la lame semi-réfléchissante.
- Enfin, l'interféromètre permettait, grâce au phénomène d'interférences lumineuses, de mesurer l'écart de temps τ entre le parcours 1 et le parcours 2 de la lumière. Ces parcours pouvaient être inversés par rapport à la vitesse de la Terre en tournant le dispositif d'un quart de tour.
- 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.

1) Quelle conclusion sur la vitesse de la lumière peut-on tirer de l'expérience de Michelson et Morley ?
2) Quelle loi n'est plus valide pour les ondes lumineuses ?
3) Que peut-on dire de la vitesse de la lumière dans le vide ?

1905 : la fin de l'hypothèse de l'« éther » et la relativité d'Einstein

- Albert Einstein a toujours prétendu avoir ignoré les travaux de Michelson et Morley. Pour lui, 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) :

En 1905, Einstein va étendre le principe de relativité de Galilée à toutes les lois physiques. Il publie la théorie de la relativité restreinte qui repose sur deux postulats :
« Les lois de la physique sont les mêmes dans tous les référentiels galiléens ».
« La vitesse de la lumière dans le vide est indépendante du référentiel d'étude et vaut c = 299 792 458 $m.s^{-1}$ par rapport à tout référentiel galiléen ».
Les postulats d'Einstein sont aujourd'hui toujours admis : aucune expérience n'est jamais venue les remettre en cause.

III. Caractère relatif du temps

Dans toutes les études qui suivent, on néglige l'effet de la pesanteur et on considère des objets (fusées) en mouvement rectiligne uniforme par rapport à la Terre dans le vide. Les référentiels des fusées et de la Terre sont donc considérés Galiléens. C'est la relativité "restreinte" à ces conditions.

1. Notion d'événement

Un événement est un fait se produisant en un point de l'espace à un instant donné. La durée séparant deux événements dépend du référentiel d'observation. Deux événements simultanés dans un référentiel ne le sont en général pas dans un autre référentiel.

2. Temps propre

Le référentiel propre R_0 d'un objet est le référentiel dans lequel cet objet est immobile.
Le temps propre ou durée propre Δt_p est la durée, séparant 2 événements, ayant lieu au même endroit dans un référentiel galiléen. Cette durée est mesurée par une seule horloge dans ce référentiel où ont lieu les 2 événements.

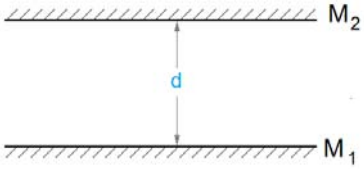
3. Temps mesuré

On considère un référentiel R en mouvement de translation rectiligne à la vitesse v par rapport au référentiel propre R_0. R et R_0 sont en mouvement relatif, donc R_0 va aussi à la vitesse v par rapport à R.
Le temps mesuré ou durée mesurée Δt_m est la durée, séparant 2 événements, mesurée dans un référentiel galiléen R en mouvement relatif par rapport au référentiel propre R_0. Les horloges qui mesurent Δt_m sont fixes dans R (pas une seule horloge mais 2 horloges différentes).

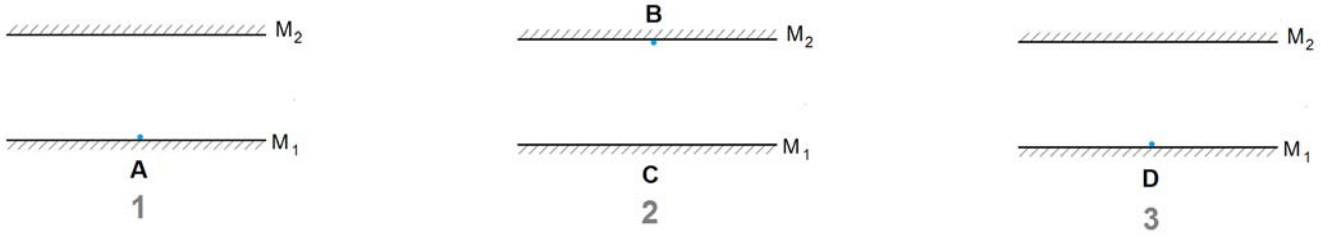
4. Dilatation des durées

Démonstration : sous forme de questions associées au diaporama projeté

1) Énoncer le postulat d'Einstein à propos de la vitesse de la lumière dans le vide. (2ème postulat)
2) On considère le montage optique utilisé par O' constitué de 2 miroirs plans parallèles entre eux et distants de *d*. (Voir ci-contre).
   Exprimer la distance d parcourue par le photon, en fonction de la durée Δt', mesurée par l'observateur O', nécessaire au photon pour effectuer le parcours $M_1M_2M_1$.



3) L'observatrice O observe le système des 2 miroirs se déplaçant sur Ox à la vitesse v. En position 1, le photon est en A sur M_1 ; en 2 le photon est en B sur M_2 et en 3 il est en D sur M_1.Ajouter sur le schéma la trajectoire du photon vu par O.



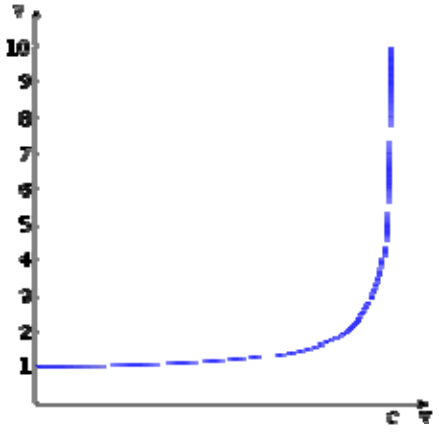
4) Quelle est la vitesse du photon mesurée par l'observatrice O ? Soit Δt la durée mesurée par l'observatrice pour que le photon parcourt le trajet ABD. Justifier le fait que Δt' soit différent de Δt.
5) Exprimer la distance AB parcourue par le photon en fonction de Δt et de c.
6) Exprimer la distance AC mesurée par O en fonction de v, vitesse de la fusée et de Δt durée nécessaire pour que celle-ci aille de la position 1 à la position 3.
7) A l'aide du théorème de Pythagore, exprimer AB^2 en fonction de AC^2 et d^2.
8) En déduire Δt^2 en fonction de $\Delta t'^2$ et de $\frac{v^2}{c^2}$
9) Des 2 durées Δt et Δt' mesurées : quelle est la durée propre ?
10) Quelle est l'unité de $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$?
11) Comparer γ avec le nombre 1.
12) Comparer la durée propre avec l'autre durée.
13) Calculer γ pour v=3 km/s ($v/c=10^{-5}$).Quelle remarque peut on faire ?
14) Calculer γ pour v/c=1/2 et v/c=0,95

A retenir :

Le temps propre Δt_p et le temps mesuré Δt_m sont liés par la relation :

$$\boxed{\Delta t_m = \gamma \Delta t_p} \quad \textbf{avec} \quad \boxed{\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}}$$

γ facteur de Lorentz ou coefficient de dilatation du temps (sans dimension).
v vitesse relative d'un référentiel par rapport à l'autre, v<c donc γ>1.



Pour v<<c, γ≈1 : on retrouve la physique newtonienne.
Le relativité restreinte a des conséquences uniquement sur les objets ayant des vitesses **proches de celle de la lumière** dans le vide.
Ex : pour v=0,866c (courant en physique des particules), γ=2

Conséquence : $\boxed{\Delta t_m \geq \Delta t_p}$ ***la durée mesurée est toujours plus grande (ou égale) que la durée propre. C'est la dilatation du temps.***
Une horloge en mouvement retarde par rapport à une horloge fixe.

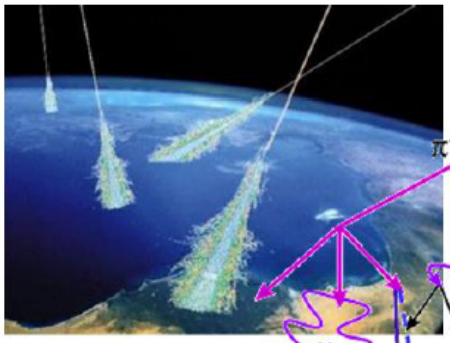
IV. Applications

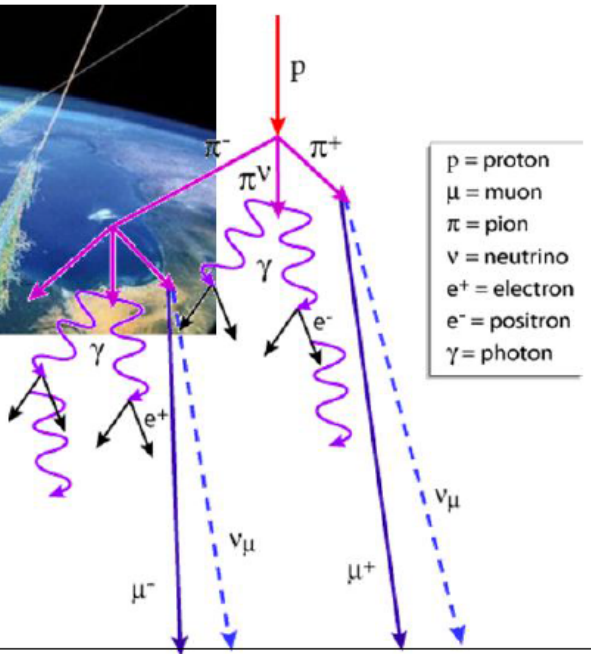
1- Voyages dans l'espace **Suite du diaporama**

1. Noter précisément les durées Δt et Δt' du voyage Terre-Mars mesurées par O et O', calculer γ.
2. En déduire la vitesse v de la fusée
3. Calculer la distance Terre-Mars mesurée par l'observatrice O lors de ce voyage.
4. Quelle heure est-il dans la fusée au passage du système Jovien?
5. En quelle année A la fusée a-t-elle quitté la Terre ?
6. Pour quel observateur O ou O' y-a-t-il dilatation du temps ?

2- Les muons

Le muon est une particule qui porte la même charge électrique que l'électron, mais avec une masse 207 fois plus grande, c'est pourquoi on l'appelle aussi électron lourd.
Les muons sont produits par l'interaction entre les rayons cosmiques émis par le Soleil et la haute atmosphère de la Terre, à une altitude d'environ 10 km.



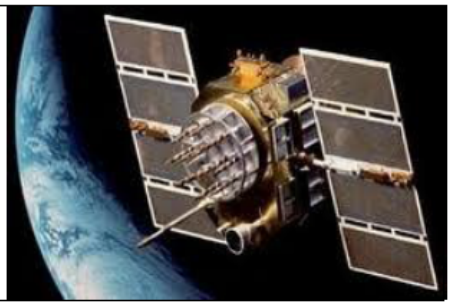


Un muon au repos se désintègre en moyenne au bout d'une durée de valeur t = 2,2 µs. Les muons émis dans la haute atmosphère le sont avec une vitesse égale à 99,8 % de la célérité de la lumière dans le vide. On peut considérer cette vitesse comme constante.
On considère souvent que le fait de pouvoir détecter des muons à la surface de la Terre est une preuve expérimentale de la dilatation des durées. Cette partie propose de comprendre cette affirmation.

1) Calculer la distance parcourue par un muon pendant 2,2 µs.
2) Pourquoi le fait que des muons parviennent à la surface de la Terre est-il une preuve expérimentale de la dilatation des durées ?
3) En tenant compte de la dilatation des durées, calculer la distance que parcourt, en moyenne, un muon, avant de se désintégrer. On prendra bien soin de définir les événements considérés et durée propres et durée mesurée depuis la Terre. Montrer que ce calcul permet d'interpréter le fait de pouvoir détecter des muons à la surface de la Terre.

3-le GPS

Des satellites en orbite circulaire gravitent autour de la Terre à plus de vingt mille kilomètres d'altitude, à une vitesse d'environ quatorze mille kilomètres par heure.Chaque satellite possède une horloge atomique embarquée et émet des signaux électromagnétiques qui contiennent des informations sur la position et la date exacte où ils ont été émis.
Un récepteur GPS, au sol, doit recevoir au moins quatre signaux de quatre satellites différents pour pouvoir se localiser. Alors la comparaison de la date de réception et de la date d'émission permet au récepteur de calculer la distance qui le sépare de chaque satellite. Grâce à un calcul appelé « triangulation », il peut ainsi déterminer sa position sur le sol terrestre à 10m près.



1) Donner la précision avec laquelle un GPS permet de se localiser.
2) Le mouvement du satellite n'étant pas rectiligne, on admettra que le temps propre est défini par l'horloge embarquée à bord du satellite.
Expliquer qualitativement comment la relativité prévoit que l'horloge atomique embarquée à bord du GPS retarde par rapport à la même horloge restée au sol.
3) Calculer le retard τ accumulé en une journée terrestre par l'horloge embarquée à cause de l'effet relativiste évoqué à la question précédente.
4) Calculer l'erreur Δd faite par le récepteur GPS s'il calcule la distance qui le sépare du satellite sans tenir compte du retard pris par son horloge au bout d'une journée. À votre avis, peut-on considérer Δd comme « négligeable » ?
5) Einstein a publié, en 1915, la relativité générale. Cette théorie, comme son nom l'indique, généralise la relativité restreinte à toutes les situations. En particulier cette théorie montre que le champ de pesanteur terrestre est lui aussi responsable d'un décalage entre l'horloge embarquée et celle restée au sol. Ce décalage est contraire à celui dû à la vitesse du satellite (calculé en c) . On montre que le champ de pesanteur terrestre est responsable chaque jour d'une avance de 45 µs de l'horloge embarquée par rapport à celle restée au sol.
En tenant compte des deux effets relativistes, calculer le décalage temporel total T entre les deux horloges accumulé en une journée. En déduire l'erreur Δdtot commise par le récepteur GPS s'il ne tient pas compte des effets relativistes. Montrer que ce calcul justifie la nécessité de prendre en compte la relativité pour concevoir un récepteur GPS.(animation GPS sur ENT)