

Chapitre 10 : Temps et relativité restreinte.

La mécanique de Galilée (1564 – 1642) :



« 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.

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 théorie induit donc que quel que soit le référentiel d'étude et quelle que soit la vitesse de la source, $c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



Fin du XIX^{ème} siècle : deux théories se contredisent

► Conséquences du principe de relativité galiléenne :

(a) On considère un TGV qui avance à une vitesse $v = 300 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ par rapport au sol. Le passager est assis sur un siège.

Peut-on affirmer que « le passager est immobile » ? Que peut-on affirmer exactement ?

(b) 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 ?

(c) 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.

(d) **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 ?

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

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

Pour Albert Einstein (1870 – 1952), 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 :



Les lois de la physique sont les mêmes dans tout référentiel galiléen. La vitesse de la lumière dans le vide est indépendante du référentiel d'étude et vaut: $c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ **par rapport à tout référentiel galiléen.**

► Questions :

(a) Répondre à nouveau à la question (1.d) en admettant cette fois le postulat d'Einstein et non plus celui de Galilée.

(b) Le postulat d'Einstein est aujourd'hui toujours admis : aucune expérience n'est jamais venue le remettre en cause. 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 ?

1964 : l'expérience d'Alvager

Cette expérience, faite au CERN en 1964 utilise un faisceau de pions neutres π^0 ; ils sont produits par l'action de protons de haute énergie sur une cible en Béryllium. Ces pions, d'une énergie de 6 GeV, ont une vitesse voisine de $0,999\,75\,c$. Cette particule instable a une durée de vie de l'ordre de $0,84 \cdot 10^{-16} \text{ s}$, elle se désintègre en deux photons γ selon l'équation : $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$. On dispose ainsi d'une source de lumière qui se déplace à une vitesse de $0,999\,75\,c$ par rapport au référentiel du laboratoire. Les expérimentateurs ont mesuré le temps mis par des « paquets » de photons pour parcourir les $31,450 \pm 0,0015 \text{ m}$ qui séparaient deux détecteurs A et B, cette durée était d'environ $104,9 \text{ ns}$. Ils ont eu ainsi accès à la valeur de la vitesse des photons gamma et ont constaté qu'elle était égale à 10^{-4} près à celle mesurée lorsque la source est fixe.

► Questions :

(a) Calculer la vitesse des pions.

(b) A partir des données, calculer la vitesse des photons créés.

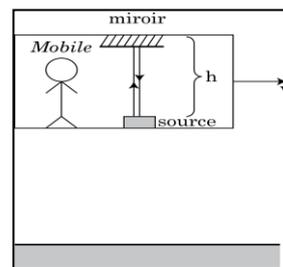
(c) En quoi cette expérience valide le postulat d'Einstein ?

2014 : comment nous devons redéfinir la notion de durée.

On envisage l'expérience de pensée suivante : Un véhicule non identifié avance à la vitesse v par rapport au sol. Dans ce véhicule, un expérimentateur nommé « Mobile » a placé une source de lumière et, à sa verticale, un miroir à une hauteur h . Il allume la source et chronomètre le temps mis par la lumière pour effectuer un aller-retour.

(a) On considère un aller-retour de la lumière. On suppose que la lumière, dans l'air comme dans le vide, se propage avec la célérité c constante.

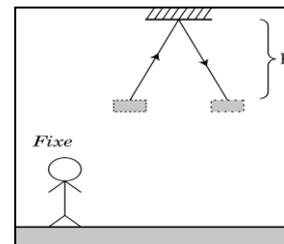
Exprimer la durée Δt de ce parcours en fonction de la célérité c de la lumière et de la hauteur h .



Un autre observateur appelé *Fixe*, est placé, lui, au sol. Il observe l'expérience réalisée par *Mobile* et mesure sa durée. Il obtient une valeur notée $\Delta t'$.

Du fait du mouvement du véhicule on peut représenter ainsi la manière dont il perçoit le parcours de la lumière :

(b) On admet le postulat d'Einstein. Expliquer, sans faire de calcul, pourquoi ce postulat implique que la durée du parcours mesurée par *Fixe* est supérieure à celle mesurée par *Mobile*.



On va maintenant relier entre elles les durées mesurées par chacun des deux observateurs.

(c) On note d' la distance que la lumière a parcourue, vue par *Fixe*. Exprimer d'^2 en fonction de h , v et $\Delta t'$ puis en fonction de c , v , Δt et $\Delta t'$.

(d) On combinant les résultats (a) et (c), établir la relation :

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

(e) Cette relation bouleverse la notion de temps. En particulier, elle suggère qu'une même expérience a duré plus longtemps pour l'un des deux observateurs que pour l'autre : lequel et pourquoi ?

Le temps propre ou durée propre (ΔT_0) est le temps séparant deux événements ayant lieu au même endroit, mesuré par une horloge proche des événements.

Le temps mesuré ($\Delta T'$) est la durée séparant deux événements par une horloge fixe.

Le temps mesuré est plus grand que le temps propre.

Faut-il oublier la physique de Newton ?

La théorie qui précède celle d'Einstein, en mécanique, est la physique de Newton. On l'a vu dans la partie précédente, une des corrections apportées par la relativité concerne la mesure des durées.

On va étudier, dans cette partie, dans quelle mesure la correction apportée par la relativité modifie le résultat des prévisions par rapport à la physique de Newton.

(a) Le facteur $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ permet d'évaluer l'écart entre la durée mesurée par une horloge embarquée et

celle mesurée par une horloge immobile. On l'appelle facteur de Lorentz. Calculer et rassembler dans un tableau les valeurs de γ pour des horloges liées aux systèmes suivants :

- un TGV qui avance à $300 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ par rapport au sol terrestre ;
- l'Airbus A380, à la vitesse de $900 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ par rapport au sol terrestre ;
- la fusée Ariane 5, à la vitesse de $8000 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ par rapport au centre de la Terre ;
- Apollo 11, à la vitesse de $40\,000 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ par rapport au centre de la Terre ;
- un proton sortant de l'accélérateur du PSI à une vitesse égale à 79% de celle de la lumière dans le vide ;
- un proton sortant de l'accélérateur du LHC à une vitesse égale à 99,9999991% de celle de la lumière.

Exploiter les valeurs obtenues pour déterminer, parmi les situations évoquées, celle(s) qui appartiennent au champ de validité de la physique de Newton et celle(s) qui ne sont correctement interprétées que par la physique d'Einstein.

(b) À l'aide d'un tableur, tracer la courbe représentant γ en fonction de v , pour des valeurs de v comprises entre 0 et c .

(c) Pour quelle valeur de v le facteur de Lorentz modifie-t-il de 1% le résultat d'une mesure de durée par rapport à la prévision classique ?

(d) Expliquer en quoi ce graphique permet de comprendre que, dans de très nombreuses situations, la mécanique de Newton reste pertinente.