

Chapitre 1

Transformations et principe de relativité Galiléens

23-24



Plan:

1. Introduction
2. Lois de Newton
3. Référence inertiel
4. Transformation galiléenne et ses limites
 - a) Aberration stellaire

Au début du 20^{ème} siècle:

Physique mécanique

&

Electromagnétique

Développé indépendamment → pas de relation entre eux

Plus tôt, le physicien était confronté à de nombreux problèmes fondamentaux!

❖ Deuxième loi de Newton : $\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a} = \frac{d\vec{p}}{dt}$

Bien établi pour la basse vitesse **MAIS** ne donne pas de résultats corrects à haute vitesse $v \approx c$

❖ Pour 2 observateurs en mouvement relative, nous ne pouvons pas utiliser la même équation de transformation pour transférer les lois de la mécanique et de l'électromagnétique d'un référentiel à un autre.

Ces difficultés sont surmontées par la formulation de la théorie de la relativité d'Einstein

I.2 Lois de Newton

A- Principe de l'inertie:

En absence de force extérieure agissante sur lui, tout corps conserve son état de repos ou un mouvement rectiligne uniforme

$$\sum \vec{F}_{ext} = \vec{0}$$

Repos → Reste au repos

Déjà en Mvt → MRU

B- Principe fondamental de la dynamique :

$$\sum \vec{F}_{ext} = m \cdot \vec{a}$$

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$$



$$\sum \vec{F}_{ext} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt}$$



$$\sum \vec{F}_{ext} = \frac{d(m\vec{v})}{dt}$$

Dans le cas où la masse est constante

$$\sum \vec{F}_{ext} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

Où $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$ la quantité de mouvement

C- Principe de l'action et de la réaction ou loi de l'action-réaction:

Lorsque 2 corps A et B interagissent ils exercent un sur l'autre des forces opposées

$$\overrightarrow{F_{A/B}} = -\overrightarrow{F_{B/A}}$$

Repos → Reste au repos

Déjà en Mvt → MRU

D- Loi d'interaction gravitationnelle:

Toute masse attire toute autre masse de l'univers par une force de module égale à :

$$F = \frac{G \cdot m_1 \cdot m_2}{d^2}$$

m_1, m_2 : masses des 2 corps qui s'attirent

$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ (N.m}^2\text{.Kg}^{-2}\text{)}$, est la constante gravitationnelle

d : distance entre les centres des masses m_1 et m_2

1.3 Référence inertiel

Pour étudier n'importe quel phénomène, il faut un référentiel par rapport auquel on étudie le phénomène.

C'est le référentiel terrestre

Un référentiel est un corps matériel ou un point d'un corps, munie d'un repère mathématique et d'une horloge.

Un évènement est repéré dans un référentiel $(O; x, y, z)$ par un point $P(x, y, z, t)$

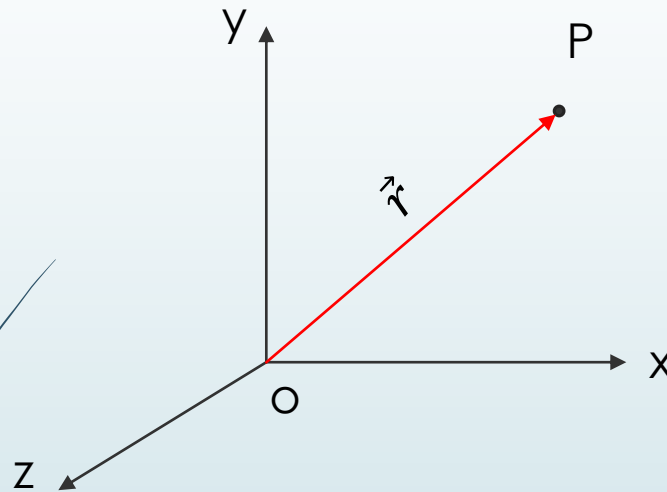
Repère
mathématique

horloge

**(x, y, z) : coordonnée spatiale
 t : coordonnée temporelle**

I.3 Notion de référentielle

A tout instant t la position de P est donnée par un vecteur position $\overrightarrow{OP} = \vec{r}(x, y, z)$



(x, y, z) : coordonnée spatiale

Dans ce qui suit on s'intéresse seulement à la translation du centre de masse d'un corps et on n'étudie pas la rotation

Un référentiel inertiel ou Galiléen (nommé ainsi en hommage à Galilée) est un référentiel dans lequel les lois de Newtons s'appliquent (en particulier la premier loi « loi d'inertie »)

I.4 – Transformation Galiléenne et ses limites

❖ Première loi de Newton :

Un objet au repos reste au repos et un objet en mouvement reste en mouvement à la même vitesse et dans la même direction **sauf si une force extérieure agit sur lui** (appelée aussi forces nettes ou forces déséquilibrées)

Cette loi est souvent appelée :

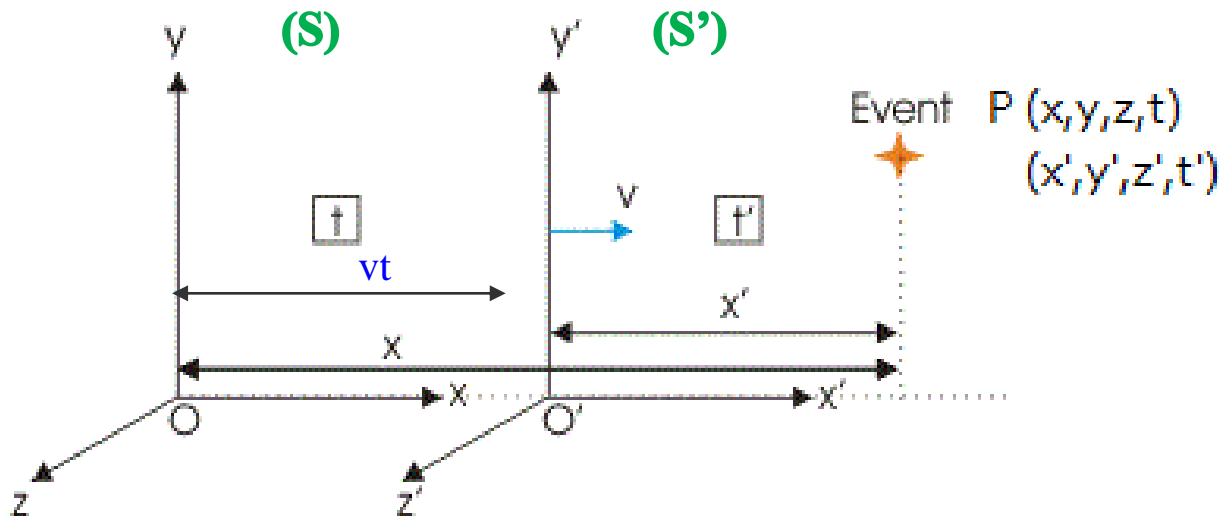
La loi de l'inertie

→ Le système est ainsi appelé : **Système inertiel**

Exemple: L'ensemble des axes de coordonnées attachés à la terre peut être considéré comme un système inertiel (nous négligeons les petites accélérations résultant du mouvement de rotation et orbital de la terre).

→ **Nous traiterons tout système qui se déplace avec une vitesse uniforme comme un système inertiel.**

Soit un événement se déroulant en un point P; P a pour coordonnées (x, y, z, t) dans S et (x', y', z', t') dans S' où **S et S' sont des systèmes inertiels en mouvement relatif uniforme**



- v selon l'axe xx' : $v_{O'/O}$
- l'origine des systèmes inertiels S et S' coïncide à $t = t' = 0$

➤ Ces coordonnées sont liées sous la transformation galiléenne:

$$\begin{cases} x = x' + vt \\ y = y' \\ z = z' \\ t = t' \end{cases}$$

ou

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases}$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_{O'/O}$$

➤ Transformation galiléenne de la vitesse :

$$v'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{d(x - vt)}{dt} = v_x - v$$

$$\begin{cases} \vec{v}'_x = \vec{v}_x - \vec{v} \\ \vec{v}'_y = \vec{v}_y \\ \vec{v}'_z = \vec{v}_z \end{cases}$$

$$\vec{v}_x = \vec{v}'_x + \vec{v}$$

➤ Transformation galiléenne de l'accélération :

$$a'_x = \frac{dv'_x}{dt'} = \frac{d(v_x - v)}{dt} = \frac{dv_x}{dt} = a_x$$

$$\begin{cases} a'_x = a_x \\ a'_y = a_y \\ a'_z = a_z \end{cases}$$

Sous forme de vecteur :

$$\vec{a} = \vec{a}'$$

Relativité de Newton: Nous supposons toujours que $t = t'$ et $\frac{d}{dt}$ et $\frac{d}{dt'}$ sont identiques

$$F_x = m \frac{d^2 x}{dt^2}; F_y = m \frac{d^2 y}{dt^2}; F_z = m \frac{d^2 z}{dt^2}$$

$$F'_x = m \frac{d^2 x}{dt^2}; F'_y = m \frac{d^2 y}{dt^2}; F'_z = m \frac{d^2 z}{dt^2}$$

La seconde loi de Newton est invariante sous la transformation galiléenne

➔ **Principe newtonien: pour tous les systèmes inertiels qui sont en mouvement relatif uniforme, l'équation du mouvement reste invariante**

L'Éther

Avant d'aller plus loin, il convient de parler d'une notion introduite au XIXe siècle pour expliquer un certain nombre de phénomènes physiques. L'expérience a montré que les ondes mécaniques, comme les ondes sonores par exemple, nécessitent un milieu matériel pour se propager. Les ondes électromagnétiques se propagent également dans certains milieux matériels, mais elles possèdent en outre la propriété très remarquable de se propager dans le vide. Les physiciens du XIXe siècle, et en particulier Fresnel, n'admettaient pas l'idée d'une propagation sans support matériel.

Ils imaginèrent donc un milieu hypothétique baignant tout l'univers, qu'ils baptisèrent *éter*, et dont les vibrations assuraient la propagation des ondes électromagnétiques dans le vide. L'idée qu'un « fluide » pouvait baigner tout l'univers fut introduite dès l'Antiquité. Aux « quatre éléments » (eau, air, terre et feu) supposés former le monde sublunaire ou monde terrestre, introduits par Empédocle et commentés par Platon, Aristote proposa d'ajouter un cinquième élément, *l'éther*, constituant inaltérable du monde céleste.

L'Éther

La lumière ne devait alors se propager avec une vitesse bien définie c , prédite par la théorie électromagnétique, que dans les milieux au repos par rapport à l'éther.

Remarquons que l'éther devait posséder des propriétés contradictoires : il ne devait offrir aucune résistance aux déplacements planétaires, mais pour transmettre des ondes transversales comme la lumière, il devait être pratiquement incompressible.

Vers 1880, les physiciens, pour qui l'éther restait le substrat indispensable à la propagation des rayons lumineux, vont imaginer un certain nombre d'expériences pour mettre en évidence son existence. Telle est l'origine de l'expérience, restée célèbre, de Michelson en 1881, renouvelée en 1887 par Michelson et Morley, et ultérieurement de nombreuses fois avec une précision sans cesse accrue.

I'Éther

Partant du principe que la Terre est en mouvement dans l'éther et que la vitesse de la lumière est constante par rapport à l'éther, Michelson suppose que la mesure de la vitesse de la lumière doit donner des résultats différents suivant l'orientation de la vitesse de la Terre par rapport à l'éther.

L'idée est alors d'essayer de mettre en évidence ces variations en faisant intervenir des phénomènes d'interférence lumineuse dont on connaît l'intérêt en métrologie lorsqu'on veut réaliser des mesures fines.

Hypothèse de l'existence d'un référentiel absolu

La théorie de Maxwell n'exigeait pas qu'il y ait un milieu pour la propagation des ondes électromagnétiques. Les physiciens ont jugé nécessaire d'attribuer un milieu pour supporter la lumière et d'autres ondes électromagnétiques : **l'éther**

Dans ce cadre (de la théorie de l'éther ou l'éther luminifère), l'hypothétique moyen de propagation des ondes lumineuses électromagnétiques doit également être au repos (supposition d'un éther immobile). Ce support supporte la lumière et d'autres ondes électromagnétiques

On supposait que l'éther remplissait tout l'univers (espace et vide).

Ils ont dû attribuer d'étranges propriétés à l'éther: celui-ci avait des propriétés élastiques pour soutenir les vibrations du mouvement des vagues.

Cet éther ne transmet que des vibrations transversales → il avait une très grande rigidité (donc les planètes et autres objets peuvent se déplacer librement dans l'éther)

Cet éther nous amène à 2 alternatives :

1. **L'hypothèse de l'éther stationnaire** : Nous supposons que l'éther est au repos par rapport aux corps qui le traversent, la vitesse de la lumière est toujours « c »
2. **L'hypothèse Ether-drag** : Nous supposons que l'éther est entraîné avec des corps qui le traversent.

➤ **Aberration stellaire** (hypothèse Ether-drag)

la variation de la direction apparente des étoiles à différents moment de l'année est appelée l'aberration de la lumière (1727 Bradley)

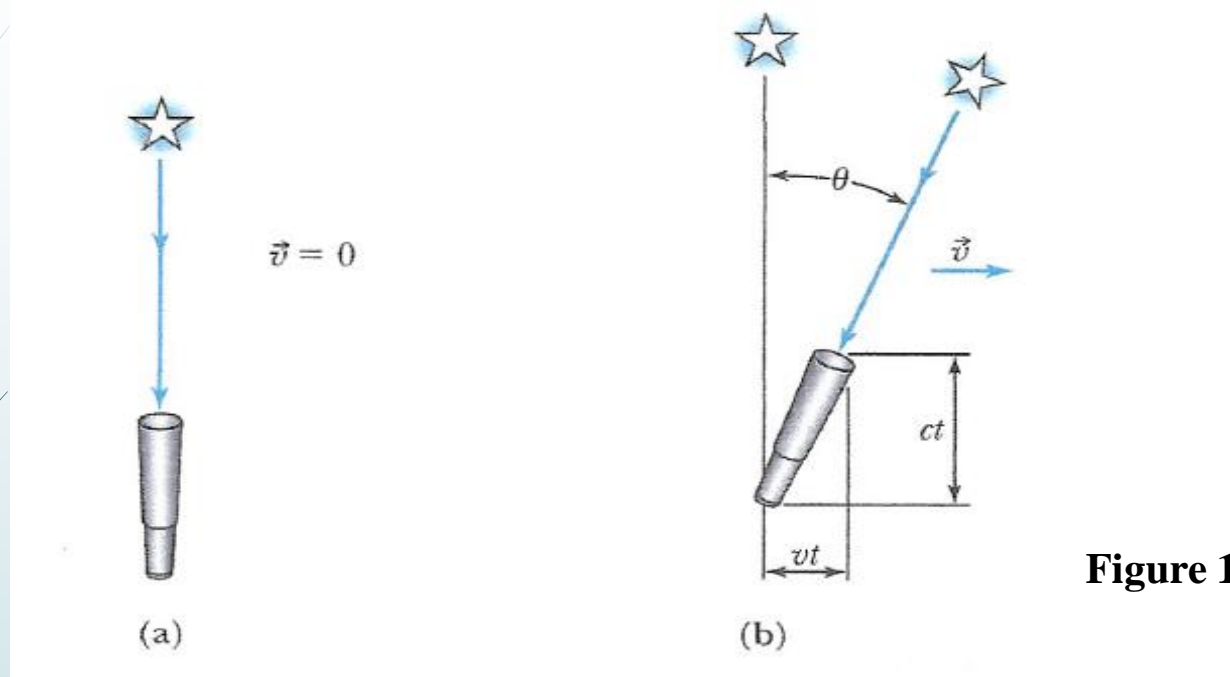


Figure 1

(a) Si le télescope et l'étoile sont au repos par rapport à l'éther, la lumière de l'étoile traverse directement le télescope. (b) Toutefois, si le télescope se déplace à la vitesse v (parce qu'il est solidaire de la Terre qui elle-même se déplace autour du Soleil), il doit être penché légèrement pour que la lumière traverse le télescope. Ceci conduit à un mouvement circulaire apparent de l'étoile vue du télescope, au fur et à mesure que le mouvement de la Terre autour du Soleil change au cours de l'année solaire. **Expérimentalement**, on constate que si l'on souhaite observer la lumière venant de l'étoile située au-dessus, le télescope doit être incliné d'un angle θ .

Mesure expérimentale de α :

→ Ainsi, s'il faut un temps t pour que la lumière se déplace de l'étoile au télescope, la lumière parcourt une distance verticale $c \cdot t$ alors que le télescope se déplace d'une distance horizontale $v \cdot t$, si bien que la tangente de l'angle α est donné par :

$$\tan \alpha = \frac{v \cdot t}{c \cdot t} = \frac{v}{c} = \frac{3 \times 10^4 \text{ m/sec}}{3 \times 10^8 \text{ m/sec}} \approx 10^{-4}$$

$$\Rightarrow \alpha = 20.5^\circ$$

Soit une ouverture angulaire de $2\alpha = 41^\circ$ au cours du mouvement de la Terre.

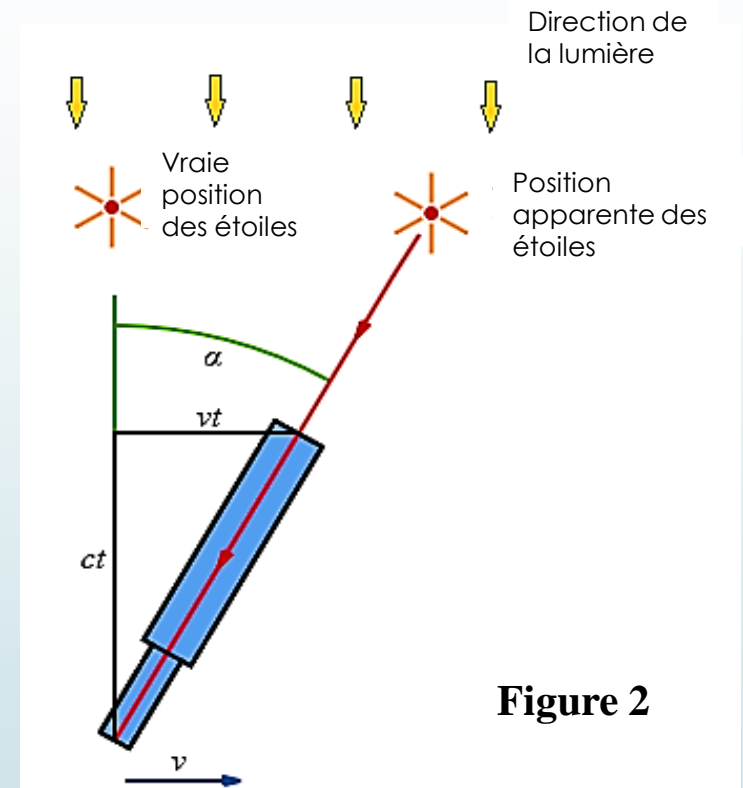
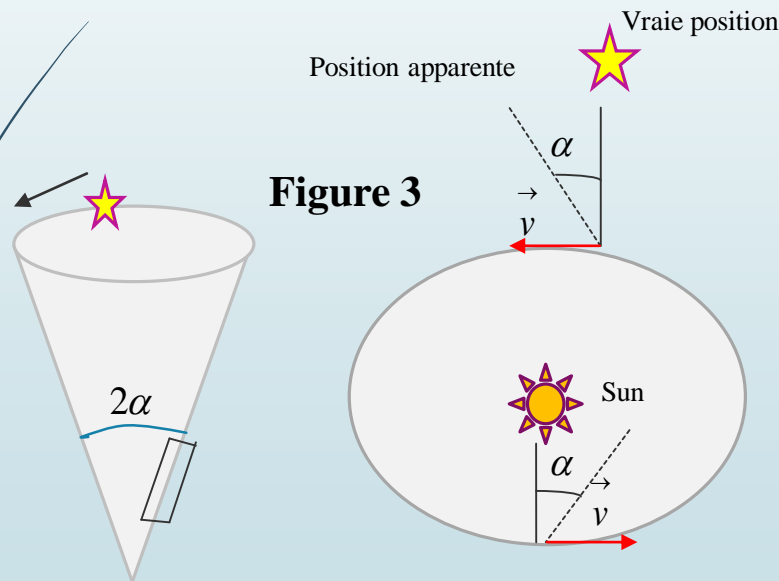


Figure 2

Mesure expérimentale de α :

En effet, l'aberration change de sens tous les 6 mois du fait du mouvement de la Terre autour du Soleil, ce qui donne en effet un mouvement circulaire de la position de l'étoile. Ces observations sont en désaccord avec l'hypothèse de l'entraînement de l'éther par la Terre. Si l'éther était entraîné par la Terre, il n'y aurait pas lieu de pencher le télescope !



$$\Rightarrow 2\alpha = 41 \rightarrow \alpha = 20.5^\circ$$

2α est le changement apparent de la position de l'étoile en 6 mois avec la position apparente de l'étoile sur une trajectoire circulaire

La Terre se déplace à travers un éther stationnaire avec une vitesse de 3×10^4 m / s (vitesse orbitale de la Terre) par rapport au référentiel éther au repos (**peut être considéré comme la référence absolue**)

- Après le développement de la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell, plusieurs expériences ont été réalisées pour prouver l'existence de l'éther et de son mouvement par rapport à la Terre.
- **La plus célèbre et la plus réussie est celle maintenant connue sous le nom d'expérience Michelson-Morley, réalisée par Albert Michelson et Edward Morley en 1887.** Nous ne la développerons pas dans le cadre de ce cours. Mais donnons l'objectif et les conclusions.

➤ **Expérience Michelson - Morley** (ne peut pas être expliquée par l'hypothèse de l'éther stationnaire)

- **Objectif:** Mesurer la vitesse de la lumière dans différentes directions afin de mesurer la vitesse de *l'éther* par rapport à la Terre, établissant ainsi son existence.
- **Expérience:** Ils ont construit un interféromètre de Michelson, qui se compose essentiellement d'une source de lumière, d'une plaque de verre à moitié argentée, de deux miroirs et d'un télescope.

Conclusions:

1. L'éther stationnaire peut expliquer l'aberration stellaire mais pas l'expérience de Michelson-Morley \Rightarrow nous ne sommes pas en mesure de localiser le référentiel absolu (s'il y en a un).
2. L'expérience de Michelson-Morley indique que la vitesse de la lumière est invariante. Les lois de l'électromagnétisme sont donc correctes.
3. La transformation galiléenne est valable pour la mécanique mais pas pour l'électromagnétisme. **La transformation galiléenne est valide pour les petits v**



Merci