Polycopié de cours

RELATIVITÉ RESTREINTE

Licence 3 Physique Fondamentale

Université Ziane Achour – Djelfa

CHAPITRE I

RELATIVITÉ GALILÉENNE

RELATIVITÉ GALILÉENNE
RAPPELS ET LIMITES

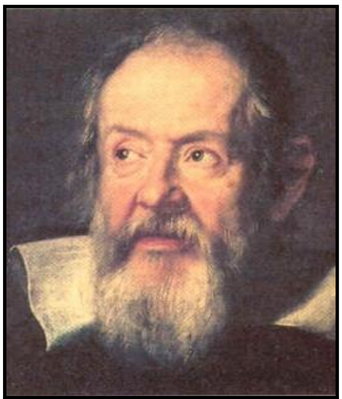
I. INTRODUCTION

« Eppur si muove ! » Galileo Galilei

« En supposant, comme le prétendent certains, que la terre soit vraiment une sphère de $6400\ km$ de rayon, et quelle fasse un tour sur elle-même chaque jour, alors une ville à la surface de la terre se déplacerait avec une vitesse de $1500\ km/h$ environ d'ouest en est. Vous vous-rendez compte $1500\ km/h$?! Une vitesse supérieure à la vitesse du son ! Or on ne ressent rien de son mouvement. Tenez par exemple, si je prends l'avion pour aller d'Alger à la Mecque, cette dernière s'éloignerait de moi à une vitesse de $1500\ km/h$, bien plus vite que la vitesse de l'avion (qui est d'environ $600\ km/h$), et donc, je n'atteindrais jamais la Mecque. Et pourquoi quand je saute verticalement je retombe à ma place et non pas plus loin vers l'ouest, puisque la terre est sensée tourner d'ouest en est ? Pourquoi les mers et les océans ne seraient-ils pas éjectés sous l'effet de la force centrifuge ? … »

Depuis l'antiquité, les hommes et les femmes se posaient des questions du même genre. Qu'ils soient philosophes, scientifiques, berger, commerçant, adultes ou enfants, tout le monde possède des notions sur le mouvement des corps. Des notions que nous avons cumulées à partir de notre expérience quotidienne.

La mécanique classique (dite newtonienne), en tant que modèle, répond à toutes ces questions de façon simple et toute aussi intuitive. Ses prévisions sont en très bon accord avec l'expérience pour des corps assez grands (macroscopiques) ayant des vitesses très inférieures à la vitesse de la lumière.



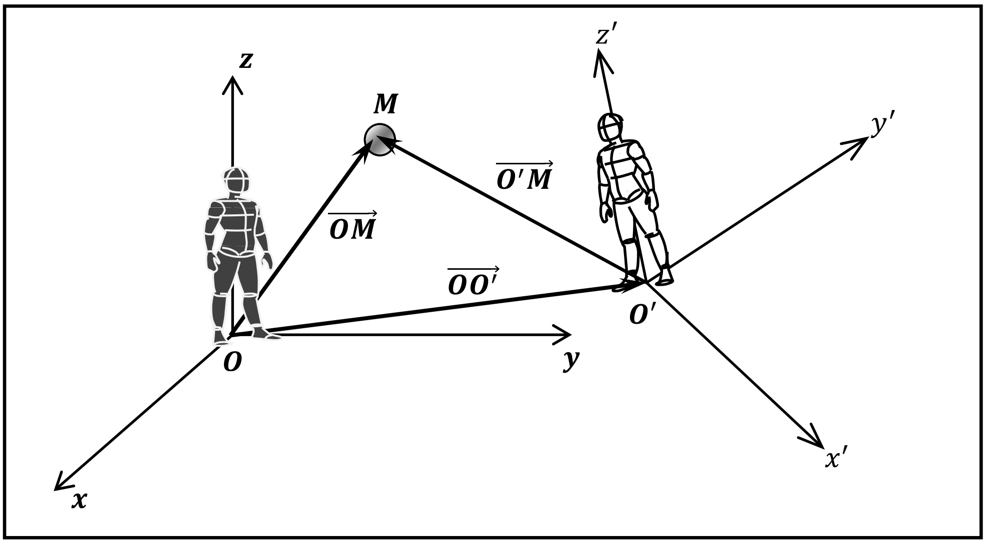
Galileo Galilei (Galilée) (1564-1642)

Historiquement, quelques savants de l'antiquité grecque se sont intéressés à la nature relative du mouvement et à la définition d'un système de référence dans le but d'expliquer le mouvement des astres, c'est le cas du système héliocentrique d'Aristarque de Samos (III^e siècle avant J.C) et du système géocentrique de Ptolémée (II^e siècle après J.C.). Le savant musulman Ibn al Haïtham avait énoncé au XI^e siècle certains principes du mouvement précurseurs du principe d'inertie.
Cependant, la première formulation telle que nous la connaissons des référentiels d'inertie et du principe d'inertie, nous la trouvons dans l'œuvre de Galilée datée de 1632 «Dialogue concernant les deux plus grands systèmes du monde». Quatre ans plus tard, Galilée énonce les fondements du mouvement relatif, dans son livre «Discours et démonstrations mathématiques autour de deux sciences touchant à la mécanique et aux mouvements locaux».

En hommage à ses travaux en mécanique et en astronomie, le mouvement relatif dans le cadre de la mécanique classique est souvent appelé relativité galiléenne et les référentiels dit d'inertie sont aussi nommés « référentiels galiléens ».

II. LOIS DE COMPOSITION DES VITESSES ET DES ACCÉLÉRATIONS

En ayant deux référentiels $(Oxyz)$ et $(O'x'y'z')$, exprimons les vecteurs positions, vitesses et accélérations en coordonnées cartésiennes dans les deux référentiels, d'un mobile M se déplaçant dans l'espace.



Référentiel $(Oxyz)$	Référentiel $(O'x'y'z')$
$\begin{cases} \overrightarrow{OM}(t) = x(t).\vec{e}_x + y(t).\vec{e}_y + z(t).\vec{e}_z \\ \vec{v}(t) = \dfrac{d\overrightarrow{OM}}{dt} = x^{\bullet}.\vec{e}_x + y^{\bullet}.\vec{e}_y + z^{\bullet}.\vec{e}_z \\ \vec{a}(t) = \dfrac{d\vec{v}}{dt} = x^{\bullet\bullet}.\vec{e}_x + y^{\bullet\bullet}.\vec{e}_y + z^{\bullet\bullet}.\vec{e}_z \end{cases}$	$\begin{cases} \overrightarrow{O'M}(t) = x'(t).\vec{e}_{x'} + y'(t).\vec{e}_{y'} + z'(t).\vec{e}_{z'} \\ \vec{v}'(t) = \dfrac{d\overrightarrow{O'M}}{dt} = x'^{\bullet}.\vec{e}_{x'} + y'^{\bullet}.\vec{e}_{y'} + z'^{\bullet}.\vec{e}_{z'} \\ \vec{a}'(t) = \dfrac{d\overrightarrow{v'}}{dt} = x'^{\bullet\bullet}.\vec{e}_{x'} + y'^{\bullet\bullet}.\vec{e}_{y'} + z'^{\bullet\bullet}.\vec{e}_{z'} \end{cases}$

Nous nous plaçons dans le référentiel $(Oxyz)$ en le considérant comme fixe, et nous considérons le référentiel $(O'x'y'z')$ en mouvement par rapport au référentiel $(Oxyz)$. Le mouvement général de $(O'x'y'z')$ est alors une composition de deux mouvements :

- Mouvement de translation pure de O' par rapport à O.
- Mouvement de rotation des axes $\vec{e}_{x'}$, $\vec{e}_{y'}$ et $\vec{e}_{z'}$ autour de O'.

Notons enfin que le temps est le même pour deux observateurs liés aux deux référentiels $t = t'$ (l'origine des temps étant prise au même instant pour les deux observateurs).

Relation entre les vecteurs positions

Exprimons maintenant la relation entre les vecteurs positions du mobile dans les deux référentiels.

$$\overrightarrow{OM} = \overrightarrow{OO'} + \overrightarrow{O'M}$$

Ou

$$x.\vec{e}_x + y.\vec{e}_y + z.\vec{e}_z = \overrightarrow{OO'} + x'.\vec{e}_{x'} + y'.\vec{e}_{y'} + z'.\vec{e}_{z'} \qquad (1)$$

Relation entre les vecteurs vitesses

En dérivant l'équation (1) nous obtenons ($\vec{e}_{x'}$, $\vec{e}_{y'}$ et $\vec{e}_{z'}$ dépendent du temps) :

$$x^{\bullet}.\vec{e}_x + y^{\bullet}.\vec{e}_y + z^{\bullet}.\vec{e}_z = \frac{d\overrightarrow{OO'}}{dt} + x'^{\bullet}.\vec{e}_{x'} + y'^{\bullet}.\vec{e}_{y'} + z'^{\bullet}.\vec{e}_{z'} + x'\vec{e}^{\bullet}_{x'} + y'\vec{e}^{\bullet}_{y'} + z'\vec{e}^{\bullet}_{z'} \qquad (2)$$

En identifiant $\vec{v}$ et $\vec{v}'$ les vitesses respectives dans le référentiel fixe et mobile alors :

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

Où $\vec{v}_e$ est appelée ***vitesse d'entraînement*** ou ***vitesse d'emportement***.

$$\vec{v}_e = \frac{d\overrightarrow{OO'}}{dt} + x'\vec{e}^{\bullet}_{x'} + y'\vec{e}^{\bullet}_{y'} + z'\vec{e}^{\bullet}_{z'}$$

Relation entre les vecteurs accélérations

Pour trouver la relation entre les accélérations dans les deux référentiels nous dérivons l'équation (2), nous obtenons alors :

$$\vec{a} = \vec{a}' + \vec{a}_e + \vec{a}_c$$

Où

$\vec{a}_e = \frac{d^2\overrightarrow{OO'}}{dt^2} + x'\vec{e}^{\bullet\bullet}_{x'} + y'\vec{e}^{\bullet\bullet}_{y'} + z'\vec{e}^{\bullet\bullet}_{z'}$	est ***l'accélération d'entraînement***
$\vec{a}_c = 2\left(x'^{\bullet}\vec{e}^{\bullet}_{x'} + y'^{\bullet}\vec{e}^{\bullet}_{y'} + z'^{\bullet}\vec{e}^{\bullet}_{z'}\right)$	est ***l'accélération de Coriolis***

En utilisant la vitesse angulaire $\vec{\omega}$ de rotation des axes $(O'x'),(O'y'),(O'z')$ par rapport au référentiel $(Oxyz)$, nous pouvons réécrire les dérivées par rapport au temps des vecteurs unitaires sous la forme

$$\vec{e}^{\bullet}_i = \vec{\omega} \times \vec{e}_i$$

D'où l'expression de la vitesse

$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}_e$	$\vec{v}_e = \frac{d\overrightarrow{OO'}}{dt} + \vec{\omega} \times \overrightarrow{O'M}$

Et l'accélération

$\vec{a} = \vec{a}' + \vec{a}_e + \vec{a}_c$	$\vec{a}_e = \frac{d^2\overrightarrow{OO'}}{dt^2} + \frac{d\vec{\omega}}{dt} \times \overrightarrow{O'M} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \overrightarrow{O'M})$	$\vec{a}_c = 2.\vec{\omega} \times \vec{v}'$

*Dans le cas où le référentiel $(O'x'y'z')$ est **fixe** par rapport au référentiel $(Oxyz)$.*

$\vec{v} = \vec{v}'$	$\vec{a} = \vec{a}'$	
$\vec{v}_e = \vec{0}$	$\vec{a}_e = \vec{0}$	$\vec{a}_c = \vec{0}$

*Dans le cas où le référentiel $(O'x'y'z')$ est **en mouvement de translation uniforme** par rapport au référentiel $(Oxyz)$ (il n'y a pas de rotation des axes).*

$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}_e$	$\vec{a} = \vec{a}'$	
$\vec{v}_e = \frac{d\overrightarrow{OO'}}{dt} = \text{constante}$	$\vec{a}_e = \vec{0}$	$\vec{a}_c = \vec{0}$

Dans le cas où le référentiel $(O'x'y'z')$ est ***en mouvement de translation non uniforme*** *par rapport au référentiel $(Oxyz)$.*

$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}_e$	$\vec{a} = \vec{a}' + \vec{a}_e$	
$\vec{v}_e = \dfrac{d\overrightarrow{OO'}}{dt} \neq \text{constante}$	$\vec{a}_e = \dfrac{d^2\overrightarrow{OO'}}{dt^2}$	$\vec{a}_c = \vec{0}$

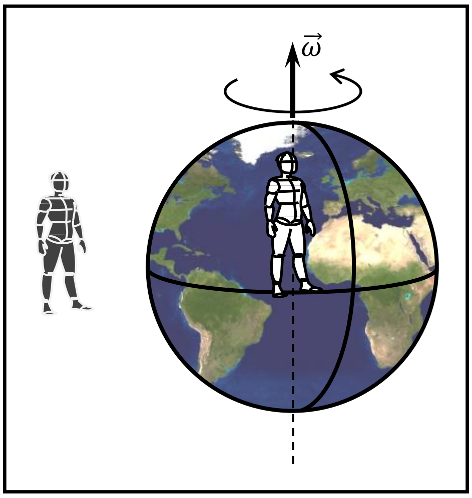
Dans le cas où le ***mobile est fixe*** *par rapport au référentiel $(O'x'y'z')$.*

$\vec{v} = \vec{v}_e$		$\vec{a} = \vec{a}_e$		
$\vec{v}_e = \dfrac{d\overrightarrow{OO'}}{dt} + \vec{\omega} \times \overrightarrow{O'M}$	$\vec{v}' = \vec{0}$	$\vec{a}_e = \dfrac{d^2\overrightarrow{OO'}}{dt^2} + \dfrac{d\vec{\omega}}{dt} \times \overrightarrow{O'M} + \vec{\omega} \times \left(\vec{\omega} \times \overrightarrow{O'M}\right)$	$\vec{a}_c = \vec{0}$	$\vec{a}' = \vec{0}$

L'accélération de Coriolis apparait seulement si le référentiel mobile est en rotation par rapport au référentiel fixe $\left(\vec{\omega} \neq \vec{0}\right)$ et que le mobile se déplace par rapport au référentiel mobile $\left(\vec{v}' \neq \vec{0}\right)$.
Le meilleur exemple que nous puissions avoir dans ce cas est le mouvement des corps par rapport au référentiel terrestre, qui est lui-même en mouvement de translation et de rotation par rapport à un référentiel non lié à la terre (lié au soleil par exemple).
Du fait du mouvement de rotation de la terre sur elle-même ($\omega = 7{,}27 \times 10^{-5}\ rad/s$), un observateur extraterrestre pourra mesurer une accélération supplémentaire à $\vec{a}'$ et $\vec{a}_e$ qui est l'accélération de Coriolis $\vec{a}_c$, et ce pour tout corps ayant une vitesse $\vec{v}'$ non nulle par rapport à la terre.

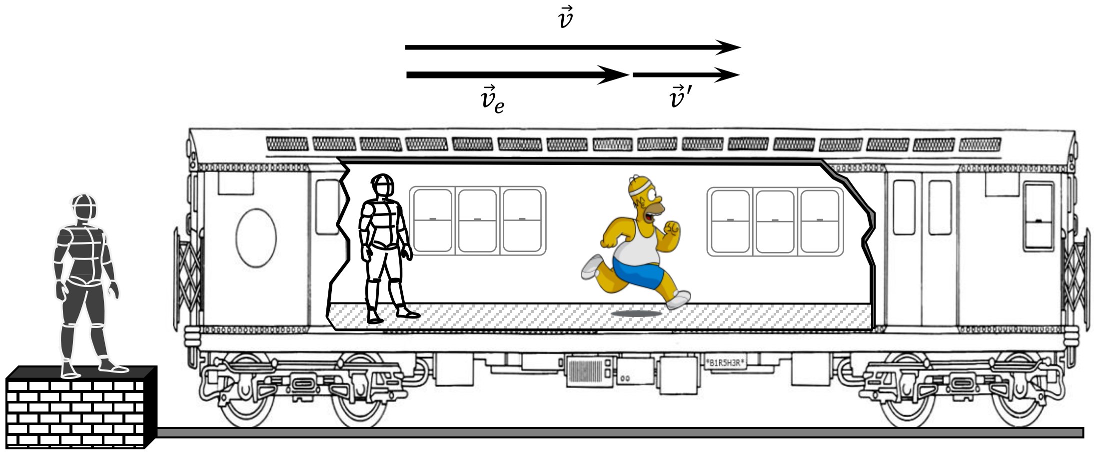
Le tableau suivant donne quelques ordres de grandeurs de l'accélération de Coriolis pour différent corps en mouvement par rapport au référentiel terrestre.

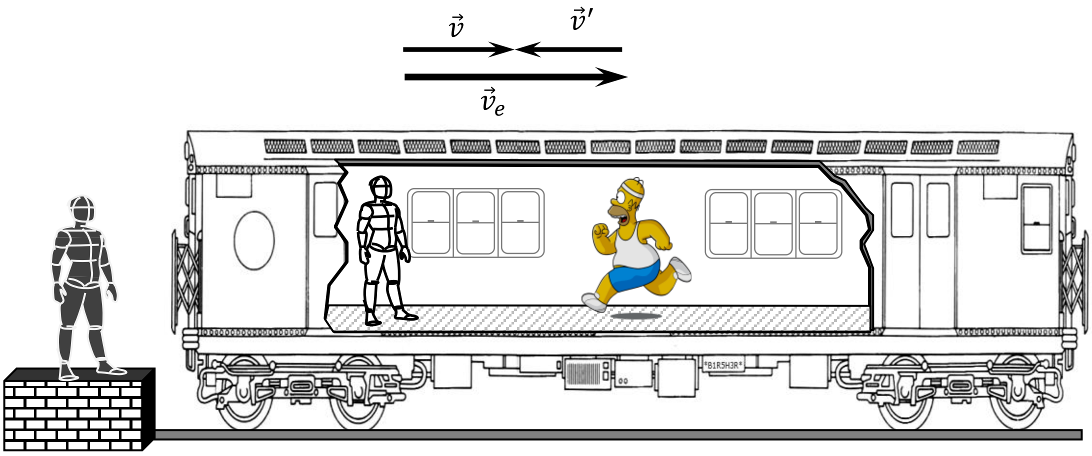
Vitesse du mobile	Ordre de grandeur de a_c
$10\ m/s$ (coureur)	$1{,}46\ 10^{-3}\ m/s^2$
$200\ m/s$ (balle)	$29\ 10^{-3}\ m/s^2$
$11000\ m/s$ (Fusée)	$1{,}6\ m/s^2$



III. EXEMPLES

Homme qui court dans un train





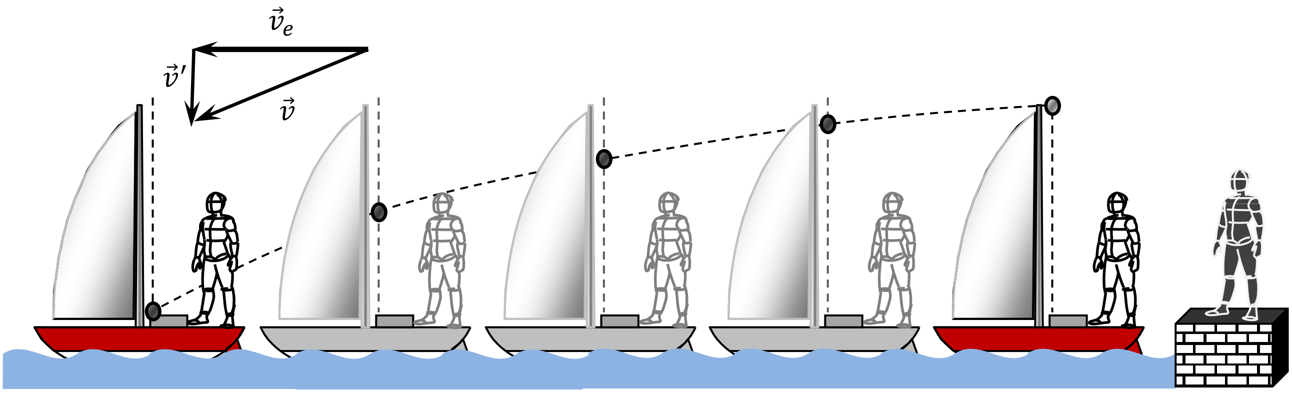
Dans la figure ci-dessus, nous avons deux observateurs, le premier se trouve sur le quai d'une gare ferroviaire que nous considérons lié au référentiel fixe, le deuxième se trouve (immobile) à intérieur d'un wagon de train que nous considérons comme un référentiel en mouvement. Les deux observateurs étudient le mouvement d'un homme qui court à l'intérieur du wagon. La relation entre les vitesses mesurées par les deux observateurs est celle trouvée précédemment

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

$\vec{v}$ est la vitesse de l'homme par rapport au référentiel fixe, c'est-à-dire, la vitesse par rapport à l'observateur se trouvant sur le quai.
$\vec{v}'$ est la vitesse de l'homme par rapport au référentiel mobile, c'est-à-dire, la vitesse par rapport à l'observateur se trouvant dans le wagon.
$\vec{v}_e$ est la vitesse du référentiel mobile par rapport au référentiel fixe, c'est-à-dire, la vitesse du wagon par rapport à l'observateur se trouvant sur le quai.

Tous les mouvements s'effectuant suivant la même direction, nous avons alors deux cas de figure pour la projection :
L'homme court dans le sens du mouvement du wagon : $v = v_e + v'$
L'homme court dans le sens opposé au sens du mouvement du wagon : $v = v_e - v'$

Bateau



Une balle est lâchée sans vitesse initiale du haut du mat d'un bateau. Ce dernier est considéré comme étant un référentiel en mouvement de translation uniforme par rapport à un observateur lié au référentiel fixe de la terre (figure du-dessus).

La loi reliant les vitesses est donnée par

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

Avec

$$\vec{v}' = -g.t.\vec{e}_y \qquad \text{et} \qquad \vec{v}_e = v_e.\vec{e}_x$$

La relation entre les vecteurs positions

$$\overrightarrow{OM} = \overrightarrow{OO'} + \overrightarrow{O'M}$$

Avec

$$\overrightarrow{O'M} = \left(-\frac{1}{2}g.t^2 + h_0\right).\vec{e}_y \qquad \text{et} \qquad \overrightarrow{OO'} = (v_e.t).\vec{e}_x$$

Donc

$$\overrightarrow{OM} = (v_e.t).\vec{e}_x + \left(-\frac{1}{2}g.t^2 + h_0\right).\vec{e}_y$$

Le mouvement de la balle pour un observateur lié au bateau est un mouvement de chute libre, tandis que pour un observateur lié à la terre le mouvement de la balle est le mouvement d'un projectile dont la trajectoire est un arc de parabole à cause de la vitesse initiale donnée par le bateau à la balle (le frottement de l'air sur la balle étant négligeable).

Noter que l'accélération de la balle est la même pour les deux observateurs, les deux référentiels étant en translation uniforme l'un par rapport à l'autre

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

A faire :

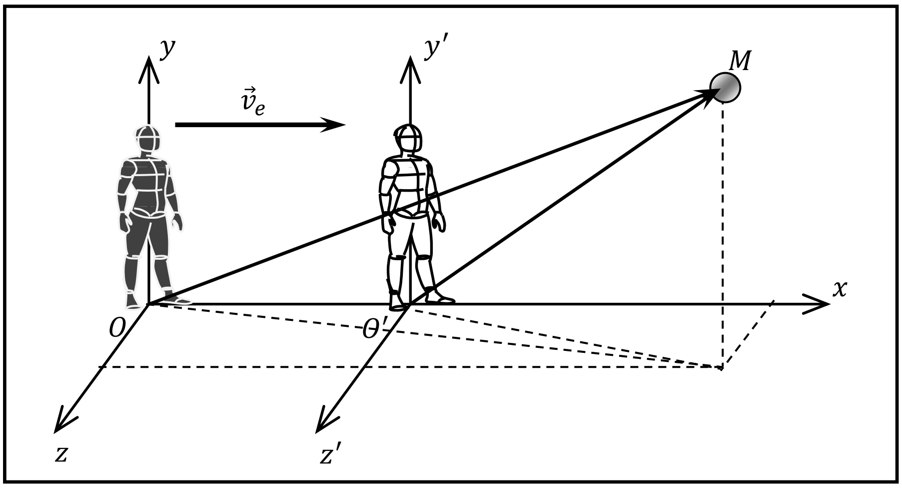
Quelle est la trajectoire de la balle par rapport à un observateur lié à la terre, dans le cas d'une balle lâchée sans vitesse initiale du haut d'un mat d'un bateau animé d'un mouvement rectiligne uniformément varié par rapport à la terre ? La vitesse du bateau étant nulle au moment où la balle est lâchée.
Avec les mêmes conditions, quelle est la trajectoire de la balle par rapport à un observateur lié au bateau ?

IV. INVARIANCE DU PRINCIPE FONDAMENTAL DE LA DYNAMIQUE DANS LES RÉFÉRENTIELS GALILÉENS – TRANSFORMATION DE GALILÉE

Un référentiel galiléen (ou référentiel d'inertie) est un référentiel fixe ou en mouvement de translation uniforme. (Nous reviendrons sur cette définition qui n'en n'est pas une)
Tout référentiel en mouvement de translation uniforme par rapport à un référentiel galiléen est aussi un référentiel galiléen.

Dans la figure qui ci-dessous on a représenté deux référentiels $\mathcal{R}$ et $\mathcal{R}'$ en translation uniforme l'un par rapport à l'autre, les axes $(O'x'),(O'y'),(O'z')$ sont, à tout instant, parallèles respectivement aux axes $(Ox),(Oy),(Oz)$. Donc : $\vec{e}_x = \vec{e}_{x'}$; $\vec{e}_y = \vec{e}_{y'}$; $\vec{e}_z = \vec{e}_{z'}$.

La vitesse d'emportement qui est la vitesse de translation du référentiel mobile $(O'x'y'z')$ par rapport au référentiel fixe $(Oxyz)$ est notée $\vec{v}_e = v_e.\vec{e}_x$ tel que v_e est constante.



Les équations reliant les positions sont données par la transformation de Galilée :

$$\begin{cases} t = t' \\ x = x' + v_e.t' \\ y = y' \\ z = z' \end{cases} \quad \text{ou} \quad \begin{cases} t' = t \\ x' = x - v_e.t \\ y' = y \\ z' = z \end{cases}$$

Les équations reliant les vitesses et les accélérations

$$\begin{cases} v'_x = v_x - v_e \\ v'_y = v_y \\ v'_z = v_z \end{cases} \quad ; \quad \begin{cases} a'_x = a_x \\ a'_y = a_y \\ a'_z = a_z \end{cases}$$

Il vient que les accélérations dans deux référentiels galiléens sont identiques $(\vec{a} = \vec{a}')$. On dit alors que les lois de Newton, notamment le Principe Fondamental de la Dynamique, sont invariantes par rapport au changement de référentiel galiléen.

C'est aussi une autre manière de dire que le principe d'inertie énoncé comme suit : « *un corps qui ne subit aucune force extérieure est immobile ou animé d'un mouvement rectiligne uniforme* » est *valable dans n'importe quel référentiel galiléen*.

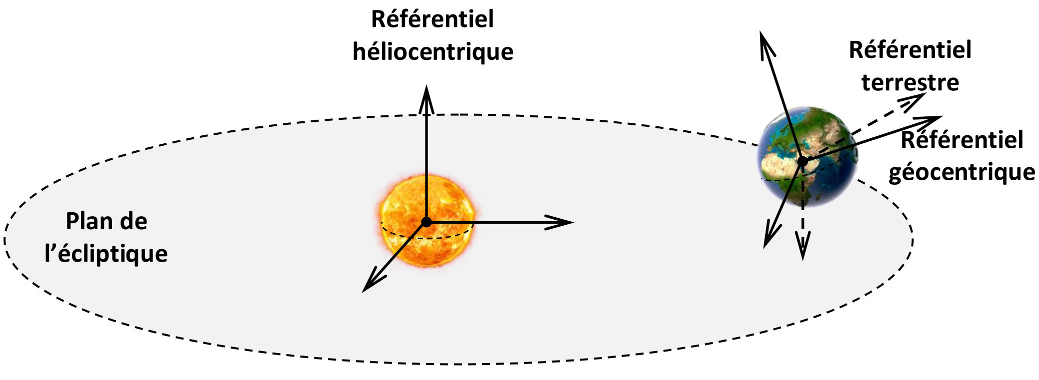
D'où *on définit un référentiel galiléen comme un référentiel où le principe d'inertie est toujours vérifié*. C'est à cause de cette définition que le référentiel galiléen est aussi appelé référentiel d'inertie ou encore référentiel inertiel.

Remarque :

D'un point de vue purement théorique, l'existence d'un référentiel galiléen absolu ne peut être prouvée car il n'existe pas de point dans tout l'univers pour lequel nous pouvons affirmer qu'il est fixe ou en mouvement de translation uniforme, si ce n'est par rapport à un autre point qui lui-même n'est pas assuré d'être fixe.
D'un autre coté, nous avons la transformation galiléenne précédente qui permet de définir un référentiel galiléen comme un référentiel où le principe d'inertie est valable, or ce même principe est basé sur le fait que la vitesse d'un corps libre est constante par rapport à un référentiel galiléen supposé.

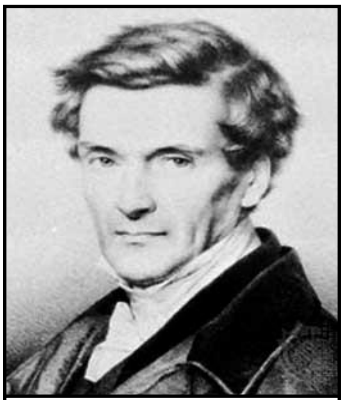
En définitive, l'existence d'un référentiel galiléen (au moins un) est supposée vraie et non démontrée, elle fait partie avec le principe d'inertie – qui lui aussi n'est pas démontré – des postulats de départ de la mécanique classique.

En pratique, certains référentiels sont considérés comme galiléens même s'ils ne le sont pas en toute rigueur. C'est le cas pour le référentiel terrestre, la terre étant en mouvement de rotation autour d'elle-même et autour du soleil (révolution), un point lié à sa surface n'est pas au sens strict un référentiel galiléen. Mais dans certains cas où les accélérations normales peuvent être négligées, le référentiel terrestre peut être assimilé à un référentiel galiléen.
Le référentiel géocentrique lié au centre de la terre et dont les axes sont dirigés vers des étoiles lointaines pouvant être considérées comme fixes, peut être considéré comme galiléen pour des expériences de durées très inférieures à la période de révolution tout en négligeant l'accélération normale du mouvement de centre de masse de la terre.
Le référentiel héliocentrique (référentiel de Copernic) dont l'origine est confondue avec le centre de masse du soleil, ou bien encore, le référentiel de Kepler dont l'origine est placée au centre de masse du système solaire avec des axes orientés vers des étoiles lointaines fixes, constituent de meilleures approximations pour un référentiel galiléen dans le cas où les expériences ont des durées inférieures à la durée de révolution du système solaire autour du centre de masse de la galaxie (figure ci-dessous).



Remarque :

Nous avons vu qu'un observateur lié à un référentiel fixe (hors de la terre par exemple) mesure, quand il étudie le mouvement d'un corps, des accélérations supplémentaires par rapport à un observateur lié à un référentiel mobile (lié au centre de la terre et tournant avec elle) $\vec{a} = \vec{a}' + \vec{a}_e + \vec{a}_c$. Mais comment l'observateur lié au référentiel mobile perçoit ces accélérations ($\vec{a}_e$ et $\vec{a}_c$) ?



Gaspard Gustave Coriolis (1792-1843)

D'abord, un référentiel mobile où ces accélérations sont non nulles (mesurées par l'observateur fixe) est un référentiel non galiléen (le référentiel fixe étant considéré comme galiléen). Dans ce type de référentiels apparait des forces d'origine non matérielle appelées pseudo-forces d'inertie, dont la force de Coriolis :

Dans le référentiel fixe (inertiel) : $\sum \vec{f} = m\vec{a}$

Dans le référentiel mobile (non inertiel) : $\sum \vec{f} + \vec{f}_{\text{inertie}} = m\vec{a}'$

Tel que

$$\vec{f}_{\text{inertie}} = -m.(\vec{a}_e + \vec{a}_c)$$

Donc, dans un référentiel non inertiel (non galiléen) l'observateur va ressentir des forces non matérielles supplémentaires dues à l'accélération de son référentiel. Ces forces sont opposées en sens aux accélérations d'inertie mesurées par l'observateur extérieur.

En particulier, dans un référentiel en rotation nous mesurons pour tout corps de masse m en déplacement une force dite de Coriolis $\vec{f}_{\text{Coriolis}} = -m.\vec{a}_c$ de même direction et opposée en sens à l'accélération de Coriolis calculée par un observateur extérieur lié à un référentiel galiléen, cette force est donc perpendiculaire à la vitesse du mobile et au vecteur vitesse angulaire de la rotation de la terre.

La force de Coriolis permet de décrire plusieurs phénomènes connus, comme le montre la figure ci-dessous où il apparait, de gauche à droite : un cyclone, l'écoulement en tourbillon de l'eau dans un récipient troué par le bas et les cellules de Hadley induites par les courants d'air permanents. Dans ces trois cas la déviation de l'air ou de l'eau est due à la force latérale (perpendiculaire au déplacement) de Coriolis et dont le module augmente avec la vitesse du corps – un fluide dans ces trois cas – par rapport à la terre.

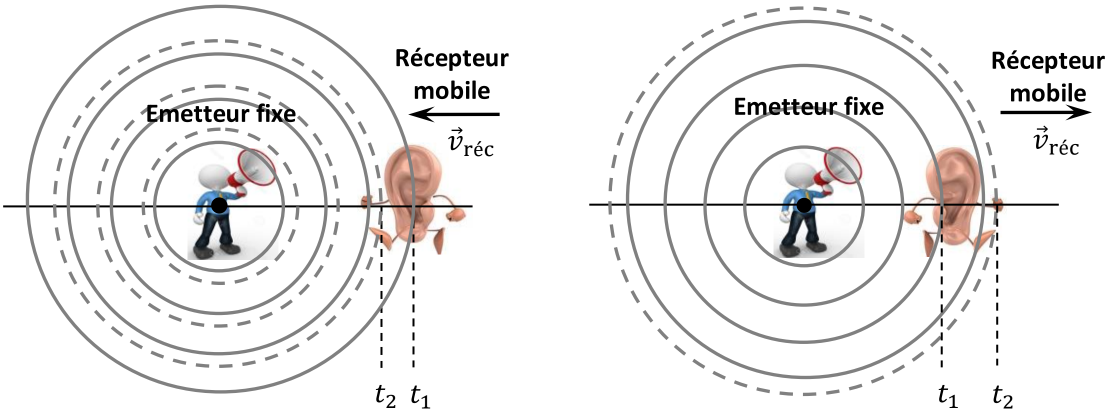
V. LIMITES DE LA LOI DE COMPOSITION DES VITESSES

V.1. Propagation d'ondes dans des référentiels galiléen – Effet Doppler

L'effet Doppler est un phénomène observé de décalage de la fréquence d'une onde mesurée par deux observateurs liés à des référentiels galiléens en mouvement l'un par rapport à l'autre. En particulier, si l'un des observateurs est lié à la source de l'onde (émetteur) et l'autre lié à un point différent de la source (récepteur). Dans le cas des ondes électromagnétiques ce phénomène est appelé effet Doppler-Fizeau.

Christian A. Doppler (1803- 1853)

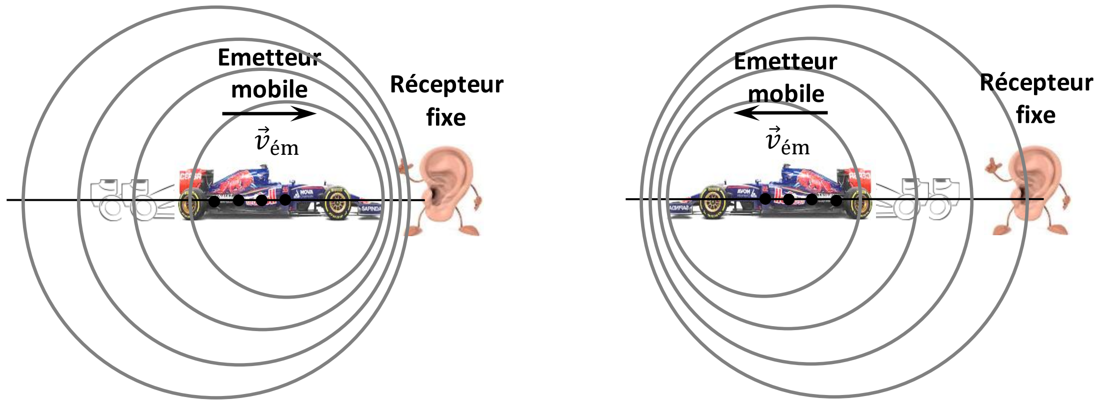
La loi galiléenne de composition des vitesses permet de trouver la relation entre les fréquences mesurées par l'émetteur et le récepteur en prenant en considération que *la vitesse d'une onde est indépendante de la vitesse de la source et ne dépend que des propriétés du milieu dans lequel elle se propage*. C'est-à-dire que contrairement à un corps matériel l'onde ne « bénéficie » pas de la vitesse d'emportement de sa source.



Dans la figure ci-dessus est représenté le cas où l'émetteur est fixe et le récepteur en mouvement :

A gauche le récepteur se déplace en allant vers l'émetteur. Dans ce cas de figure l'onde se propageant à la rencontre du récepteur et l'intervalle mesuré par le récepteur entre deux phases successives $(t_2 - t_1)$ sera inférieur à la période absolue T mesurée par un observateur fixe (lié au milieu de propagation). La fréquence mesurée par le récepteur $f_{\text{réc}}$ est par conséquent supérieure à la fréquence mesurée par un observateur fixe comme l'émetteur $f_{\text{ém}} < f_{\text{réc}}$ (décalage vers l'aigu).

A droite le récepteur se déplace en s'éloignant de l'émetteur. Dans ce cas de figure l'onde se propage en fuyant le récepteur et l'intervalle mesuré par le récepteur entre deux phases successives $(t_2 - t_1)$ sera supérieur à la période absolue T mesurée par un observateur fixe (lié au milieu de propagation). La fréquence mesurée par le récepteur $f_{\text{réc}}$ est par conséquent inférieure à la fréquence mesurée par un observateur fixe comme l'émetteur $f_{\text{ém}} > f_{\text{réc}}$ (décalage vers le grave).



Dans la figure ci-dessus est représenté le cas où le récepteur est fixe et l'émetteur en mouvement (une voiture de course) :

A droite l'émetteur se déplace en allant vers le récepteur. Dans ce cas de figure les fronts des phases égales se resserrent à cause du déplacement de la source (centre des cercles), diminuant ainsi la longueur d'onde ce qui augmente la fréquence perçue par le récepteur $f_{\text{ém}} < f_{\text{réc}}$ (décalage vers l'aigu).

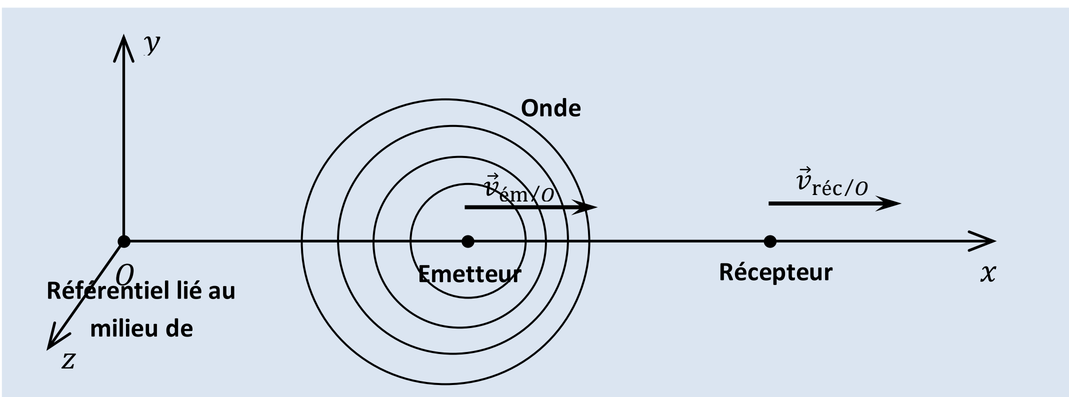
A gauche l'émetteur se déplace en s'éloignant du récepteur. Dans ce cas, les fronts des phases égales s'espacent entre elles à cause du déplacement de la source (centre des cercles), augmentant ainsi la longueur d'onde ce qui diminue la fréquence perçue par le récepteur $f_{\text{ém}} > f_{\text{réc}}$ (décalage vers le grave).

Notons que dans le cas où l'émetteur est fixe, la vitesse de l'onde qu'il mesure est égale la vitesse absolue de l'onde, cette vitesse notée c ne dépend que du milieu de propagation. Par contre, la vitesse de propagation de l'onde mesurée par le récepteur dépendra de la vitesse de déplacement de ce dernier par rapport au milieu de propagation. Dans le cas où l'émetteur se déplace, la vitesse de propagation de l'onde qu'il mesure dépend de sa vitesse par rapport au milieu, c'est le récepteur fixe qui trouve une vitesse de propagation égale à la vitesse c.

Nous pouvons calculer la relation donnant la fréquence perçu par le récepteur $f_{\text{réc}}$ en fonction de la fréquence émise $f_{\text{ém}}$ en utilisant la loi de composition des vitesses, dans le cas où l'émetteur et le récepteur se déplacent sur même droite (Ox).

Nous devons d'abord définir un référentiel absolu (fixe) lié au milieu de propagation (origine O). Dans ce référentiel la vitesse de l'onde est de module constant notée $|\vec{v}_{\text{onde}/O}| = c$.

Les vitesses de l'onde par rapport à l'émetteur et au récepteur sont notées respectivement $\vec{v}_{\text{onde/ém}}$ et $\vec{v}_{\text{onde/réc}}$, leur modules dépendes des vitesses de l'émetteur et du récepteur par rapport au milieu $\vec{v}_{\text{ém}/O}$ et $\vec{v}_{\text{réc}/O}$.



La loi de composition galiléenne des vitesses donne :

$$\begin{cases} \vec{v}_{\text{onde}/O} = \vec{v}_{\text{onde}/\text{ém}} + \vec{v}_{\text{ém}/O} \\ \vec{v}_{\text{onde}/O} = \vec{v}_{\text{onde}/\text{réc}} + \vec{v}_{\text{réc}/O} \end{cases}$$

En faisant la projection (on utilise les valeurs algébriques pour $v_{\text{ém}/O}$ et $v_{\text{réc}/O}$)

$$\begin{cases} c = v_{\text{onde}/\text{ém}} + v_{\text{ém}/O} \\ c = v_{\text{onde}/\text{réc}} + v_{\text{réc}/O} \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} v_{\text{onde}/\text{ém}} = \lambda . f_{\text{ém}} \\ v_{\text{onde}/\text{réc}} = \lambda . f_{\text{réc}} \end{cases}$$

La longueur d'onde mesurée par l'émetteur et le récepteur étant la même.
Ce qui donne la loi reliant les fréquences émise et reçu :

$$f_{\text{réc}} = \left(\frac{c - v_{\text{réc}/O}}{c - v_{\text{ém}/O}} \right) f_{\text{ém}}$$

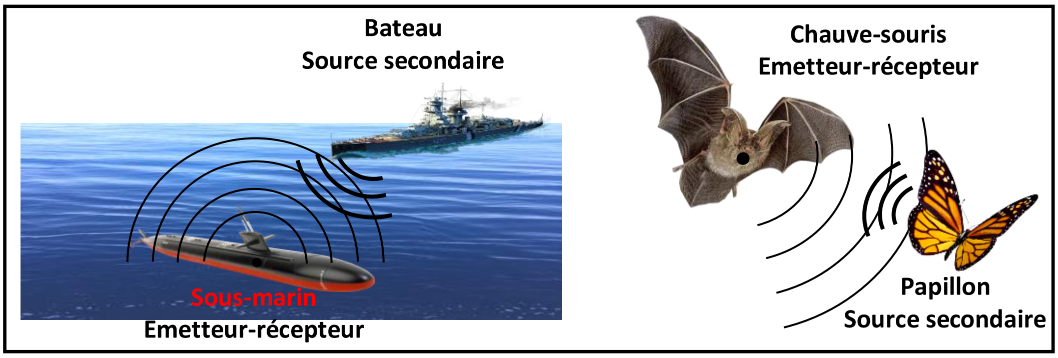
Dans cette équation : $(c > 0)$ si l'émetteur se trouve avant le récepteur $(x_{\text{ém}} < x_{\text{réc}})$, et $(c < 0)$ si l'émetteur se trouve après le récepteur $(x_{\text{ém}} > x_{\text{réc}})$.

Conclusion concernant la vitesse de l'onde

La vitesse d'une onde est indépendante de la vitesse de sa source et ne dépend que du milieu dans lequel elle se propage, contrairement à une particule émise où sa vitesse par rapport à un référentiel fixe compose la vitesse d'émission et la vitesse de la source.
Le milieu matériel supportant la propagation l'onde est un référentiel absolu, la vitesse de l'onde pour un observateur lié à ce milieu est toujours la même. Cette vitesse change pour un observateur en mouvement par rapport au milieu de propagation.

Ces deux constats sur la vitesse ne s'appliquent pas à la lumière (onde électromagnétique ou photon). D'abord parce la lumière n'a pas besoin d'un milieu matériel pour sa propagation, en plus – comme nous le verrons dans l'expérience de Michelson et Morley – la vitesse de la lumière dans le vide est indépendante du référentiel choisis.

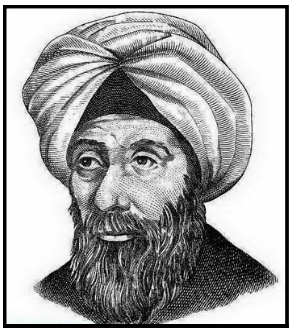
Dans la figure ci-dessous sont illustrés quelques exemples qui mettent en jeu l'effet Doppler pour déterminer la vitesse de déplacement d'une source secondaire (en utilisant l'écho). L'homme en fabriquant le sonar (à gauche) copie la nature (chauve souris de droite). Dans les deux cas l'écho des hyper-fréquences se réfléchissant sur la source secondaire (bateau ou papillon) informe sur sa position (l'écholocation) et sur sa vitesse en mesurant la variation de la fréquence par effet Doppler.



V.2. Invariance de la vitesse de la lumière – mesures expérimentales

Mesure de la vitesse de la lumière

Dans son traité d'optique « كتاب المناظر » rédigé entre 1015 et 1021, Ibn al Haïtham (Alhazen pour les latins), fondateur de l'optique géométrique, énonce que la lumière est composée de courant de particules d'énergie se propageant en lignes droites avec une vitesse finie et que cette vitesse varie suivant le milieu de propagation, de telle manière que dans les corps transparents et denses la vitesse de la lumière est inférieur à sa vitesse dans l'air. Ce qui nous parait aujourd'hui comme une évidence, ne l'était pas à l'époque, car il était admis que la lumière soit un effet instantané (ce qui revient à dire que sa vitesse est quasiment infinie).

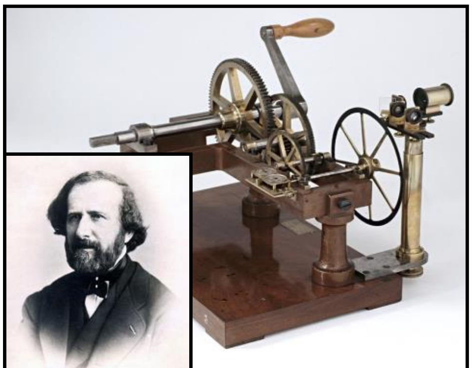


Ibn al Haïtham (965-1039)

Plus tard, Galilée convaincu lui aussi que la vitesse de la lumière, bien que très grande, possède une valeur finie, tenta de la déterminer en calculant directement le temps nécessaire à un rayon lumineux pour faire l'aller-retour entre de deux observateurs communiquant à l'aide de lanternes masquées en alternance. L'expérience fût un échec, mais elle donna le départ d'une véritable compétition à travers le temps et les continents pour mesurer une des plus célèbres constantes de l'univers : la vitesse de la lumière.

Les premières méthodes expérimentales concluantes pour déterminer la vitesse de la lumière se basaient sur des observations astronomiques : Observations des lunes de Jupiter par Rømer et Huygens (1675) ou l'aberration de la lumière (J. Bradley en 1726).

En 1849 Hippolyte Fizeau utilise une méthode mécanique qui calcule le temps de l'aller-retour d'un rayon lumineux sur une distance de $8\,km$, égal au temps de rotation d'une roue dentée. Dans sa foulée (1862) Léon Foucault utilise un système optique sur la base un miroir tournant pour calculer temps aller-retour d'un rayon lumineux en laboratoire (distance 20 mètres) et obtient un résultat égal à $298\,000\,km/s$ avec une incertitude de l'ordre de $500\,km/s$. Albert Michelson utilise le même principe de la comparaison du trajet d'un rayon lumineux avec le mouvement de rotation d'un miroir octogonal et obtient une vitesse égale à $299\,710\,km/s$ avec une incertitude de $30\,km/s$.



Hippolyte Fizeau (1819-1896) et son mécanisme à roue dentée avec les lunettes d'observation (1849).

Les méthodes d'interférométrie permirent d'améliorer la précision de la mesure de la vitesse de la lumière, ainsi Woods, Shotton et Rowley en 1978 purent donner à la célérité une valeur de $299\,792{,}458\,89\,km/s$ avec une incertitude relative de l'ordre du milliardième.

La précision grandissante de la mesure de la vitesse de la lumière a fini par remettre en question la précision du mètre qui jusque là était définit, d'abord, par le dix-millionième de la moitié du méridien terrestre, puis par $1\,650\,763{,}73$ fois la longueur d'onde de la radiation correspondant à la transition $2p_{10} - 5d_5$ du Krypton-86. Après les succès de la relativité restreinte, il était admis que la vitesse de la lumière est une constante universelle qu'on pouvait mesurer avec une précision supérieure à celle du mètre.

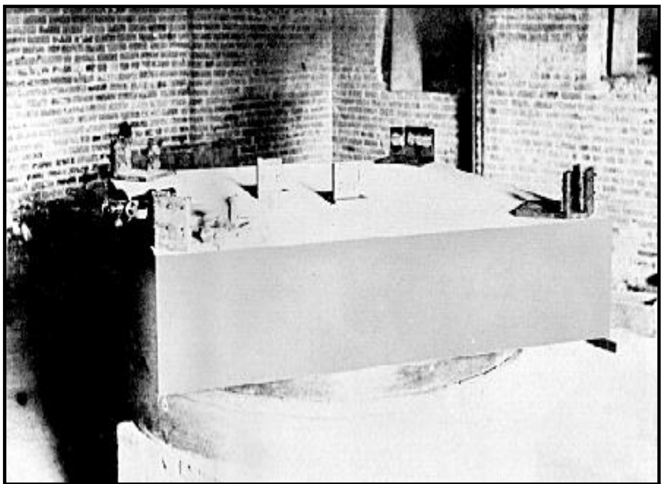
Ce qui amena la communauté scientifique, lors de la conférence générale des poids et mesures en 1983, a adopter une valeur conventionnelle de la vitesse de la lumière égale à $c = 299\,792\,458\,m/s$. Le mètre étant définit comme la distance parcourue par la lumière dans le vide en $1/299\,792\,458\,s$.

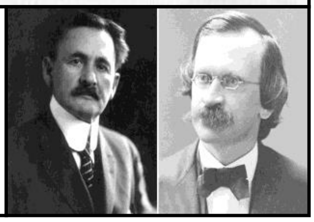
Expérience de Michelson et Morley

Au milieu du XIXe siècle, il était largement admis que la lumière était de nature ondulatoire, grâce notamment à l'expérience d'interférence réalisé par Tomas Young appelée expérience des fentes d'Young en 1801. Cette conviction fut définitive après la présentation en 1864 de la très élégante théorie de l'électromagnétisme par James Clerk Maxwell, démontrant que la lumière ne constituait en fait que la partie visible d'un spectre infiniment étendu d'ondes électromagnétiques.

Or d'après les scientifiques de l'époque, cette onde avait besoin d'un support pour se propager, un milieu « matériel » dans lequel la vitesse de l'onde lumineuse serait constante indépendamment de la vitesse de sa source. Ce milieu supposé fut appelé « éther luminifère » ou « éther ». L'éther avait la propriété d'exister partout dans l'espace et de pénétrer la matière, il devait être très rigide pour expliquer la grande valeur de la vitesse de la lumière et en même temps offrir une résistance quasiment nulle au corps matériels en mouvement dans l'espace.

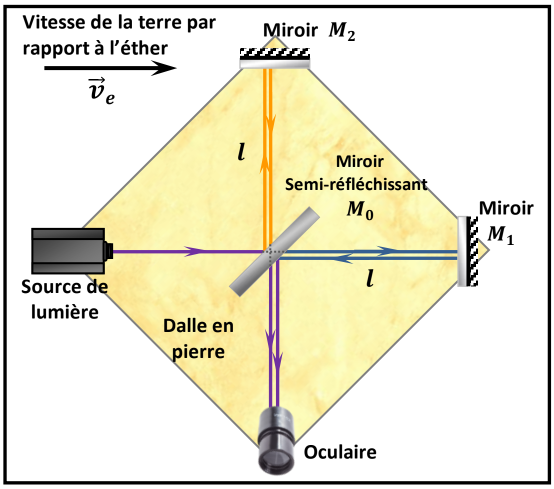
C'est dans le but de démontrer l'existence de l'éther qu'Albert Michelson entreprit, d'abord seul puis aidé par Edward Morley, une série d'expériences d'interférences d'ondes lumineuse entre 1881 et 1887.





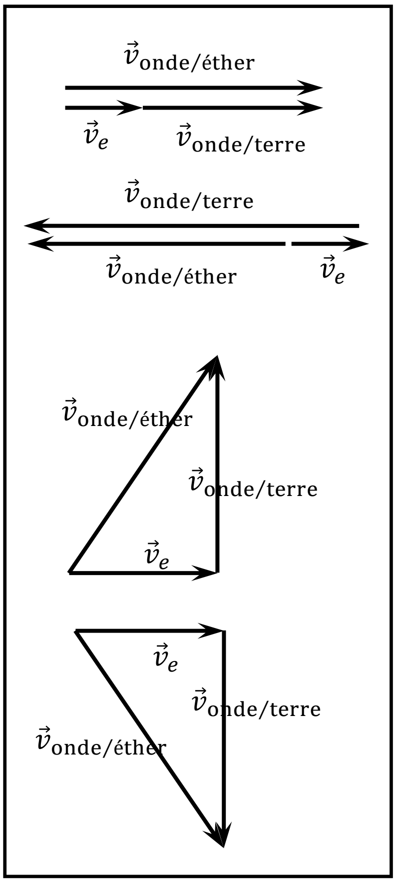
A. Michelson (1852-1931) à gauche, E. Morley (1838-1923) à droite et leur interféromètre (1881).

L'idée de départ était de montrer que comme toute onde « classique », la lumière se propageait avec une vitesse constante $c \approx 3 \times 10^8\ m/s$ par rapport à son milieu de propagation qui est l'éther, mais que sa vitesse mesurée par un observateur se déplaçant par rapport à l'éther serait conforme à la loi galiléenne de composition des vitesses et pouvait donc être différente de c. Cependant, pour mesurer un changement significatif de la vitesse il fallait trouver un référentiel ayant une grande vitesse par rapport à l'éther. Ce fut le cas de la terre, car sa vitesse linéaire de révolution autour du soleil est $v_e \approx 3 \times 10^4\ m/s$, mais même à cette vitesse le changement de la valeur de la vitesse de lumière serait trop faible pour pouvoir être mesuré.



L'expérience de Michelson consiste à mesurer le déphasage entre deux ondes, une onde se propageant dans la même direction de déplacement de la terre par rapport l'éther et une autre onde se propageant perpendiculairement à cette direction. La différence de vitesse devrait induire une différence de marche très faible mais donnant un déphasage perceptible même pour des longueurs d'ondes du domaine du visible.

Calculons le déphasage induit par le changement de la vitesse, entre les deux ondes ayant les trajets perpendiculaires $M_0M_1M_0$ et $M_0M_2M_0$ de même longueur $M_0M_1 = M_0M_2 = l$.



Ces deux trajets sont obtenus à l'aide d'un miroir semi-réfléchissant (voir figure ci-dessus). La loi galiléenne de composition des vitesses s'écrit :

$$\vec{v}_{\text{onde/éther}} = \vec{v}_e + \vec{v}_{\text{onde/terre}}$$

Avec

$$\left|\vec{v}_{\text{onde/éther}}\right| = c \quad \text{et} \quad \left|\vec{v}_{\text{onde/terre}}\right| = v'$$

Le temps de l'aller M_0M_1 est égal à : $t_{1a} = l/v' = l/(c - v_e)$.
Le temps du retour M_1M_0 est égal à : $t_{1r} = l/v' = l/(c + v_e)$.

Et le temps de l'aller-retour $M_0M_1M_0$:

$$t_1 = t_{1a} + t_{1r} = \frac{2l.c}{c^2 - v_e^2} = \frac{2l/c}{1 - \beta_e^2}$$

Le temps de l'aller M_0M_2 est égal à : $t_{2a} = l/v' = l/\sqrt{c^2 - v_e^2}$.
Le temps du retour M_1M_0 est égal à : $t_{2r} = l/v' = l/\sqrt{c^2 - v_e^2}$.

Et le temps de l'aller-retour $M_0M_2M_0$:

$$t_2 = t_{2a} + t_{2r} = \frac{2l}{\sqrt{c^2 - v_e^2}} = \frac{2l/c}{\sqrt{1 - \beta_e^2}}$$

Avec $\beta_e = v_e/c < 1$ ce qui donne $t_1 > t_2$.

Le calcul du déphasage : Pour $v_e \ll c$ ou $\beta_e^2 = v_e^2/c^2 \ll 1$ l'approximation au premier ordre donne :

$$t_1 \approx \frac{2l}{c}(1 + \beta_e^2) \qquad \text{et} \qquad t_2 \approx \frac{2l}{c}\left(1 + \frac{1}{2}\beta_e^2\right)$$

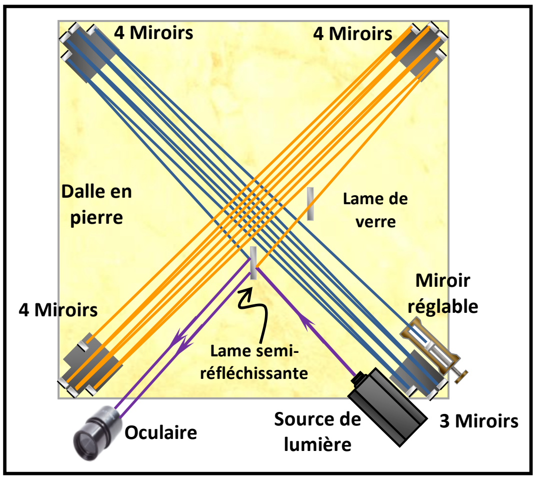
La différence de marche équivalente à ce retard est : $\Delta x = c.(t_1 - t_2) = l.\beta_e^2$
Et la différence de phase :

$$\boxed{\Delta\phi = k.\Delta x = \frac{2\pi}{\lambda} l\beta_e^2}$$

Pour $l = 11\ m$ et une longueur d'onde $\lambda = 550\ nm$ avec $\beta_e = v_e/c = 10^{-4}$ la différence de phase théorique devrait être égale à $\Delta\phi/2\pi = 0{,}2$.

Michelson et Morley procédaient en réglant l'interféromètre, pour une direction donnée, sur un déphasage nul par compensation à l'aide d'un miroir ajustable, puis en tournant le dispositif complet d'un angle de $90°$, ils devaient s'attendre à trouver un déphasage de $2\Delta\phi$ (différence de phase due à la différence de vitesse additionnée à la différence de phase donnée par le réglage précédent du miroir).

L'interféromètre de Michelson était un instrument de très haute précision pour son époque. Afin de minimiser les vibrations parasites durant la rotation, Michelson et Morley placèrent l'ensemble du dispositif sur un banc en pierre flottant au dessus d'un bain de mercure et la longueur de parcours de l'onde lumineuse (bras de l'interféromètre) a été allongée par un jeu de miroirs (figure ci-contre). Malgré toutes ces dispositions et ayant effectué des mesures durant six ans, Michelson et Morley ne trouvèrent aucun déphasage significatif entre des les deux ondes.



C'est pour cette raison que cette expérience, comptant parmi les plus importantes dans l'histoire de la physique, est communément désignée sous le nom « d'expérience négative de Michelson et Morley ».

Plusieurs théories ont été avancées pour expliquer les résultats de cette expérience, dont celle de Hendrik A. Lorentz qui émit l'idée que l'espace se contracte dans la direction de déplacement de l'éther et compense ainsi la différence de temps entre les deux parcours. Mais cette contraction, ainsi que l'existence de l'éther n'ont jamais été démontrées. La nature même de l'éther luminifère en tant que substance non matérielle posait un problème conceptuel aux physiciens à la fin du XIX^{e} siècle.

Il a fallut attendre la parution de l'article d'Albert Einstein en 1905 pour trouver une explication convaincante à l'expérience de Michelson et Morley et par la même occasion donner naissance à une nouvelle théorie de la physique : la relativité restreinte.

Conclusion :

Dans l'expérience de Michelson et Morley la vitesse de lumière n'est pas influencée par le mouvement de la terre par rapport à un référentiel extérieur. Donc, l'existence d'un référentiel préférentiel (absolu) pour l'onde n'a pas été démontrée.

V.3. Équations de l'électromagnétisme et la transformation de Galilée

Nous avons vu que le principe fondamental de la dynamique (la résultante des forces) est invariant par changement de référentiel galiléen, mais qu'en est-il des équations de l'électromagnétisme ?

La force électromagnétique, ou force de Lorentz, est la force appliquée sur une charge q se déplaçant avec une vitesse $\vec{v}$ dans un champ électromagnétique $(\vec{E}, \vec{B})$.

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Les équations de Maxwell dans le vide (ε_0, μ_0).

$div(\vec{E}) = \dfrac{\rho}{\varepsilon_0}$	$div(\vec{B}) = 0$
$\overrightarrow{rot}(\vec{E}) = -\dfrac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\overrightarrow{rot}(\vec{B}) = \mu_0.\vec{\jmath} + \mu_0 \varepsilon_0 \dfrac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

Dans le vide en absence de charges $(\rho = 0)$ et de courants $(\vec{\jmath} = \vec{0})$.

$div(\vec{E}) = 0$	$div(\vec{B}) = 0$
$\overrightarrow{rot}(\vec{E}) = -\dfrac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\overrightarrow{rot}(\vec{B}) = \mu_0 \varepsilon_0 \dfrac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

D'où les équations de propagation.

$\Delta\vec{E} - \mu_0\varepsilon_0 \dfrac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \vec{0}$	$\Delta\vec{B} - \mu_0\varepsilon_0 \dfrac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = \vec{0}$

Avec

$$c = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} = 2{,}997\ 924\ 580\ 10^8\ m/s$$

Effectuons un changement de référentiel galiléen (page 10) avec $\vec{v}_e = v_e.\vec{e}_x$.

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}_e \qquad \Rightarrow \qquad \begin{cases} x' = x - v_e.t \\ y' = y \\ z' = z \end{cases} \qquad \text{et} \qquad t' = t$$

Le champ électromagnétique dans le nouveau référentiel est noté $(\vec{E}', \vec{B}')$. Et la force électromagnétique appliqué sur la même charge $(q' = q)$ en mouvement

$$\vec{F}' = q'(\vec{E}' + \vec{v}' \times \vec{B}') = q(\vec{E}' + (\vec{v} - \vec{v}_e) \times \vec{B}')$$

Comme le principe fondamental est invariant par changement de référentiel galiléen

$$q(\vec{E}' + (\vec{v} - \vec{v}_e) \times \vec{B}') = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

La force magnétique dépend de la vitesse de la charge et la force électrique est indépendante de cette vitesse, nous pouvons donc faire l'égalité pour chaque terme indépendamment de l'autre

$\vec{E} = \vec{E}' - \vec{v}_e \times \vec{B}'$	$\vec{B} = \vec{B}'$

L'expression du champ électromagnétique n'est pas invariante par changement de référentiel galiléen.

Cherchons les équations de Maxwell dans le nouveau référentiel galiléen, pour ceci nous devons trouver les dérivée partielles par rapport à (x', y', z', t') en fonction des dérivées partielles par rapport à (x, y, z, t).

Puisque

$$x' = x - v_e.t \quad ; \quad y' = y \quad ; \quad z' = z \quad ; \quad t' = t$$

D'où

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x'}\frac{\partial x'}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t'}\frac{\partial t'}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x'} \; ; \; \frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y'} \; ; \; \frac{\partial}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z'} \; ; \; \frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x'}\frac{\partial x'}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t'}\frac{\partial t'}{\partial t} = -v_e\frac{\partial}{\partial x'} + \frac{\partial}{\partial t'}$$

Et puisque les vecteurs unitaires sont inchangés (translation).

$$\vec{e}_x = \vec{e}_{x'} \quad ; \quad \vec{e}_y = \vec{e}_{y'} \quad ; \quad \vec{e}_z = \vec{e}_{z'}$$

Finalement

$$\vec{\nabla} = \vec{\nabla}' \quad ; \quad div(\vec{A}) = div'(\vec{A}) \quad ; \quad \overrightarrow{rot}(\vec{A}) = \overrightarrow{rot}'(\vec{A}) \quad ; \quad \Delta\vec{A} = \Delta'\vec{A} \quad ; \quad \frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t'} - (\vec{v}_e \bullet \vec{\nabla}')$$

D'où les équations de Maxwell deviennent.

$div'(\vec{E}') = -\vec{v}_e \bullet \overrightarrow{rot}'(\vec{B}')$	$div'(\vec{B}') = 0$
$\overrightarrow{rot}'(\vec{E}') = -\dfrac{\partial\vec{B}'}{\partial t'}$	$\overrightarrow{rot}'(\vec{B}') = \dfrac{1}{c^2}\left(\dfrac{\partial\vec{E}'}{\partial t'} - v_e\dfrac{\partial\vec{E}'}{\partial x'} - \vec{v}_e \times \dfrac{\partial\vec{B}'}{\partial t'} + \vec{v}_e \times v_e\dfrac{\partial\vec{B}'}{\partial x'}\right)$

Les équations de Maxwell ne sont pas invariantes par changement de référentiel galiléen.

En ce qui concerne les équations de propagation nous avons :

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t'} - (\vec{v}_e \bullet \vec{\nabla}') \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial^2}{\partial t^2} = \frac{\partial^2}{\partial t'^2} + v_e^2\frac{\partial^2}{\partial x'^2} - 2v_e\frac{\partial^2}{\partial t'\partial x'}$$

Donc

$$\Delta\vec{B} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\vec{B}}{\partial t^2} = \vec{0} \quad \Rightarrow \quad \Delta'\vec{B}' - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\vec{B}'}{\partial t'^2} - \frac{v_e^2}{c^2}\frac{\partial^2\vec{B}'}{\partial x'^2} + \frac{2v_e}{c^2}\frac{\partial^2\vec{B}'}{\partial t'\partial x'} = \vec{0}$$

Et

$$\Delta\vec{E} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} = \vec{0} \quad \Rightarrow \quad \Delta'\vec{E}' - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\vec{E}'}{\partial t'^2} - \frac{v_e^2}{c^2}\frac{\partial^2\vec{E}'}{\partial x'^2} + \frac{2v_e}{c^2}\frac{\partial^2\vec{E}'}{\partial t'\partial x'} = \vec{0}$$

Les équations de propagation ne sont pas invariantes par changement de référentiel galiléen.

Conclusion

Les équations de l'électromagnétisme de Maxwell ne sont pas invariantes par changement de référentiel d'inertie quand nous utilisons la transformation de Galilée.

QUESTIONNAIRE DU CHAPITRE I
RELATIVITÉ GALILÉENNE

1. J'observe une petite fille qui saute à la corde à l'intérieur d'un train qui passe devant moi avec une vitesse constante et je remarque que sa trajectoire est une
   a. Droite verticale.
   b. En dents de scie.
   c. Des arcs de parabole.
   d. Sinusoïdale.

2. Je me déplace en voiture sous la pluie avec une vitesse constante par rapport au sol et je remarque que les goutes de pluie décrivent une trajectoire rectiligne inclinée par rapport à ma voiture, alors que quand j'étais à l'arrêt leur trajectoire était verticale. J'en déduis que :
   a. La vitesse des gouttes de pluie est variable par rapport au sol.
   b. La vitesse des gouttes est variable par rapport à la voiture en déplacement.
   c. La vitesse des gouttes est constante dans les deux repères.
   d. La pluie mouille.

3. Un homme court derrière un voleur en lui criant dessus. Mais le voleur, qui n'est autre que Mr. Doppler, remarque que la voix de l'homme est plus aigue comparée à sa voix normale (quand les deux hommes sont à l'arrêt) il en déduit que
   a. L'homme va le rattraper.
   b. L'homme ne pourra pas l'attraper.
   c. Que la distance entre lui et l'homme est constante.
   d. Les hommes ont une voix de femme quand ils courent.

4. Le but de l'expérience (négative) de Michelson et Morley était de démontrer que
   a. La vitesse de la terre est constante par rapport à l'éther.
   b. La lumière à une vitesse constante par rapport à la terre.
   c. La vitesse de la lumière par rapport à la terre est influencée par la vitesse de la terre.
   d. La terre est plate.

5. Dans le dispositif expérimental de Michelson et Morley de la page 16 du cours nous observons une lame de verre transparente sur la trajectoire d'un des rayons. Quelle est son utilité ?
   a. Dévier le rayon lumineux.
   b. Compenser la différence de marche due à la réfraction dans le miroir semi-réfléchissant.
   c. Filtrer la lumière du rayon.
   d. Michelson pensait que le dispositif serait plus joli avec.

6. Parmi les équations suivantes, lesquels sont invariantes par rapport à la transformation de Galilée pour des référentiels galiléens ?
   a. L'équation de Maxwell-Ampère.
   b. Le théorème de Gauss.
   c. L'équation de Maxwell-Faraday.
   d. L'équation de propagation de d'Alembert.