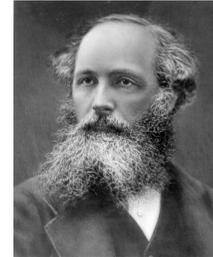


Chapitre 4.1b – L'invariance de la vitesse de la lumière

La vitesse de la lumière et l'électromagnétisme

En 1873, James Clerk Maxwell publia une synthèse des différentes lois de l'électromagnétisme :

- L'électrostatique
- Le magnétisme
- L'induction électrique
- L'induction magnétique



J. C. Maxwell
(1831-1879)

Cette synthèse a pris la forme de quatre équations faisant intervenir le concept de champ électrique \vec{E} , champ magnétique \vec{B} , densité de charge électrique ρ et de densité de courant électrique \vec{J} . Maxwell a également introduit le concept de « courant de déplacement » afin d'unifier le tout :

Équations de Maxwell	Avec charge et courant
Théorème de Gauss	$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$
Sans nom	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$
Loi de Faraday	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
Théorème d'Ampère	$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

Ces quatre équations ont permis d'évaluer théoriquement la vitesse de la lumière :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Malgré ce résultat fort intéressant, plusieurs questions demeuraient en suspend :

- ❖ Quel est le milieu de propagation de la lumière ?
- ❖ Est-ce que la vitesse de la lumière varie d'un référentiel à l'autre ?
- ❖ Est-ce que la lumière peut être transportée par un « vent » ?

L'éther

Afin d'expliquer la propagation de la lumière, les physiciens de la fin du 19^{ème} siècle croyaient qu'il était nécessaire de mieux comprendre le milieu de propagation de la lumière, car la lumière était une onde et qu'une onde devrait nécessairement posséder un milieu pour se propager. C'est pour cette raison que « l'éther » était au cœur de toutes ces discussions. Selon eux, la vitesse de la lumière c obtenue à partir des équations de Maxwell était celle mesurée par rapport à l'éther (milieu de propagation de la lumière) et tout objet en mouvement par rapport à l'éther devait mesurer une vitesse de la lumière différente de c .

L'éther était un milieu très spécial ayant des contradictions :

- L'éther devait être un milieu très tendu et très dense afin de permettre à la lumière de se déplacer aussi rapidement

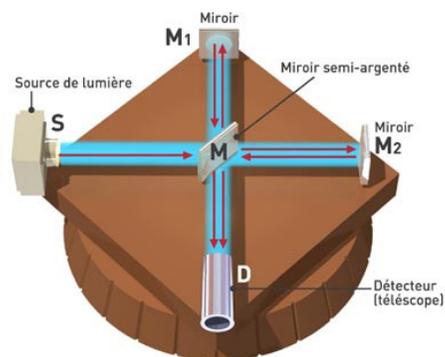
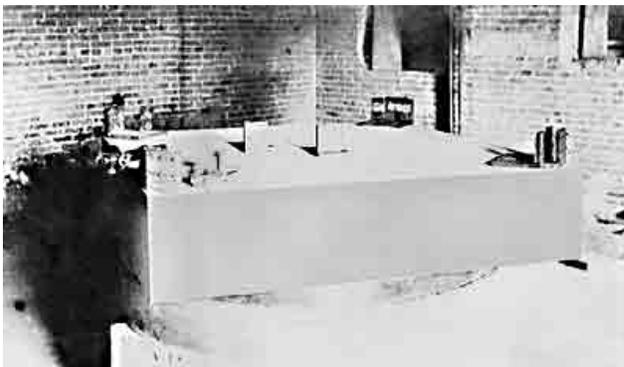
Analogie : Vitesse d'une onde dans une corde $v = \sqrt{F / \mu}$

- L'éther devait être très fluide, car une planète se déplace dans l'espace avec une grande vitesse sans ralentissement

Analogie : Un bateau qui se déplace dans l'eau doit déplacer l'eau autour de lui ce qui provoque un ralentissement.

L'interféromètre de Michelson-Morley

L'expérience d'Albert A. Michelson et Edward Morley (1887) avait pour but d'évaluer la **vitesse de la Terre par rapport à l'éther**. Si la Terre était en mouvement par rapport à l'éther, la vitesse de la lumière provenant d'une source devait subir l'influence d'un « vent »¹. C'est pourquoi l'appareil était conçu pour faire voyager de la lumière dans le sens du « vent » et dans un sens perpendiculaire au « vent ». Puisque la lumière devait effectuer deux trajets de même distance avec des vitesses différentes, une interférence causée par une différence de marche devait être observée au détecteur. Malheureusement, cette observation ne fut pas réalisée et l'expérience fut considérée comme un échec.



¹ On peut définir le « vent » comme la vitesse d'un milieu qui transporte des ondes.

Le conflit entre Galilée et l'électromagnétisme

En plus des observations effectuées grâce à l'expérience de Michelson-Morley, un problème mathématique était toujours présent :

Les équations de Maxwell ne sont pas invariantes sous une transformation de Galilée.

Cette remarque implique que :

Un expérimentateur qui effectue une mesure d'un phénomène électromagnétique dans son référentiel n'obtient pas les mêmes résultats après une transformation de Galilée qu'un autre expérimentateur qui effectue la même mesure, mais dans un autre référentiel.

La transformation particulière de l'électromagnétisme

Afin de régler la question de la transformation des équations de Maxwell, Hendrix Antoon Lorentz a dérivé une nouvelle forme de transformation (transformation de Lorentz) rendant invariante les équations de Maxwell. Cette nouvelle transformation avait des conséquences très inattendues :

- 1) La vitesse de la lumière est une constante pour tous les référentiels inertiels.
- 2) Les distances ne se transforment plus de la même façon.

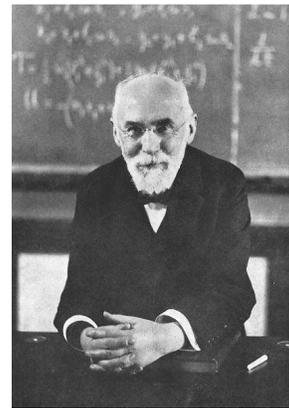
$$D_B \neq D_A + u_{xAB} T_A$$

- 3) Les longueurs ne se transforment plus de la même façon.

$$L_B \neq L_A$$

- 4) Les durées ne se transforment plus de la même façon.

$$T_B \neq T_A$$



H.A. Lorentz
(1853-1928)

Il est important de remarquer que la transformation de Lorentz est identique à la transformation de Galilée lorsque la vitesse relative u_{xAB} est faible par rapport à la vitesse de la lumière ($u_{xAB} \ll c$). On peut donc affirmer que la transformation de Galilée est une approximation à basse vitesse de la transformation de Lorentz.

Ces nouveaux résultats contre intuitifs mènent au dilemme suivant :

Les équations de Maxwell sont bonnes et la transformation la plus complète et la plus générale est celle de Lorentz.

ou

Les équations de Maxwell sont erronées et la transformation de Galilée est toujours vraie quelque soit la vitesse du référentiel.

Albert Einstein et les deux postulats de la relativité

Malgré le travail exceptionnel de Lorentz, plusieurs questions demeuraient sans réponses et les explications étaient insatisfaisantes. En 1905, Albert Einstein publia un 3^{ième} article sur la relativité restreinte basée sur la transformation de Lorentz et les résultats de l'expérience de Michelson-Morley. Il fut en mesure de décrire qualitativement et quantitativement la physique dans n'importe quel référentiel sans l'intervention de « l'éther » si l'on acceptait le fait que la lumière était un invariant (la vitesse de la lumière est constante quelque soit le choix du référentiel). Sa théorie faisait intervenir les deux postulats suivants :



Albert Einstein
(1879-1955)

Postulats 1 : Principe de relativité

Les lois de la physique sont les mêmes dans tous les référentiels inertiels.

Postulats 2 : L'invariance de la vitesse de la lumière

La vitesse de la lumière dans le vide est égale à c dans tous les référentiels inertiels. Elle ne dépend pas du mouvement de la source ni de l'observateur.

Ces deux postulats ont eux les conséquences suivantes :

- 1) Il n'y a pas « d'éther ». La lumière voyage dans le vide et elle interagit avec la matière.
- 2) La lumière se déplace à une vitesse qui est égale à c quel que soit le choix du référentiel.
- 3) Le temps est relatif. L'écoulement du temps entre deux événements dépend du choix du référentiel (*dilatation du temps : Chapitre 4.2*).
- 4) L'espace est relatif. La distance entre deux événements dépend du choix du référentiel (*contraction des longueurs : Chapitre 4.3*).
- 5) La simultanéité est relative. Le moment d'un événement dépend du choix du référentiel (*relativité de la simultanéité : Chapitre 4.4*).

Maintenant, le concept de mesure est entièrement relatif au choix du référentiel :

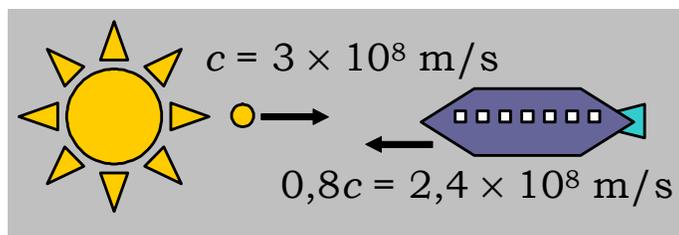
Galilée (Mécanique Newtonienne)	Einstein (Mécanique relativiste)
<ul style="list-style-type: none">• Temps (absolu)• Espace (absolu)• Vitesse de la lumière (relative)	<ul style="list-style-type: none">• Temps (relatif)• Espace (relatif)• Vitesse de la lumière (absolue)

La vitesse de la lumière et deux objets en mouvement

La vitesse de la lumière doit toujours être égale à c par rapport à un référentiel inertiel. Cependant, la vitesse relative de la lumière par rapport à un objet en mouvement d'après un référentiel inertiel qui n'est pas l'objet lui-même peut être différente de c .

Considérons la situation suivante :

Un vaisseau spatial fonce vers le Soleil avec une vitesse de $0,8c$ et rencontre un faisceau de lumière qui fonce vers le vaisseau à vitesse c .



Dans le référentiel du Soleil :

- Le Soleil est immobile.
- Le vaisseau fonce vers le Soleil avec une vitesse égale à $0,8c$.
- Le faisceau de lumière quitte le Soleil avec une vitesse égale à c .
- *Par rapport au Soleil*, la vitesse relative de rapprochement du vaisseau et du faisceau de lumière est égale à $c + 0,8c = 1,8c$.

Dans le référentiel du vaisseau :

- Le vaisseau est immobile.
- Le Soleil fonce vers le vaisseau avec une vitesse égale à $0,8c$.
- Le faisceau de lumière fonce vers le vaisseau avec une vitesse égale à c .
- *Par rapport au vaisseau*, la vitesse relative d'éloignement du Soleil et du faisceau de lumière est égale à $c - 0,8c = 0,2c$.