

*L'expérience de Michelson – Morley***Introduction :**

Un milieu matériel (comme de l'air, de l'eau ou une barre d'acier) traversé par une onde sonore se met à vibrer. Cette onde sonore se déplace d'autant mieux que le milieu est léger et rigide.

Il était alors naturel de penser que les ondes lumineuses avaient également besoin d'un milieu matériel pour se déplacer, même si nous savons maintenant qu'elles se déplacent dans le vide.

Ce milieu matériel a bien été un moment envisagé, il s'agit de l'Ether ou Ether luminifère.

Dans la mythologie grecque, Ether est l'un des Dieux primordiaux, créé en même temps que l'Univers : il personnifie l'air que respirent les Dieux, plus subtil que l'air dense et lourd des mortels.

La lumière se propage, dans ce milieu matériel et hypothétique lié à l'espace absolu immobile, à la vitesse c de l'ordre de 300 000 km/s.

L'Ether doit remplir tout l'espace pour que la lumière issue des étoiles puisse nous parvenir sur Terre.

L'Ether doit être léger et difficile à comprimer puisque la lumière se déplace très vite.

Mais l'Ether ne doit pas offrir trop de résistance aux corps solides qui peuvent le traverser, sinon les planètes seraient ralenties.

L'expérience de Michelson – Morley a été réalisée en 1887. Elle devait permettre de détecter le vent d'Ether, c'est à dire le mouvement de la Terre dans l'Ether, milieu par rapport auquel la vitesse de la lumière devait être c .

Le principe de cette expérience est de comparer les temps mis par la lumière pour faire des allers et retours de longueurs égales dans des directions parallèle et perpendiculaire à celle du mouvement de la Terre autour du Soleil à la vitesse de 30 km/s.

Nous allons dans cette vidéo de la collection « La physique animée » présenter le principe de l'expérience de Michelson - Morley dont l'interprétation des résultats a conduit les physiciens à mettre en doute l'existence du vent d'Ether censé porter les vibrations lumineuses.

Commençons par une compétition entre deux nageuses !

On considère une rivière de largeur d (égale à 100 m par exemple) et deux nageuses qui nagent toutes les deux à la même vitesse v , de l'ordre de 2 km/h.

La rivière coule à allure modérée avec un courant de vitesse u de l'ordre de 1 km/h.

Les nageuses partent toutes les deux du même point A.

L'une d'elle nage directement à travers la rivière vers le point A_1 le plus proche de la rive opposée, puis fait demi-tour et revient à son point de départ.

L'autre reste d'un même côté de la rivière, remontant le courant sur une distance, mesurée le long de la berge, exactement égale à la largeur d de la rivière, puis revient en nageant vers son point de départ.

Laquelle des deux nageuses revient la 1^{ère} à son point de départ ?

La nageuse qui va en face et revient se déplace, aussi bien à l'aller qu'au retour, à la vitesse, par rapport à la rive, donnée par :

$$\vec{V}_{rive} = \vec{v} + \vec{u}$$

Soit, en module :

$$V_{rive} = \sqrt{v^2 - u^2}$$

Le temps qu'elle met pour effectuer l'aller – retour est donc :

$$T_1 = 2 \frac{d}{\sqrt{v^2 - u^2}}$$

Le temps mis par la nageuse qui se déplace le long de la rive vers le point A_2 puis revient au point de départ est :

$$T_2 = \frac{d}{v-u} + \frac{d}{v+u} = 2d \frac{v}{v^2 - u^2}$$

On constate que $T_1 \leq T_2$: la nageuse qui se déplace perpendiculairement au courant gagne la course.

Présentons le principe de l'interféromètre de Michelson :

On considère une source lumineuse monochromatique, c'est-à-dire de longueur d'onde bien déterminée.

- Un rayon lumineux est divisé en deux en tombant sur une lame semi-réfléchissante inclinée d'un angle de 45° .
- Les deux rayons sont réfléchis par les miroirs M1 et M2 et leur figure d'interférence est observée sur l'écran.
- Le premier rayon tombe sur un miroir plan distant de d_1 de la lame. Il y est réfléchi puis dévié par la lame à destination d'un écran.
- Le deuxième rayon tombe sur miroir perpendiculaire au précédent (dans cette configuration appelée « lame d'air ») et distant de d_2 de la lame. Il atteint finalement lui aussi l'écran après traversée de la lame.
- Les deux rayons ont parcouru des trajets différents : ils interfèrent sur l'écran.

Les franges que l'on observe sont des cercles alternativement lumineux et sombres. On les appelle des franges d'égale inclinaison.

Les vidéos de la collection « La physique animée » consacrée à cet interféromètre expliqueront en détails le fonctionnement et l'utilité de cet instrument.

Nous allons, de manière simple, donner le principe de l'expérience historique de Michelson – Morley.

Revenons en 1887 et imaginons que l'Ether existe : la Terre (et l'interféromètre de Michelson) se déplacent dans l'éther, autour du Soleil, à la vitesse u de 30 km/s.

Il revient au même de considérer la Terre immobile dans un « courant d'éther », comme un bateau à l'ancre dans un fleuve.

Réglons l'interféromètre de Michelson pour que la distance entre la séparatrice et les deux miroirs soit la même, notée d .

Plaçons l'interféromètre de telle manière qu'un des bras de l'interféromètre, celui où se trouve le 1^{er} miroir par exemple, soit dans le sens du mouvement de la Terre autour du Soleil, c'est-à-dire, dans le sens du vecteur vitesse \vec{u} , évalué dans le référentiel lié à l'éther dans lequel la vitesse de la lumière est c .

Un faisceau lumineux monochromatique arrive dans l'interféromètre dans la direction du 1^{er} bras.

On envoie ainsi un rayon lumineux en aller-retour dans la direction du courant d'éther vers le 1^{er} miroir et un rayon en aller-retour perpendiculairement au courant vers le 2nd miroir, à l'image de nos deux nageuses qui viennent de faire la course, l'un allant et venant dans la direction du courant, l'autre allant et venant transversalement au courant.

Nous allons calculer, en supposant que la lumière vérifie la loi de composition galiléenne des vitesses, la différence des temps de parcours entre les deux rayons lumineux.

Pour le rayon lumineux se déplaçant transversalement, à l'image de notre nageur ayant gagné la course, le temps de parcours est :

$$T_1 = \frac{2d}{\sqrt{c^2 - u^2}} \approx \frac{2d}{c} \left(1 + \frac{u^2}{2c^2} \right) \quad (\text{car } u \ll c)$$

Pour le rayon lumineux se déplaçant dans la direction du courant d'éther, à l'image du nageur longeant la rive, le temps de parcours est :

$$T_2 = \frac{d}{c-u} + \frac{d}{c+u} = \frac{2dc}{c^2 - u^2} \approx \frac{2d}{c} \left(1 + \frac{u^2}{c^2} \right)$$

La différence des temps de parcours vaut alors :

$$T_2 - T_1 = \frac{du^2}{c^3}$$

La différence de marche entre les deux rayons et l'ordre d'interférences sont :

$$\delta = c(T_2 - T_1) = \frac{u^2}{c^2} d \quad \text{et} \quad p = \frac{\delta}{\lambda_0} = \frac{u^2}{c^2} \frac{d}{\lambda_0}$$

Faisons tourner maintenant l'interféromètre de 90°, de telle manière que le 1^{er} miroir soit désormais placé perpendiculairement au courant d'éther. L'ordre d'interférence prend alors une valeur opposée à celle que nous venons de calculer.

Ainsi, en faisant tourner l'interféromètre, on devrait observer une variation de l'intensité lumineuse sur un écran situé à la sortie de l'interféromètre, variation due au changement d'orientation des bras de l'interféromètre par rapport à la direction du mouvement de la Terre.

Donnons quelques ordres de grandeur.

Prenons, par exemple, $d = 10$ m et une longueur d'onde de 500 nm. Avec :

$$u = 30 \text{ km.s}^{-1} \text{ et } c = 3.10^8 \text{ ms}^{-1}$$

On trouve une variation de l'ordre d'interférences de l'ordre de 0,2, qui aurait pu être observée.

Mais, l'expérience de Michelson et Morley, reproduite de nombreuses fois depuis, n'a jamais mis en évidence de différence d'intensité lumineuse lors de rotations de l'interféromètre : un « courant d'éther » semble bien indétectable.

Le résultat négatif de l'expérience de Michelson - Morley permet d'émettre plusieurs hypothèses, comme par exemple :

- La mesure n'est pas assez précise
- Le référentiel terrestre est immobile par rapport à l'éther
- La célérité de la lumière est c dans l'éther mais aussi dans le référentiel terrestre

Mais alors, que représente véritablement la vitesse de la lumière c dans le vide ? Par rapport à quel référentiel est-elle mesurée si le concept d'Ether lié à l'espace absolu et immobile n'existe pas ?

Albert Einstein en 1905 a postulé que la vitesse de la lumière dans le vide avait la même valeur dans tous les référentiels galiléens.

Ce principe, conjugué au principe de relativité déjà énoncé par Galilée, stipulant que toute expérience faite dans un référentiel galiléen se déroule de manière parfaitement identique dans tout autre référentiel galiléen, a permis à Einstein de construire, en 1905, la théorie de la relativité restreinte.

Prédites théoriquement il y a un siècle dans le cadre de la Relativité Générale, les ondes gravitationnelles ont été détectées récemment par les expérimentateurs alors même qu'Einstein pensait que les déformations de l'espace-temps dues à ces ondes étaient si faibles qu'elles ne pourraient jamais être détectées directement.

Des événements astrophysiques comme des formations de trous noirs ou des coalescences d'objets compacts génèrent de telles ondes qui vont modifier la métrique de l'espace – temps.

Ce sont ces ondes, générées à plus d'un milliard d'années-lumière de la Terre, que les deux interféromètres géants américains du projet LIGO – l'un situé en Louisiane, l'autre

à 3 000 kilomètres, dans l'État de Washington – ont observées simultanément le 14 septembre 2015.

Le projet européen Virgo a été inauguré en juillet 2003 à Cascina en Italie et modernisé récemment. C'est un interféromètre de Michelson géant dont les bras mesurent 3 km de long et capable de démultiplier le trajet optique parcouru par la lumière jusqu'à 120 km.

Ces interféromètres de Michelson géants seront rejoints, vers 2030, par eLISA, une constellation de trois satellites artificiels, un satellite "père" et deux satellites "fils" en orbite héliocentrique et formant un triangle équilatéral d'un million de kilomètres de côté.

Au passage d'une onde gravitationnelle les distances des deux bras de eLISA seront perturbées du fait des déformations de l'espace temps produites par l'onde gravitationnelle.
