

L'histoire de la relativité restreinte

« *Oh temps suspend ton vol* » disait le poète, « *le temps s'immobilise aux Marquises* » chantait Jacques Brel, mais il est démontré que lorsque le temps devient infini les distances s'annulent. Que deviennent alors ces métaphores au vu de la physique contemporaine ?

Cet article vous apporte ici un éclairage, ouvrant sur l'existence de l'éternité que l'on atteindrait si l'on se déplaçait à la vitesse de la lumière...

1. Les origines

A la fin du XIX^{ème} siècle, la belle théorie mécanique sur laquelle est assise la physique suscite quelques interrogations.

Les expériences de Thomas Young et leur formalisation mathématique par Augustin Fresnel vers 1815 apportent la preuve que la lumière est une onde. Or, une onde a besoin d'un support pour se propager. Le vide intersidéral, dans lequel la lumière voyage, est donc forcément constitué de quelque chose : ce sera l'éther... même si ses propriétés sont paradoxales. Il doit en effet être infiniment souple pour ne pas perturber le mouvement des planètes, et en même temps infiniment rigide pour ne pas perturber la lumière dans lequel elle se propage !

En 1873, James Clerk Maxwell publie les célèbres équations établissant les lois de l'électromagnétisme. Or, dans tout référentiel galiléen (voir chapitre suivant), toutes les lois physiques s'appliquent de la même manière... sauf les équations de Maxwell ! Une explication simple permettra de justifier cette exception : les ondes électromagnétiques se propagent dans l'éther, et l'éther est un référentiel immobile, donc un référentiel absolu.

2. Les référentiels galiléens

Un référentiel est un ensemble d'éléments fixes les uns par rapport aux autres. Ainsi un bateau, un quai, la Terre, peuvent être assimilés à des référentiels. C'est Galiléo Galilei (Galilée) qui constate et formalise que, dans tout référentiel, à condition qu'il soit animé d'un mouvement rectiligne et uniforme, dénommé de fait « référentiel galiléen », les lois physiques s'appliquent, et ce quelle que soit la vitesse du référentiel. Exemple : à bord d'un bateau, si sa vitesse est constante et linéaire, et sans repère extérieur, tout se passe comme s'il était à quai. « Le mouvement est comme rien », écrira-t-il.

Mais revenons à l'éther : étant donné qu'il est immobile dans l'Univers, le déplacement de la Terre dans cet éther devrait se traduire comme un « vent » d'éther à sa surface. Donc la vitesse d'un rayon lumineux devrait s'ajouter ou se retrancher à la vitesse de la Terre, suivant que ce rayon lumineux se propage dans le sens de ce « courant » d'éther, ou dans une autre direction, à l'image d'un nageur qui va plus vite par rapport à la rive lorsqu'il nage dans le sens du courant.

En 1881, Albert Abraham Michelson décide de mettre en évidence l'effet de ce vent d'éther sur la vitesse de la lumière. Avec Édouard Morley, ils vont mener, entre 1881 et 1887, une série d'expériences devenues célèbres : elles consistent à mesurer la différence de vitesse d'un faisceau lumineux lorsque celui-ci se propage dans le sens du déplacement de la Terre, et lorsqu'il se propage dans le sens perpendiculaire. Les mesures sont faites en différents lieux et à différentes périodes de l'année, en recherchant une reproductibilité maximale. Or, contre toute attente, ces expériences ne montrent aucune variation de la mesure de la vitesse de la lumière !

3. La vitesse de la lumière

La vitesse d'un objet n'est pas absolue : elle est toujours mesurée par rapport à quelque chose. On le vérifie tous les jours lorsqu'on emprunte un tapis roulant : on se déplace plus rapidement par rapport au quai (V) car notre vitesse (v_1) s'ajoute à celle du tapis (v_2). C'est la loi d'additivité des vitesses : $V = v_1 + v_2$. Or, les expériences de Morley-Michelson montrent que cette additivité des vitesses semble ne pas s'appliquer à la vitesse de la lumière : c'est comme si, mesurée depuis le quai ou depuis le tapis roulant, donc quel que soit le référentiel depuis lequel on la mesure, elle a toujours la même valeur !

La vitesse de la lumière est en réalité une vitesse limite dans l'Univers, donc indépassable. Pourquoi indépassable ? Parce que c'est la vitesse de tout ce qui n'a pas de masse (l'énergie, l'information...). Ce n'est donc pas la vitesse de « quelque chose », si bien que pour la distinguer de la vitesse d'un objet, on la désigne par la lettre c , de célérité, et non par la lettre v , de vitesse.

c est une constante de l'Univers, qui n'aurait rien à voir avec la lumière si celle-ci n'était composée de particules¹ de masse nulle ! On comprend aisément que c ne peut pas s'additionner à la vitesse du référentiel qui l'émet, car alors on obtiendrait une vitesse supérieure à c , ce qui n'est pas possible.

Prenant en compte l'invariabilité de c , Henri Poincaré et Hendrik Lorentz reformulent la loi d'additivité

des vitesses. Ainsi, la formule habituelle $V = v_1 + v_2$, devient
$$V = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 \cdot v_2}{c^2}}$$

On vérifiera aisément que, dans cette nouvelle forme, c ne s'ajoute pas à la vitesse du référentiel : en effet, lorsque $v_1 = c$, alors $V = c$, et ce quelle que soit la vitesse du référentiel v_2 , et inversement.

La loi d'additivité des vitesses, telle qu'on la connaît, s'avère être une approximation ! Approximation largement suffisante pour nos vitesses habituelles, car même à plusieurs milliers de km/h, l'écart ne joue que sur la dixième décimale ! Il faut atteindre des vitesses de l'ordre de 100 000 000 km/h (soit $1/10^{\text{ème}}$ de c) pour que l'écart entre les deux formules soit perceptible, quoique d'à peine 1%...

4. Le temps

Avec l'invariance de c , la transformation dite de Galilée elle non plus ne s'applique plus. Rappelons qu'elle permet d'exprimer les coordonnées $\{x, y, z, t\}$ d'un point dans un référentiel [2] $\{x_2, y_2, z_2, t_2\}$, qui se déplace à la vitesse v (suivant l'axe x) par rapport au référentiel [1] $\{x_1, y_1, z_1, t_1\}$.

Elle s'exprime sous la forme :

$$\begin{aligned}x_2 &= x_1 - vt \\y_2 &= y_1 \\z_2 &= z_1 \\t_2 &= t_1 \quad (\text{le temps est absolu})\end{aligned}$$

La prise en compte de l'invariance de c va aboutir à la transformation dite de Lorentz :

$$\begin{aligned}x_2 &= \gamma(x_1 - vt) \\y_2 &= y_1 \\z_2 &= z_1 \\t_2 &= \gamma\left(t_1 - \frac{v x_1}{c^2}\right)\end{aligned}$$

¹ C'est Albert Einstein qui, pour expliquer l'effet photoélectrique, arrivera à la conclusion que la lumière est constituée de particules. Elles seront baptisées « photon » par Frithiof Wolfers et Gilbert N. Lewis en 1926.

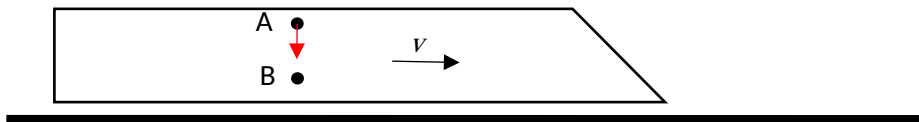
Dans cette nouvelle expression apparaît un coefficient, dit facteur de Lorentz :
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Mais surtout apparaît un temps t_2 , dénommé « temps local », qui n'est plus égal à t_1 ! Pour les scientifiques du début du XX^{ème} siècle, comme pour le commun des mortels, il n'est pas imaginable que le temps puisse ne pas être absolu ! Tous nos sens et notre intuition le confirment : une seconde a la même durée pour tout le monde, et ce quel que soit l'endroit où on se trouve. Ainsi, Poincaré comme Lorentz, imprégnés de la pensée de la communauté scientifique, et baignés dans cet environnement, vont considérer cette valeur de t_2 comme un artifice de calcul, sans réalité physique. Ils vont même aller plus loin : pour expliquer ce temps local différent, Lorentz et, indépendamment de lui, George Fitzgerald, considèrent qu'un objet, de par son déplacement dans l'éther, voit sa dimension se contracter du facteur γ , et uniquement dans la direction du mouvement !

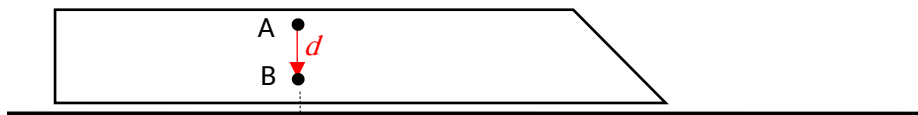
5. La relativité du temps

Albert Einstein a deux atouts: il est doté d'une intuition géniale, et surtout il est isolé : ainsi, il n'est pas influencé par la pensée « officielle » de la communauté scientifique. Et il a une logique implacable : il ne croit pas à l'existence de l'éther, dont les propriétés sont contradictoires. Donc la lumière se déplace dans le vide. Donc ce n'est pas une onde. Concernant le temps, si les équations font apparaître un temps t_2 , c'est que t_2 est réellement le temps mesuré dans le référentiel [2], donc le temps n'est pas absolu. Il faut bien comprendre qu'affirmer que le temps n'est pas absolu est tout simplement révolutionnaire. Einstein nous révèle le monde tel que personne n'a osé l'imaginer : dès qu'on se déplace, notre temps propre s'écoule plus lentement !

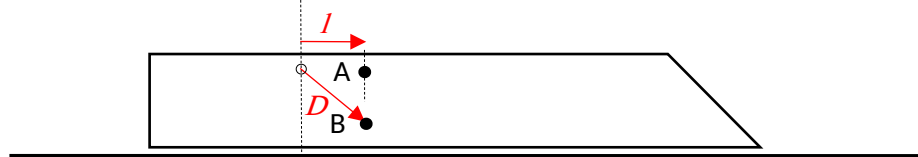
L'exemple suivant, à l'image des expériences de pensée d'Einstein, va nous permettre de vérifier la réalité de cette dilatation du temps.



Supposons un train qui se déplace à une vitesse constante v , et dans ce train, un faisceau lumineux, qui se déplace donc à la vitesse c , émis verticalement du point A vers le bas.



Pour un voyageur situé dans le train, le faisceau met le temps t pour parcourir la distance $d = AB$.



Par contre, pour un observateur situé sur le quai, pendant ce même temps t , le train, lui, a parcouru la distance $l = v \cdot t$: ainsi, pour cet observateur, le faisceau a parcouru la distance D .

Nous avons donc : pour le voyageur dans le train, $d = c \cdot t$; et pour l'observateur sur le quai, $D = c \cdot t$! Or, d et D n'ayant pas la même valeur, il n'y a qu'une solution : la durée t , pendant laquelle le

faisceau va de A à B, doit être différente pour le voyageur, qui se déplace à la vitesse v , et pour l'observateur, qui lui est immobile par rapport à ce voyageur !

Notons t_1 la durée du temps vu et vécu depuis le quai, et t_2 celle du temps vu et vécu dans le train. Depuis le quai : $D=c.t_1$, et dans le train : $d=c.t_2$. Or, $D^2=d^2+l^2$, soit $(c.t_1)^2=(c.t_2)^2+(v.t_1)^2$. En manipulant cette équation, on aboutit à $c.t_2=t_1\sqrt{c^2-v^2}$.

$$\text{Soit : } t_2 = \frac{c}{\sqrt{c^2-v^2}} = \frac{c}{\sqrt{c^2\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)}} = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}, \text{ qui n'est autre que } \gamma, \text{ le facteur de Lorentz !}$$

Ce rapport est désigné « facteur de dilatation du temps ». Pourquoi dilatation ? Parce que le dénominateur est toujours inférieur à 1, donc t_1 est toujours supérieur à t_2 . Cela signifie que, dès qu'on se déplace, notre temps ralentit : il s'écoule moins vite que celui de toute autre personne restée immobile ! On notera toutefois que celui qui se déplace ne se rend compte de rien, d'une part parce que cet écart est infime, mais surtout parce que, pour lui, le temps est toujours le même : sa montre marque toujours les secondes, son rythme biologique est inchangé, et il vit toujours 70 ou 80 ans. Il ne peut donc pas ressentir ce ralentissement du temps : il n'en prendra conscience qu'en comparant sa montre avec celle de celui qui est resté immobile, et constater qu'elle retarde ...

Il est donc tout à fait normal que cette dilatation du temps avec la vitesse nous soit difficile à admettre, d'autant plus qu'elle n'a jamais eu d'impact sur notre vie quotidienne... jusqu'à la mise en service des satellites de géolocalisation qui tournent autour de la terre. Leur vitesse (3,8 km/s), bien qu'elle soit négligeable par rapport à c ($\frac{v}{c}=12,7 \cdot 10^{-6}$) engendre, au bout d'une journée, un écart entre t_1 (la durée du temps au sol) et t_2 (la durée du temps à bord des satellites) de 7 μ s : sans correction entre la valeur affichée par les horloges embarquées sur les satellites et celles restées au sol, cet écart se traduirait par une erreur de $7 \cdot 10^{-6} \times 3 \cdot 10^8$, soit 2 km² !

C'est au début des années 1940 que Bruno Rossi va apporter une première vérification de la dilatation du temps. La terre est continuellement bombardée par des rayons cosmiques³ qui, à la suite de désintégrations successives au contact de l'atmosphère, donnent naissance à des muons. Les muons ont une très faible durée de vie : 2,2 μ s (2,2 10^{-6} s). A des vitesses proches de celle de la lumière, cette durée de vie ne devrait leur permettre de parcourir guère plus de 600 m ($3 \cdot 10^8 \times 2,2 \cdot 10^{-6}$). Or, ils parcourent plus de 50 km, puisqu'ils atteignent la surface de la terre ! C'est la dilatation du temps qui explique cet apparent paradoxe : à $v=0,99995 \cdot c$, γ vaut 10^{-2} . Á cette vitesse, le temps propre du muon, donc sa durée de vie, se dilate d'un facteur 100 : 2,2 μ s correspondent pour lui à 220 μ s, ce qui lui laisse le temps de traverser l'atmosphère.

Mais ce constat nous révèle un autre aspect du ralentissement du temps, tout aussi inattendu et déstabilisant : il s'agit de ce qui est désigné par le terme « contraction des longueurs » ! Dans le cas des muons, ils parcourent l'épaisseur de l'atmosphère (35 km) en 2,2 μ s, ce qui n'est pas possible, car ils devraient pour cela se déplacer à 100 fois la vitesse de la lumière ! Cela signifie que, si le temps se dilate, les distances, elles, se contractent dans le même rapport : 50 km se contractent en 500 m, distance franchissable par le muon pendant sa courte durée de vie ! Attention toutefois : les dimensions ne se contractent pas physiquement⁴, elles apparaissent réduites.

En conséquence, mesurer la longueur d'un objet n'a de sens que dans le référentiel depuis lequel est faite cette mesure, car cette mesure donnera un résultat différent si on la fait depuis un autre référentiel. De même, l'instantanéité n'existe pas. Parler de la simultanéité de deux évènements n'a

² Ce n'est pas tout à fait exact, car il faut tenir compte d'une autre variation du temps : la contraction du temps due à la différence d'altitude entre les satellites et le sol. Elle est décrite par la relativité générale, mais c'est une autre histoire ...

³ Découverts par Victor Hess en 1912.

⁴ Contrairement à ce que proposaient Lorentz et Poincaré dans l'éther.

de sens que dans un même référentiel galiléen, et n'a plus de sens dans un autre, car le temps ne s'y écoule pas de la même façon !

6. La théorie de la relativité restreinte

La théorie de la relativité restreinte⁵ nous révèle que notre univers n'est pas à trois mais à quatre dimensions ; les trois dimensions spatiales traditionnelles, et la dimension temporelle. Nous ne vivons donc pas dans un espace, mais dans un « espace-temps », terme proposé quelques années plus tard par Hermann Minkowski qui formalisera cette nouvelle réalité.

En conclusion, et comme pour beaucoup de découvertes, celle de la théorie de la relativité restreinte résulte de la conjugaison de plusieurs événements :

- la preuve, fortuite, du caractère absolu de la vitesse de la lumière par Michelson et Morley, alors qu'ils cherchaient à démontrer l'existence de l'éther ;
- la découverte du temps « local » par Poincaré et Lorentz, mais qui l'ont considéré comme un artifice mathématique sans lui attribuer de réalité physique ;
- et le génie d'Einstein, qui est allé à l'encontre du bon sens en remettant en cause ce qui était une évidence en ce début de XXe siècle : l'existence de l'éther, la nature de la lumière, et le caractère absolu du temps. Même grandement aidé par son isolement, il fallait oser !

⁵ Relativité, car il n'existe pas d'espace absolu, donc exit l'éther, et restreinte, car ce principe ne prend pas en compte la gravité.