JEAN-MARC GINOUX

VOYAGE DANS LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ

ellipses

1. Le principe de relativité

Quelles différences de sensations peut-on observer lorsque l'on est soit immobile, soit en mouvement en ligne droite à vitesse constante, c'est-à-dire en mouvement rectiligne uniforme ?

Si vous avez déjà fait cette expérience dans un train, un bateau ou en avion, vous savez que la réponse est AUCUNE.

Par exemple, lorsque vous êtes assis dans vous un train se déplaçant en ligne droite à vitesse constante, vous ne fournissez pas un effort supplémentaire en revenant du wagon restaurant qu'en y allant, les deux trajets sont absolument équivalents du point de vue de l'effort physique. De même, que vous soyez immobile ou en mouvement rectiligne uniforme, vous pouvez vous servir un verre d'eau sans aucun problème. En revanche, lorsque vous êtes dans un avion en train de décoller, vous savez qu'aucune hôtesse ni aucun steward ne vous servirait une quelconque boisson car le liquide manquerait infailliblement le verre du fait de l'accélération de l'avion. Mais, lorsque l'avion atteint sa vitesse de croisière, c'est-à-dire lorsqu'il vole en ligne droite à vitesse constante (généralement à environ 900 km/h à 9 000 mètres d'altitude), le personnel de bord commence à servir à boire (et à manger) aux passagers. De plus, dans cette situtation, s'il n'y aucun nuage dans le ciel et aucun point de repère au sol visible, il vous est absolument impossible de savoir si vous êtes oui ou non en train de voler. Vous éprouvez exactement les mêmes sensations que lorsque l'avion était immobile sur le tarmak dans l'attente du décollage. Toutes ces sensations, qui correspondent à des phénomènes caractérisés par les lois de la Physique, comme le mouvement, l'écoulement d'un fluide, ou même la chute des corps, sont les mêmes dans les deux situations. C'est le *principe de relativité*. Contrairement à ce que l'on pourrait ce principe a été initialement proposé par le physicien italien Galilée en 1633 dans son désormais célèbre ouvrage intitulé *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*[1] qui lui valut les foudres de l'Inquisisition puisqu'il donnait contre l'Église la préférence au système héliocentrique. Galilée imagine deux amis enfermés sous le pont d'un bateau d'abord immobile qui se lancent un ballon, observent un oiseau qui vole et un poisson qui nage dans un aquarium. Il explique alors que lorsque le navire vogue en

1. Galilée, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, publié en 1632, traduction par René Fréreux et François de Gandt. Paris, Seuil, Points Sciences, 2000, 672 p.

ligne droite à vitesse constante (en l'absence bien entendu de tout roulis et tangage), la force nécessaire pour envoyer le ballon est la même pour l'un comme pour l'autre, l'oiseau vole sans effort dans une direction comme dans l'autre. Il en va de même pour le poisson dans son aquarium. Galilée en déduit que le « mouvement est comme rien », c'est-à-dire qu'il est impossible de discerner l'état de mouvement rectiligne uniforme de l'immobilité. Ces deux situations sont absolument identiques du point de vue des lois de la Physique et aucun effet observable ne permet de les différencier.

Comparons maintenant, le cas d'un voyageur en mouvement rectiligne informe, assis dans un train par exemple, à celui d'une personne immobile comme par exemple le chef de gare qui regarde partir le train. Chacun d'eux possède deux caractéristiques cinématiques propres : une position et une vitesse :

- le chef de gare immobile sur le quai a une certaine position fixe et une vitesse nulle,
- le voyageur dans le train a une position qui varie au fil du temps et une vitesse égale à celle du train.

Est-il possible de relier la position du voyageur à celle du chef de gare ?

Intuitivement, la réponse est oui puisqu'on se déplace toujours par rapport à quelque chose. Poincaré écrit à ce propos en 1902 dans la *Science et l'Hypothèse* :

> « Nous ne concevons que des mouvements relatifs[1]. »

En effet, lorsqu'un objet est en mouvement, on ne peut constater son déplacement que par rapport à quelque chose d'immobile par rapport à lui et qui constitue un repère (on dit aussi référentiel). Tout objet en mouvement possède donc une position (qui varie en fonction du temps) et une vitesse (qui transcrit cette variation de position par rapport au temps). Puisque cette position varie par rapport au temps, on peut se poser la question suivante :

1. Henri Poincaré, *La Science et l'Hypothèse*, Flammarion, Paris, 1902, 284 p.

Est-il possible de relier le temps du voyageur à celui du chef de gare ?

En d'autres termes, le temps s'écoule-t-il de la même manière dans le train et sur le quai ? Si l'on exclut l'hypothèse du voyage dans le temps, il faut répondre par la négative à cette question et faire l'hypothèse que le temps s'écoule de la même manière pour un objet en mouvement comme pour un observateur immobile. En effet, si l'on voyage en train en France entre Toulon et Paris par exemple, il va de soi que le temps à l'intérieur du train s'écoule de la même manière que le temps à l'extérieur. En réalité pas tout à fait ! On verra bientôt que lorsque la vitesse d'un objet s'approche de celle de la lumière, le temps cesse d'être considéré comme absolu et devient relatif. Ainsi, on aboutit à la conclusion qu'il doit exister une relation (mathématique) entre la position du voyageur et celle du chef de gare et une relation entre le temps dans le train et le temps sur le quai. Cette relation porte le nom de *transformation* puisqu'elle transforme les coordonnées d'espace (position) et de temps du voyageur en celles du chef de gare et inversement. On lui a donné le nom de *transformation de Galilée* en hommage à ce grand génie qui est à l'origine du *principe de relativité*. Si par exemple le chef de gare est très précisément devant la fenêtre du wagon du voyageur avant que le train ne démarre, alors sa position coïncide exactement avec celle du voyageur et son temps aussi. En d'autres termes, ils sont au même endroit et au même moment. Lorsque le train démarre, la position du voyageur s'éloigne au fil du temps de celle du chef de gare. C'est un peu le principe du train aussi !

Imaginons maintenant une dernière situation. Le voyageur, dans le train qui se déplace toujours en ligne droite à vitesse constante, décide d'aller au wagon restaurant vers l'avant du train.

Comment s'exprime la vitesse d'un homme qui dans marche dans un train en marche ?

Intuitivement, on pense que par rapport sol la vitesse de l'homme s'ajoute à celle du train et qu'elle se soustrait lorsqu'il fait demi-tour.

$$\boxed{V_{homme/sol} = V_{homme/train} \pm V_{train/sol}}$$

C'est la loi d'addition des vitesses classiques

Dans ce premier chapitre, on a donc définit ainsi ***le principe de relativité*** :

Toutes les lois de la physique sont les mêmes que l'on soit immobile ou en mouvement rectiligne uniforme.

Ce qui implique :

Qu'il est impossible de différencier l'état de repos de l'état de mouvement rectiligne uniforme.

Ce principe implique l'existence d'une *transformation* dite de Galilée reliant les coordonnées (position) d'un objet immobile à celle de objet en mouvement rectiligne uniforme. De cette transformation découle (dérive au sens mathématique) la ***loi d'addition des vitesses classiques.*** Du point de vue de la logique, il est important de souligner que le *principe de relativité* implique l'existence d'une *transformation* (dite de Galilée) laquelle implique à son tour une *loi d'addition des vitesses*.

Principe de relativité

↓

Transformation de Galilée

↓

Loi d'addition des vitesses

On verra bientôt que la violation de cette loi aura pour effet de remettre en cause le principe de relativité.

Pourquoi parle-t-on de relativité restreinte ?

Pour répondre à cette question, imaginons un exemple que chacun de nous a déjà pu expérimenter en voiture et qui est la cause hélas de bon nombre de carambolages. Considérons les deux situations suivantes : dans la première deux voitures sont stationnées à 50 mètres l'une de l'autre. Dans la seconde, ces deux mêmes voitures roulent en ligne droite à la vitesse 100 km/heure chacune et se trouve à 50 mètres de distance l'une de l'autre. Quelle différence y a-t-il entre ces deux situations ? Absolument aucune. Deux automobilistes qui se suivent à la même vitesse et à quelques dizaines de mètres l'un de l'autre se trouvent dans la même situation que s'ils étaient arrêtés. C'est malheureusement la cause de nombreux

accidents de la route[1]. En effet, ces deux situations sont les mêmes du point de la Physique conformément au *principe de relativité*, tant que les deux voitures ont des vitesses constantes et se trouvent donc à égale distance l'une de l'autre. Il existe donc une infinité de situations parfaitement identiques à celle-ci. Par exemple, deux voitures roulant à 101 km/h à une distance de 49 mètres l'une de l'autre, etc... Ainsi, puisqu'il existe une infinité de repères (*référentiels*), tous équivalents, par rapport auxquels on pourrait décrire toutes ces situations, on parle de *relativité*[2]. Mais alors :

Pourquoi dit-on de cette relativité qu'elle est restreinte ?

Voyons un dernier exemple pour illustrer la réponse à cette question. Considérons un avion de chasse. Il est bien connu que lorsque le pilote effectue un *looping* (une boucle) vers le haut ou vers le bas, il subit une accélération environ égale à 5 ou 6 fois son poids (on dit 5 ou 6 *g*). Ainsi donc, on peut dire en quelque sorte que

« lorsqu'on tourne, on accélère. »

La *relativité* est dite *restreinte* car cette équivalence entre référentiels est limitée aux seuls référentiels qui se déplacent en ligne droite à vitesse constante, c'est-à-dire en *mouvement rectiligne uniforme* les uns par rapport aux autres.

1. À la vitesse de 100 km/h, la distance d'arrêt d'un véhicule de tourisme est de 80 mètres sur sol sec et 105 mètres sur sol mouillé.
2. Il n'existe en effet aucun *référentiel absolu* unique dans l'Univers par rapport auquel on pourrait exprimer les lois de la Physique.

2. Contexte historique

En 1845, le savant néerlandais Christoph Buys-Ballot engage un groupe de musiciens pour jouer une note bien précise sur un wagon du train entre Utrecht et Amsterdam. En comparant la fréquence de cette note à celle jouée au sol par une partie de l'orchestre, il montre que la note perçue est plus aiguë lorsque le train s'approche et plus grave lorsque le train s'éloigne des observateurs au sol. Durant les trois années qui suivent, le savant autrichien Christian Doppler d'un côté et le français Hippolyte Fizeau de l'autre sont alors à même d'expliquer cet étrange phénomène que l'on appelle depuis l'effet Doppler-Fizeau. De nos jours, le cas de la sirène d'un camion de pompier représente un exemple analogue à celui de l'orchestre jouant une note sur un wagon de train. Tout un chacun a pu facilement vérifier que lorsqu'un camion de pompier s'approche de nous, le son produit par sa sirène nous paraît plus aigu alors qu'il nous paraît plus grave quand il s'éloigne. Cet exemple est également analogue à celui d'un homme qui marche dans un train que l'on a vu au chapitre précédent. Cet homme vérifie bien le *principe de relativité* puisque sa vitesse s'ajoute à celle du train selon la *loi d'addition des vitesse*s qui en découle. Il en va de même pour la sirène dont le son est modulé par la vitesse du camion de pompier.

Au début du XIXe siècle, le savant danois Christian Oersted montre que le passage d'un courant électrique dans un fil électrique produit un champ magnétique capable de faire dévier l'orientation d'une boussole qui n'indique alors plus du tout le nord. Quelques décennies plus tard, le physicien anglais Michael Faraday démontre que lorsqu'un aimant traverse une bobine de fil électrique cela produit un courant électrique. Vers 1860, le physicien écossais James Clark Maxwell réunit Électricité et *Magnétisme* sous la forme de quatre équations qui décrivent ces phénomènes et portent désormais son nom. Les équations de Maxwell constituent l'analogue *Électromagnétique* des lois de la *Mécanique* de Newton. Maxwell établit alors que leur solution représente la propagation d'un *champ électromagnétique*, c'est-à-dire d'une *onde électromagnétique* qui sera bientôt utilisée dans la radiocommunication et dans la télécommunication telle que la connaissons aujourd'hui. Ainsi, lorsque vous téléphonez avec votre téléphone portable, il produit un *champ électromagnétique*, qui génère une *onde électromagnétique* qui transporte votre message. Maxwell démontre

ensuite que les ondes électromagnétiques se propagent à la vitesse de la lumière. Il en déduit par une simple analogie que la lumière est une onde électromagnétique.

Avec l'*Electromagnétisme*, la question se pose de déterminer l'influence du mouvement de la source sur la propagation de ces ondes électromagnétiques. Par exemple, imaginez que vous soyez à bord d'un TGV se déglaçant ligne droite à la vitesse de 300 km/h. Vous décidez d'appeler un ami. Si l'on suppose qu'il n'y a aucun tunnel et que vous ne perdiez pas le réseau, le mouvement du train modifie-t-il d'une quelconque manière votre échange téléphonique ? Évidemment non ! En fait, tout se passe comme si le mouvement du TGV n'avait aucune influence sur le signal. Pourquoi ? On a vu plus haut avec l'effet Doppler-Fizeau que dans le cas du son le mouvement de la source produit une modification de sa fréquence. Puisque la lumière est une onde (électromagnétique et non acoustique, certes !), pourquoi cela serait-il différent pour de la lumière ? Pour tester cette hypothèse, les physiciens américains Albert Michelson et Édouard Morley tentent de mesurer la vitesse de la Terre autour du Soleil. Pour y parvenir ils utilisent la lumière du Soleil et la loi d'addition des vitesses. Selon cette loi lorsque la Terre va vers la lumière du Soleil sa vitesse doit se soustraire à celle de la lumière et lorsqu'elle s'en éloigne sa vitesse doit s'ajouter à celle de la lumière. De 1881 à 1887, au cours de leurs désormais célèbres expériences ils ne parvinrent jamais à mettre en évidence une quelconque différence pour la vitesse de la lumière. Ils auraient du obtenir 300 000 ± 30 km/s et ne trouvèrent que 300 000 km/s, c'est-à-dire la vitesse de la lumière. Outre, cette violation manifeste de la *loi d'addition des vitesses*, tout se passait finalement comme si la Terre était immobile dans l'univers !

Comment expliquer l'échec de ces expériences qui ont duré de 1881 à 1887 et dont le protocole expérimental semblait irréprochable ?

Fallait-il remettre en question :

> Le principe de relativité la loi d'addition des vitesses qui en découle ?

Du point de vue de la logique formelle et d'après Aristote :

« La fausseté de la conséquence présuppose celle du principe et permet donc de le réfuter, du vrai ne peut suivre le faux. »

Si le premier, alors le second or pas le second, donc pas le premier.

Par exemple :

> s'il fait jour, il fait clair,
> il ne fait pas clair, donc il ne fait pas jour.

La *loi d'addition des vitesses* semblait être dans l'incapacité de révéler le mouvement de la Terre autour du Soleil. Il paraissait donc logique d'abandonner le *principe de relativité*. Néanmoins, il ressortait des expériences de Michelson et Morley que le Terre n'avait, semble-t-il, aucune influence sur la propagation de la lumière, c'est-à-dire sur les phénomènes électromagnétiques conformément au *principe de relativité*. Rappelons que du *principe de relativité* découle une *transformation* dite de Galilée reliant les coordonnées (position) d'un objet en mouvement à celles d'un objet immobile nommé repère ou référentiel et que de cette *transformation* découle une *loi d'addition des vitesses*. Aussi, avant de remettre en question le *principe de relativité*, peut-être fallait-il vérifier si ce n'était pas au niveau de la *transformation de Galilée* qu'il y avait un problème. Jusqu'à présent, cette transformation ne faisait que transcrire un déplacement (une translation) et supposait que le temps était le même pour l'objet en mouvement comme pour le référentiel immobile. Afin de modifier la transformation de Galilée, il fallait être en mesure de changer radicalement de point de vue sur les concepts de temps et d'espace. Contrairement à ce que l'on pourrait croire, ce n'est pas le temps qui a changé en premier mais bien l'espace. Et c'est bien lui qui est à l'origine du développement de la *théorie de la relativité restreinte*. Le paradoxe temporel des jumeaux de Langevin est en réalité l'arbre qui cache la forêt ou la partie émergée de l'iceberg. En utilisant la *loi d'addition des vitesses*, Michelson et Morley voulaient mettre en évidence une différence dans la mesure de la vitesse de la lumière, différence qui était d'après cette loi égale à la vitesse de notre bonne vieille Terre. Pour y parvenir, ils utilisaient un appareil appelé interféromètre que l'on peut se représenter de façon simplifiée par deux règles métalliques disposées en croix. La lecture des graduations d'une de ces règles devaient leur indiquer le ± 30 km/s qu'ils n'obtinrent jamais. En 1889, le physicien écossais Georg FitzGerald proposa une explication permettant de justifier l'échec des expériences de Michelson et Morley que l'on peut illustrer ainsi. Imaginez que vous vouliez mesurer le diamètre d'une pièce de deux euros avec une règle métallique. Vous posez cette règle sur la pièce et vous lisez 25,75 mm. Cette mesure suppose que ni la règle ni la pièce ne se contracte. Imaginez maintenant que vous fassiez la même expérience dans une chambre froide à −25 °C et que vous vouliez mesurer la taille de la pièce à cette température. Le métal de la pièce va évidemment se contracter, disons de 0,75 mm de telle sorte que la pièce ne mesure plus que 25 mm. Mais la règle métallique qui permet de mesurer cette contraction va elle aussi se contracter sous l'effet du froid. Supposons que la règle se contracte elle aussi de 0,75 mm. Il vous sera alors impossible de démontrer que la pièce s'est contractée. Cette idée géniale est connue depuis sous le nom d'« hypothèse de contraction des longueurs ».