

LE MOUVEMENT EST COMME RIEN

ROLAND LEHOUCQ

CEA Paris-Saclay, Département d'astrophysique

En 1632, Galilée publie son *Dialogue* concernant les deux plus grands systèmes du monde, dans lequel on trouve le merveilleux passage suivant :
« Enfermez-vous avec un ami dans la cabine principale à l'intérieur d'un grand bateau et prenez avec vous des mouches, des papillons, et d'autres petits animaux volants. Prenez une grande cuve d'eau avec un poisson dedans, suspendez une bouteille qui se vide goutte à goutte dans un grand récipient en dessous d'elle. Avec le bateau à l'arrêt, observez soigneusement comment les petits animaux volent à des vitesses égales vers tous les côtés de la cabine. Le poisson nage indifféremment dans toutes les directions, les gouttes tombent dans le récipient en dessous, et si vous lancez quelque chose à votre ami, vous n'avez pas besoin de le lancer plus fort dans une direction que dans une autre, les distances étant égales, et si vous sautez à pieds joints, vous franchissez des distances égales dans toutes les directions. »

Portrait de Galileo Galilei
(1564-1642)

par Justus Sustermans.

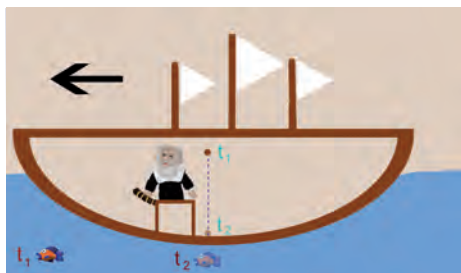
© National Maritime Museum,
Londres



UNE EXPÉRIENCE DE PENSÉE HISTORIQUE ET FONDAMENTALE

« Lorsque vous aurez observé toutes ces choses soigneusement (bien qu'il n'y ait aucun doute que lorsque le bateau est à l'arrêt, les choses doivent se passer ainsi), faites avancer le bateau à l'allure qui vous plaira, pour au-

tant que la vitesse soit uniforme et ne fluctue pas de part et d'autre. Vous ne verrez pas le moindre changement dans aucun des effets mentionnés et même aucun d'eux ne vous permettra de dire si le bateau est en mouvement ou à l'arrêt [...], les papillons et les mouches continueront à voler indifféremment dans toutes les directions. Et on ne les verra jamais s'accumuler du côté de la cloison qui fait face à la poupe; ce qui ne manquerait pas d'arriver s'ils devaient s'épuiser à suivre le navire dans sa course rapide. »



Le bateau de Galilée vogue à vitesse constante vers la gauche. Une balle lâchée par l'expérimentateur à l'instant t_1 touche le fond de cale à t_2 , rigoureusement à la verticale (pour l'expérimentateur !) du point d'où elle a été lâchée. La position du poisson, immobile dans le référentiel terrestre, est indiquée à ces deux dates.

© The Unemployed Philosophers Guild,
2018, Londres

De cette expérience de pensée, sans doute l'une des plus importantes de l'histoire de la physique, Galilée déduit que « *le mouvement est comme rien* », traduisant ainsi l'impossibilité de mettre en évidence le mouvement de translation à vitesse constante d'un mobile par une expérience réalisée à l'intérieur de celui-ci, sans observer le monde extérieur. Cette constatation fonde ce que nous nommons désormais *principe de relativité du mouvement* et se traduit par une illusion commune : assis dans un train, nous pensons démarrer en voyant le train juste voisin se déplacer par rapport à nous ! L'illusion dure le temps que l'absence de sensation d'accélération nous prouve que, en réalité, c'est bien l'autre train qui quitte la gare. Si les référentiels en translation rectiligne à vitesse constante sont équivalents entre eux, ce n'est pas le cas d'un référentiel accéléré : dans une voiture qui freine, les passagers sont propulsés vers l'avant. De même, le mouvement de rotation de la Terre est trahi par le mouvement d'un pendule ou d'un gyroscope.

DES ÉQUATIONS QUI DOIVENT RESTER INVARIANTES

L'équivalence entre référentiels en translation uniforme les uns par rapport aux autres, aussi appelés *référentiels inertiels*, peut sembler anodine à première vue. Pourtant, cette proposition a des conséquences profondes.

Puisqu'aucune expérience ne peut détecter le mouvement de translation uniforme, les équations de la mécanique doivent s'écrire de la même façon dans tous les référentiels inertiels : c'est là la traduction pratique du principe de relativité. En langage mathématique, cela implique que la façon dont s'écrivent les équations de la mécanique ne doit pas changer quand on leur applique des transformations, dites *galiléennes*, réalisant le passage d'un référentiel inertiel à un autre. Ces transformations sont les translations d'espace et de temps, les rotations d'espace indépendantes du temps, et les translations à vitesse constante. Mais la physique ne se réduit pas à la mécanique, il faut aussi composer avec la lumière...

Le principe de relativité faillit être abandonné à la fin du XIX^e siècle lorsque l'on découvrit que les équations de l'électromagnétisme écrites par James Clerk Maxwell (1831–1879) en 1868 ne sont pas invariantes par les transformations galiléennes. Les physiciens du XIX^e siècle, se représentant l'espace de la physique comme une coquille vide, imaginaient que la lumière ne pouvait s'y propager que s'il était rempli d'un milieu particulier, nommé *éther*, adapté à cette propagation. Ils considéraient aussi que les ondes lumineuses se propageaient dans l'éther à la façon du son dans l'air. Comme la vitesse d'une onde sonore mesurée par un observateur dépend de la vitesse à laquelle celui-ci se déplace dans l'air, les physiciens pensaient donc qu'il en allait de même pour la lumière.

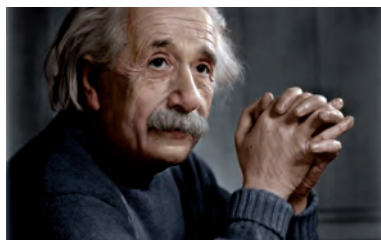
S'ils avaient eu raison, cela aurait permis de réaliser des expériences capables de mettre en évidence la translation rectiligne uniforme d'un référentiel par rapport à l'éther, supposé immobile, mettant ainsi à bas le principe de relativité galiléenne ! En 1887, les physiciens américains Albert Abraham Michelson (1852–1931) et Edward Williams Morley (1838–1923) montrèrent, grâce à une expérience restée célèbre, que la vitesse de la lumière, qui vaut à peu près trois cent mille kilomètres par seconde, prend la même valeur quelle que soit la direction selon laquelle elle est mesurée à la surface de la Terre, en mouvement autour du Soleil. Ce résultat étonnant invalida la théorie de l'éther et imposa l'idée que la lumière pouvait se propager dans le vide, sans support matériel. Il plongea aussi la communauté scientifique dans la perplexité...

ALBERT EINSTEIN POSE DEUX POSTULATS RÉVOLUTIONNAIRES

En 1905, Albert Einstein publie un article fondé sur deux postulats révolutionnaires. Le premier est une extension à l'électromagnétisme du principe de relativité, introduit par Galilée en mécanique : « *Dans tous les systèmes de coordonnées où les équations de la mécanique sont valables, ce sont également les mêmes lois de l'optique et de l'électrodynamique qui sont valables.* » Cela signifie que le déroulement d'une expérience de physique ne peut pas en elle-même dévoiler le mouvement d'un système en translation à vitesse constante par rapport à un autre.

Le second postulat, « *qui n'est qu'apparemment incompatible avec le précédent* », stipule que « *la lumière se propage dans l'espace vide avec une vitesse c bien déterminée, indépendante de l'état de mouvement du corps émetteur* ». L'incompatibilité qu'évoque Einstein est que cette invariance viole *a priori* la loi de composition classique des vitesses, selon laquelle il faut additionner la vitesse de la source à la vitesse de la lumière relativement à celle-ci pour déterminer la vitesse de la lumière par rapport à un observateur au repos (c'était le présupposé que l'expérience de Michelson et Morley mit en défaut). Or, la loi de composition des vitesses est intimement liée à la façon dont on conçoit l'espace et le temps.

Einstein se pose la question de savoir ce que veut dire qu'un évènement a eu lieu à tel moment, à tel endroit. Comme Galilée, il utilise une expérience de pensée et imagine que des horloges identiques, fixes les unes par rapport aux autres, se trouvent en tout point de l'espace : repérer un évènement dans le temps, c'est par exemple dire que « *le passage de la petite aiguille de mon horloge sur le 7 et l'arrivée du train sont des évènements simultanés* » à l'endroit où l'on se trouve.



Albert Einstein (1879–1955).
© Arthur Sasse, 1951

Pour que cette définition ait un sens, il faut que les horloges aient préalablement été synchronisées, c'est-à-dire possèdent une origine des temps commune. Pour cela, Einstein propose que les horloges communiquent entre elles avec des signaux lumineux. Imaginons par exemple que l'horloge A émette à 12 h un signal vers l'horloge B. Dès réception, l'horloge B renvoie un signal vers A

en lui indiquant son heure. Si A le reçoit à 14 h, elle en déduit que B se trouve à une heure-lumière d'elle. Elle attribuera à l'évènement «réception en B» une étiquette temporelle égale à la moyenne de ses instants d'émission et de réception. Si B indique que son heure de réception est 13 h 10, A jugera qu'elle est en retard de dix minutes par simple comparaison avec sa propre estimation.

Cette procédure a conservé toute son actualité car c'est sur elle que se fondent les systèmes de positionnement par satellites. Einstein affirme alors que *«le temps d'un évènement est l'indication, simultanée à cet évènement, d'une horloge au repos, située à l'endroit de l'évènement et qui, pour toutes les déterminations de temps, bat de façon synchrone avec une horloge au repos donnée»*. Avec cette définition, dire que deux évènements sont simultanés signifie que les instants de leurs avènements coïncident. Einstein se demande alors comment sont vus ces évènements à partir d'un autre ensemble d'horloges se déplaçant à vitesse constante par rapport au premier...



L'expérience de pensée proposée
par Einstein est vertigineuse.
© Wolfwomanways.

UNE CORRECTION SURPRENANTE DE LA FORMULE CLASSIQUE

Einstein démontre préalablement que l'invariance de la vitesse de la lumière fait perdre *«le droit d'attribuer une signification absolue au concept de simultanéité, et que deux évènements qui, du point de vue d'un système de coordonnées, sont simultanés, ne peuvent plus être considérés comme des évènements simultanés lorsqu'ils sont vus d'un autre système de coordonnées en mouvement relativement au premier»*. Ce résultat est suivi d'un paragraphe plus technique où Einstein trouve l'expression des transformations qui permettent de passer d'un référentiel inertiel à un autre et dont les transformations de Galilée sont un cas limite.

Einstein déduit deux conséquences spectaculaires de ces lois. La première est que *«si deux horloges synchrones se trouvent en A et que l'on déplace l'une d'entre elles à vitesse constante le long d'une courbe fermée*

jusqu'à ce qu'elle soit revenue en A [...], cette horloge, à son arrivée en A, retarde [...] sur l'horloge qui n'a pas bougé ». C'est ce que l'on appelle la *dilatation des durées*. Si l'effet est imperceptible aux vitesses habituelles, très faibles par rapport à celle de la lumière, cette étonnante prédiction a néanmoins été amplement vérifiée en utilisant des particules élémentaires qui se déplacent à des vitesses proches de celle de la lumière, notée c .

La deuxième conséquence concerne la composition des vitesses. Dans la conception classique, galiléenne, la composition de vitesses parallèles se fait par sommation, algébriquement. Einstein démontre que si un corps se meut à la vitesse u par rapport à un premier référentiel et que ce référentiel se déplace lui-même à la vitesse uniforme v par rapport à un second, alors la vitesse du corps par rapport à ce dernier référentiel est égale à $(u+v)/(1+uv/c^2)$.

On voit donc apparaître une correction à la formule classique $(u+v)$ sous la forme d'un dénominateur, qui devient d'autant plus important que la vitesse u (ou v) est proche de celle de la lumière. En particulier, si la vitesse u est égale à c , alors la composition donne toujours c : la vitesse de la lumière est bien invariante par changement de référentiel, confirmant la compatibilité des postulats d'Einstein.

L'AUDACE D'UN ESPACE-TEMPS À QUATRE DIMENSIONS

Les physiciens des particules élémentaires ont donné une brillante confirmation expérimentale de l'invariance de la vitesse de la lumière en étudiant la désintégration du pion neutre (une particule de la famille des mésons) en deux photons de haute énergie. Dans les accélérateurs, on obtient des pions qui se meuvent à des vitesses proches de c . On s'attendrait à ce qu'un photon émis vers l'avant après une désintégration ait la vitesse $2c$. Il n'en est rien : en mesurant le temps de vol de ces photons entre deux compteurs, on a bien démontré que leur vitesse restait égale à c .

L'expérience de pensée pionnière de Galilée retravaillée par Einstein modifia si spectaculairement nos conceptions de l'espace et du temps que le mathématicien et physicien allemand Hermann Minkowski (1864–1909) proposa en 1908 de fusionner l'espace à trois dimensions et le temps unidimensionnel pour former une nouvelle entité physique : bienvenu dans l'espace-temps à quatre dimensions !

R.L.