

ARTICLE DE FOND

La nature énigmatique du temps et les progrès dans la précision de sa mesure

Christian Larcher, Paris

Comment le temps est à la fois une grandeur dont la nature profonde est indéfinissable et cependant celle qui se mesure avec une précision bien supérieure à toutes les autres unités fondamentales.

Le temps c'est quoi ?

Qu'il a-t-il de plus commun que la notion de temps ? Lorsque l'on parle du temps tout le monde comprend facilement de quoi il s'agit, mais de manière étonnante, malgré de très nombreuses tentatives, le concept reste indéfinissable. On parle du temps comme on parle d'une substance quelconque. Mais le temps, qui l'a vu ? Qui l'a senti, entendu ou touché ? Aucun organe ne permet de le percevoir et de surcroît il apparaît le plus souvent comme ce qui manque ou quelque chose qui presque toujours est en train de disparaître. Par ailleurs, comme le remarque Etienne Klein, le temps désigne mille choses différentes ; il est doué d'une « polysémie fulgurante » puisqu'il peut selon les cas désigner : la succession, la simultanéité, la durée, le changement, le devenir, l'urgence, l'attente, l'usure, la vitesse, le vieillissement, les révolutions géologiques et même l'argent ou la mort. Tout le monde parle du temps qui passe de plus en plus vite ! Mais le temps a bon dos ; on préfère considérer qu'il passe, comme on dit dans un train que le paysage défile par la fenêtre, alors que c'est nous qui passons et non le paysage. Le temps ne passe pas, il est éternellement là, à faire passer la réalité. Jacques Prévert le dit admirablement : « *Le temps dont on dit qu'il passe, alors qu'il s'assoit et reste là à vous regarder passer* ».

On se demande si le temps est en dehors de nous ou en nous. Est-ce que nous possédons le temps ou est-ce lui qui nous possède ?

Quelques essais de définition

Pour Pascal, le mot temps est un mot primitif donc indéfinissable. Il est déjà là de toute éternité...

« *Le temps... Qui pourra le définir ? Et pourquoi l'entreprendre, puisque tous les hommes conçoivent ce qu'on veut dire en parlant de temps, sans qu'on le désigne davantage* ».

Pour Kant, c'est un produit de la conscience ; il n'a pas d'existence « *en dehors de l'esprit, il fait partie de la structure de l'esprit* ».

Pour Luis Borges : « *Le temps est la substance dont je suis fait. Le temps est un fleuve qui m'entraîne, mais je suis le temps ; c'est un tigre qui me déchire mais je*

suis le tigre ; c'est un feu qui me dévore mais je suis le feu.

Allons voir dans le dictionnaire les diverses définitions :

Petit Robert : « *milieu indéfini où paraissent se dérouler irréversiblement les existences dans leur changement, les événements et les phénomènes dans leur succession* ». Cette définition choisit de considérer le temps comme un cadre dans lequel tous les événements se déroulent.

Hachette : « *celle des dimensions de l'Univers selon laquelle semble s'ordonner la succession irréversible des phénomènes* ».

Comment mesure-t-on le temps ?

Mesurer une grandeur physique, c'est la comparer à une autre grandeur de même espèce choisie conventionnellement pour unité. Supposons que nous voulions mesurer une longueur avec un mètre gradué en centimètres. On fait coïncider le zéro de la règle avec une extrémité de la longueur à mesurer puis l'on cherche à quelle graduation correspond son extrémité. Si la règle est graduée en centimètres, il est probable que l'on trouvera une valeur comprise entre deux graduations et la mesure sera peu précise. Si le nombre de subdivisions augmente on peut obtenir une meilleure précision, mais il arrive un moment où la mesure devient impossible car les divisions ne sont plus lisibles.

Mesurer le temps ?

En réalité on ne mesure pas « le temps » mais seulement des durées, c'est-à-dire des intervalles de temps. Concrètement on choisit un phénomène linéaire dont l'un des paramètres varie proportionnellement au temps « qui s'écoule ». Initialement on utilisait des clepsydres, des sabliers, des bougies ou des lampes à huile. Pour des temps longs on mesure l'angle de rotation de la Terre repéré à l'aide du mouvement apparent des étoiles. Pour « garder le temps » on utilise depuis 1657 et grâce aux travaux de Huygens (1629 – 1695) des horloges mécaniques utilisant un pendule simple. Plus tard apparurent les

horloges à quartz et maintenant des horloges atomiques, extrêmement précises.

Mais il importe de remarquer que le temps n'est pas dans l'horloge, « le temps loge hors de l'horloge ». Une horloge ne fabrique pas de temps, elle ne fait que reproduire un mouvement régulier qu'il s'agit ensuite de comptabiliser. En définitive l'horloge se comporte comme l'association d'un métronome et d'un compteur. La mesure des durées précises de temps nécessite l'utilisation d'un phénomène répétitif très régulier et parfaitement reproductible. La mesure sera d'autant plus précise que la période du phénomène répétitif (la base de temps) sera plus petite ou, ce qui revient au même, que sa fréquence sera plus grande. Plus on compte un nombre élevé de graduations temporelles meilleure sera la précision.

L'apport historique de Galilée (1564 - 1642)

Nous devons à Galilée l'introduction du temps comme paramètre essentiel de la physique. C'est aussi Galilée qui comprit la nécessité de distinguer le concept de temps **des phénomènes qui se produisent dans le temps**. Le père de Galilée voulait que son fils entreprenne des études de médecine. Se conformant aux vœux de son père, il commença de telles études. Mais ce n'est pas la médecine qui l'intéressait vraiment et il abandonna au bout de quelques années sans obtenir de diplôme.

Mais peut-être ces études furent-elles à l'origine de l'idée de fabriquer, dès 1586, un pulsomètre. Il s'agit d'un appareil de mesure du pouls d'un malade à partir du nombre de battements d'un pendule de longueur fixe. À l'époque on déterminait le pouls des malades en utilisant un pendule de longueur variable (masse coulissante). La longueur du fil était choisie de façon que la fréquence de battement du pendule soit la même que la fréquence cardiaque. Par exemple, un homme dont le battement cardiaque est de soixante pulsations par minute (soit 1 battement par seconde) est équivalent à un pendule dont la longueur correspond à environ un mètre actuel (chaque période est constituée de 2 battements, un aller et un retour, la période de ce pendule est donc $T_1 = 2$ secondes). Si le rythme des battements cardiaques vaut le double (2 battements par seconde soit 120 battements par minute, soit ($T_2 = 1$ s) il faudrait utiliser un pendule quatre fois plus court soit 0,25 m. En effet d'après la loi sur les pendules simples établie plus tard en 1632 par Galilée, la période d'un pendule est donnée par la relation : $T = 2\pi\sqrt{l/g}$, l étant la longueur du pendule et g l'accélération de la pesanteur.

Pour deux pendules simples de longueurs l_1 et l_2 on aura donc $T_1/T_2 = \sqrt{l_1/l_2}$ ce qui, avec $T_1 = 2$ s et $T_2 = 1$ s pour $l_1 = 1$ m, donne $l_2 = 1/4$ m.

La légende raconte que le jeune Galilée, qui s'ennuyait durant les offices dans la cathédrale de Pise, aurait observé que les lampadaires qui oscillaient dans l'air avec des amplitudes différentes avaient cependant des périodes égales (les chaînes de suspension avaient la même longueur). Pour effectuer ces mesures, il utilisait ses propres battements cardiaques (in dialogue 1632).

Mais finalement que mesure-t-on si le battement du cœur se mesure à l'aide d'un pendule et les oscillations des « lustres- pendules » à l'aide d'un battement cardiaque ? Où est le temps dans tout cela ? On est dans le cas du serpent qui se mord la queue, dans un cercle vicieux déjà perçu par Aristote qui **écrivait** : « *Nous ne mesurons pas seulement le mouvement par le temps mais aussi le temps par le mouvement* » Aristote (Physique livre IV ; *De l'espace, du vide et du temps* Ch. XVIII).

Les horloges atomiques

La précision des horloges atomiques provient essentiellement de l'utilisation des « atomes froids ». Un atome froid est un atome que l'on a presque totalement immobilisé en abaissant sa température très près du zéro absolu (10^{-6} degré au-dessus du zéro absolu). Les atomes à la température ordinaire ont des vitesses de l'ordre de plusieurs centaines de mètres par seconde. Actuellement c'est l'atome de césium qui sert de référence à la définition de la durée d'une seconde. Une onde électromagnétique appropriée permet de faire passer l'atome de césium de son niveau d'énergie le plus bas à un niveau d'énergie immédiatement supérieur. Pour provoquer ce saut énergétique, il est nécessaire d'utiliser une onde de fréquence, extrêmement précise, dont la valeur est très grande, de l'ordre de 10 milliards d'hertz.

C'est le mouvement des atomes qui limite la précision. Cette limitation résulte de plusieurs facteurs mais le plus simple à comprendre concerne l'effet Doppler. L'effet Doppler a de nombreuses applications par exemple en médecine il permet de mesurer la vitesse du sang dans les veines ou les artères ; sur le réseau routier il est à la base de la détermination de la vitesse des automobiles. En astronomie, c'est par le même effet que l'on peut déceler la présence d'une exoplanète orbitant autour son étoile hôte. L'effet Doppler joue un rôle essentiel car lorsque l'atome de césium est en mouvement, il n'absorbe pas ou n'émet pas d'ondes électromagnétiques **exactement à la même fréquence** que s'il était au repos. Lorsque les atomes sont quasiment immobiles il n'y a plus d'effet Doppler et la précision devient très grande. Or cette précision est indispensable dans les techniques modernes (GPS, télécommunications etc.).

La très grande précision des horloges atomiques résulte du fait qu'à des températures très proches du zéro absolu on ne peut plus considérer les atomes comme des petits grains de matière mais comme des

ondes. Il s'agit des ondes associées à chaque particule par la relation de Louis de Broglie : $\lambda = h/mv$. Ces ondes ne sont pas habituellement utilisables car les longueurs d'onde concernées sont trop grandes par rapport à la distance entre les atomes mais avec les atomes froids la vitesse des atomes étant très faible, les ondes de de Broglie associées sont dans le domaine micro-onde. Avec ces micro-ondes on peut réaliser des mesures interférométriques très précises. En définitive, les horloges atomiques sont de fait des « interféromètres atomiques » ce qui permet d'atteindre des précisions très élevées. Depuis ces 50 dernières années, la précision des horloges a augmenté d'un facteur 10 tous les 10 à 12 ans. Dans l'avenir, on devrait pouvoir construire des horloges à fréquences optiques (10^{15} hertz). La précision augmente également avec la durée des mesures. Plus cette durée est importante plus la précision est élevée. Dans le projet PHARAO (Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbite) il est prévu

d'envoyer une horloge atomique à césium dans l'espace en l'arrimant à la station spatiale ISS. En microgravité les atomes, déjà ralentis par l'action de lasers, gardent plus longtemps leur vitesse initiale ce qui permet d'augmenter la qualité des mesures et donc d'améliorer encore les performances de l'horloge.

Actuellement on cherche à utiliser d'autres atomes que le césium. Le 22 août 2013, les Américains ont annoncé avoir construit une horloge expérimentale à ytterbium augmentant ainsi d'un nouveau facteur 100 la précision. Avec cette horloge la précision est de l'ordre de 10^{-18} ; cette valeur en soi n'est pas très « parlante » mais si l'on remarque que 10^{18} secondes correspondent approximativement à l'âge de l'Univers, cela signifierait qu'une telle horloge, mise en fonctionnement à l'époque supposée du big-bang, accuserait un décalage de nos jours de l'ordre de la seconde. Un résultat qui nous laisse pour le moins rêveur...

Webographie

Pharao (CNES + LKB et SYRTE) : <http://smc.cnes.fr/PHARAO/Fr/>

<http://www.cnes.fr/web/CNES-fr/6115-communications-de-presse.php?item=8859>

Une horloge 100 fois plus précise que l'horloge au césium :

<http://www.enerzine.com/2/16146+une-horloge-atomique-100-fois-plus-precise-que-celle-au-cesium+.html>

L'horloge la plus précise du monde :

http://www.lemonde.fr/sciences/article/2013/08/23/l-horloge-la-plus-precise-au-monde-devoilee_3465319_1650684.html ■