

Pacôme Delva, Sébastien Bize

La réalisation des références spatio-temporelles

« Le temps est une invention du mouvement. Celui qui ne bouge pas ne voit pas le temps passer ».

Amélie Nothomb

« Le fil du temps est couvert de nœuds. Et la facile continuité des trajectoires a été ruinée complètement par la microphysique, le réel ne cesse de trembler autour de nos repères abstraits. Ce temps à petits quantas scintille ».

Gaston Bachelard

Introduction

Dans le cadre de la physique et pour la physique, nous cherchons à obtenir une représentation et une réalisation du temps aussi objectives que possible. Le principe élémentaire pour cela est l'identification, l'observation et la modélisation de phénomènes naturels qui semblent très périodiques, c'est-à-dire qui semblent se répéter de manière très régulière. L'observation continue d'un tel phénomène permet d'identifier une suite d'événements par rapport auxquels nous pouvons repérer ou dater d'autres observations. Par exemple, dans le cas d'un pendule, il est possible d'observer les passages successifs du pendule à la position verticale avec une vitesse positive et de situer un événement par rapport aux nombres de battements effectués par le pendule au moment où cet événement a lieu.

Il existe dans le cadre de la physique au moins quatre conceptions majeures du temps qui sont liées à différentes théories. D'abord le temps comme mouvement. Selon Aristote, le temps est le nombre du mouvement selon l'avant et l'après. On peut ainsi mesurer une durée, l'intervalle de temps entre deux événements, grâce au mouvement de l'eau ou du sable dans une clepsydre ou un sablier. Fabriquer une échelle de temps nécessite cependant de pouvoir reproduire à l'identique la même durée grâce à l'identification d'un phénomène périodique. Pendant très longtemps, le phénomène de référence a été la rotation de la Terre sur elle-même observée de manière de plus en plus raffinée, par rapport au Soleil puis par rapport à des étoiles lointaines. Dans le cas de la rotation de la Terre observée par rapport

au Soleil, les événements observés sont par exemple les passages du Soleil au méridien, que l'on peut repérer grâce à un cadran solaire. Les astronomes observent aujourd'hui la rotation de la Terre par rapport à des galaxies très lointaines appelées quasars, dont le mouvement propre apparent est presque nul, grâce à un ensemble de radiotélescopes répartis sur Terre.

La deuxième conception du temps est arrivée avec la mathématisation de la physique : le temps comme paramètre d'évolution d'une équation dynamique. Le mouvement est alors décrit par des équations dynamiques dans lesquelles apparaissent des variables dynamiques. Dans le cas du pendule, l'angle du mobile par rapport à la verticale est une fonction du temps. Le temps apparaît comme un paramètre d'évolution de l'équation. Dans le cas d'un phénomène périodique apparaît alors dans les équations un temps caractéristique, appelé la période, au bout duquel le phénomène se reproduit à l'identique. En comptant le nombre de périodes de manière ininterrompue nous avons créé une horloge. Une horloge est d'autant plus exacte que le modèle physico-mathématique décrit bien les mesures, et d'autant plus stable que chaque période se reproduit bien à l'identique.

Au ^{xx}^{ème} siècle, la physique est bouleversée par deux grandes théories : la physique quantique et la relativité générale, qui ont accompagné l'établissement des références spatio-temporelles modernes, objets de cet article. Ainsi, la troisième grande conception du temps de la physique est le temps comme quantum d'énergie. En effet, la physique quantique introduit une nouvelle constante fondamentale : la constante de Planck. Celle-ci relie une différence d'énergie à une fréquence, qui est l'inverse d'un temps. Or, les niveaux d'énergie d'un atome sont quantifiés : à chaque différence de niveau, ou transition, correspond un temps caractéristique (voir Section 1).

Cette révolution de la physique quantique signe l'avènement du temps atomique, qui commence en 1955 avec l'étalon de fréquence au césium construit par Essen et Parry au National Physical Laboratory (NPL)¹. Depuis lors, l'exactitude et la stabilité des horloges atomiques n'ont cessé de s'améliorer, avec un gain d'environ un ordre de grandeur tous les dix ans (voir Figure 1). Dans la décennie 1930, les progrès des observations de la rotation de Terre ainsi que l'apparition des premières horloges à quartz ont permis à Nicolas Stoyko et d'autres collègues astronomes de révéler les irrégularités du mouvement de la Terre, et en particulier des variations non prédictibles de la durée du jour de l'ordre de la milliseconde², ce qui a conduit à baser la définition de l'unité de temps sur une transition atomique. Dans ce contexte, l'unité de temps du Système international d'unités (SI), la seconde, a été officiellement définie par rapport à une transition hyperfine spécifique de l'atome de césium en 1967-1968³.

¹ Voir Ramsey, F.R., « History of Early Atomic Clocks », *Metrologia*, Vol. 42, n°3, 2005 ; Leschiutta, S., « The Definition of the 'Atomic' Second », *Metrologia*, Vol. 42, n°3, 2005.

² Stoyko, A., Stoyko, N., « Les fluctuations périodiques de la rotation de la terre pendant les années 1933-1940. Conclusions pour la période 1933-1954 », *Bulletins de l'Académie Royale de Belgique*, Vol. 42, 1956, pp. 693-702.

³ Résolution 1 de la 13^{ème} Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM). Voir à ce propos Terrien, J., « News from the International Bureau of Weights and Measures », *Metrologia*, Vol. 3, n°1, 1967.

De plus, alors que des échelles de temps atomiques locales étaient développées grâce à des horloges à césium commerciales⁴ ainsi qu'à des étalons à césium de laboratoire, il était nécessaire de comparer ces différentes échelles de temps afin de construire un temps atomique international moyen, qui pourrait être adopté par tout le monde. C'est ce qu'ont fait au début l'Observatoire naval des États-Unis (USNO) et le Bureau international de l'heure (BIH) avec des signaux horaires radio⁵, qui ont permis des comparaisons de temps avec des incertitudes⁶ de l'ordre de 1 ms. La première démonstration par la société Hewlett-Packard de la possibilité d'utiliser des vols commerciaux pour transporter ses horloges à césium a permis d'améliorer la précision, avec une incertitude d'environ 1 μ s. Aujourd'hui, les meilleures méthodes de transfert de temps par satellites atteignent des instabilités de l'ordre de 100 ps au-delà d'un jour⁷, alors que les méthodes de transfert de temps optique au sol atteignent des instabilités inférieures à la femtoseconde⁸.

De plus, maintenant que les incertitudes des meilleures horloges atomiques atteignent 10^{-18} en fréquence relative (voir Figure 1), et qu'elles peuvent être comparées à ce niveau sur des distances continentales avec des fibres optiques, les modèles et les théories physiques utilisés pour les décrire doivent inclure tous les effets physiques avec au moins le même niveau d'incertitude. Nous verrons dans la Section 1 les principes physiques de fonctionnement des références atomiques de fréquence utilisées pour fabriquer les échelles de temps locales.

Cependant, nous verrons dans les Sections 2 à 5 que la notion de temps classique se trouve bouleversée par la théorie de la relativité, ce qui nous mène à la quatrième grande conception du temps de la physique : le temps comme convention géométrique. La solution de l'équation d'Einstein est la métrique de l'espace-temps à quatre dimensions. La métrique est un concept très général qui permet aux géomètres de mesurer une distance dans l'espace, ou bien aux géographes de mesurer une distance sur la surface courbe de la Terre. Elle définit les "distances" dans l'espace-temps à quatre dimensions. Le temps, une des quatre coordonnées de l'espace-temps, est défini implicitement par la donnée de la métrique. Le temps devient alors une façon conventionnelle, non physique, de découper l'espace-temps en tranches. Il y a une infinité de possibilité de le faire, car on peut représenter exactement la même géométrie de l'espace-temps mais avec une infinité de sys-

⁴ Cutler, L.S., « Fifty Years of Commercial Caesium Clocks », *Metrologia*, Vol. 42, n°3, 2005.

⁵ Pour une histoire des horloges atomiques voir Guinot, B., Arias, E.F., « Atomic Time-Keeping from 1955 to the Present », *Metrologia*, Vol. 42, n°3, 2005.

⁶ L'incertitude est une notion clé de la métrologie, et son expression fait l'objet d'un guide de 132 pages édité par le JCGM (Joint Committee for Guides in Metrology). En bref, l'incertitude quantifie le doute sur la validité du résultat de la mesure d'une grandeur physique. Voir Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM) (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML), *Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, 2008.

⁷ Parker, T.E., et al., « A Three-Cornered Hat Analysis of Instabilities in Two-Way and GPS Carrier Phase Time Transfer Systems », *Metrologia*, Vol. 59, n°3, 2022.

⁸ Caldwell, E.D., et al., « Quantum-Limited Optical Time Transfer for Future Geosynchronous Links », *Nature*, n°618, 2023, pp. 721-726.

tèmes de coordonnées. Le temps est alors un temps mathématique qui doit être calculé à partir des observations.

Aujourd'hui, le temps que nous avons sur nos montres et nos téléphones est une combinaison du temps comme quantum d'énergie et comme convention géométrique. Nous décrirons dans la Section 5 les principales échelles de temps et références spatio-temporelles utilisées et définies dans les conventions internationales. Pour finir, dans la Section 6, nous décrirons la métrologie comme démarche heuristique au travers de deux exemples : l'expérience historique du pendule des astronomes et son pendant moderne avec des horloges atomiques.

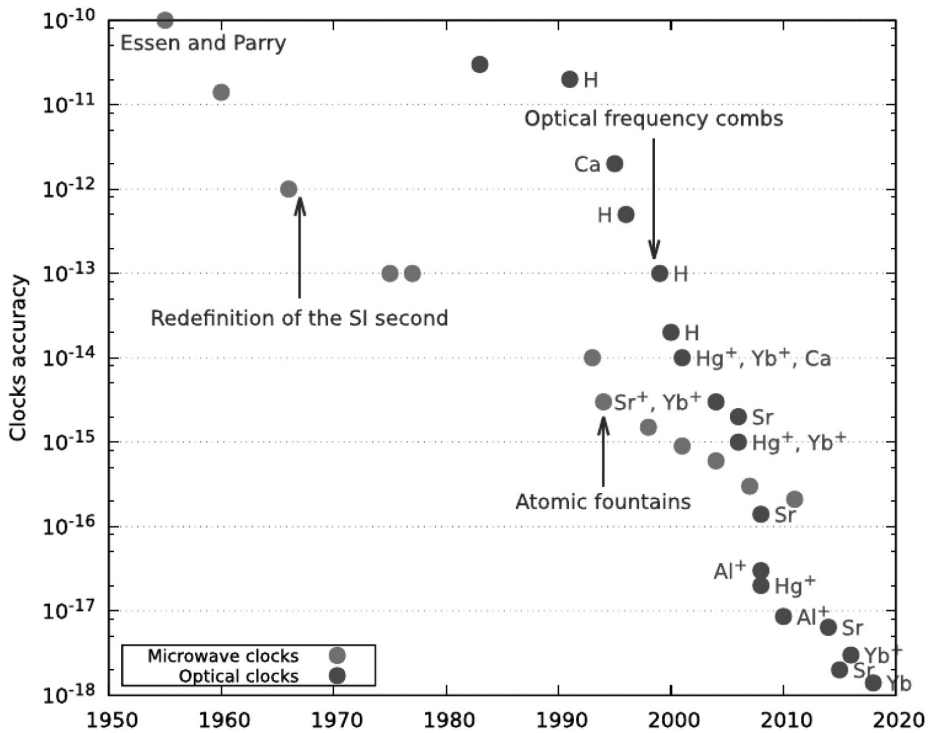


Figure 1 : Exactitudes des horloges à micro-ondes et des horloges optiques. Depuis la première horloge à césium d'Essen et Parry dans les années 1950, un ordre de grandeur a été gagné tous les dix ans. L'avènement des peignes de fréquence optiques a largement amélioré les performances des horloges optiques, qui ont récemment dépassé les horloges à micro-ondes.

L'objet de cet article, la construction et la matérialisation des références spatio-temporelles, s'inscrit très bien dans une vision bachelardienne dans laquelle le phénomène physique n'est jamais simplement reçu ou observé, mais construit rationnellement au

travers du langage mathématique. Nous verrons que cela est vrai aussi bien pour la physique quantique, au travers de l'algèbre linéaire, que pour la relativité générale, au travers du calcul tensoriel. D'après Dennet, la position du philosophe raisonnable peut être « d'étudier, dans son fauteuil, les meilleurs fruits du laboratoire, les meilleurs apports de théoriciens ancrés dans la réalité et de procéder alors avec sa philosophie propre en essayant d'éclairer les obstacles conceptuels et même d'aboutir dans un certain domaine, de temps en temps, cela ayant l'intérêt d'éclaircir d'une manière ou d'une autre les implications de quelque idée théorique particulière »⁹. Cette position nous paraît bien décrire celle de Bachelard, que nous citerons afin d'éclairer d'un jour nouveau les notions et concepts abordés dans cet article.

Nous devons prévenir que nous sommes physiciens de formation et non philosophes ; mais « les scientifiques passent aussi un peu de temps dans leur fauteuil, en essayant d'éclaircir la manière d'interpréter les expériences de chacun et ce qu'ils font en ces moments-là se mêle imperceptiblement à ce que font les philosophes. Affaire risquée mais stimulante »¹⁰. Nous prenons le risque...

1 – Les références atomiques de fréquence

Les atomes ont des niveaux d'énergie discrets qui sont très bien décrits dans le cadre théorique du modèle standard de la physique des particules fondé sur la mécanique quantique. Dans ce cadre, à chaque différence d'énergie ($E_e - E_f$) entre deux niveaux atomiques e et f correspond une fréquence ν_{ef} via la relation de Planck $E_e - E_f = h \nu_{ef}$, où h est la constante de Planck. Cette fréquence est la fréquence d'oscillation de certaines observables atomiques lorsque l'atome se trouve dans une superposition quantique des deux états e et f . C'est également la fréquence nominale qu'une onde électromagnétique doit avoir pour induire une transition de l'atome de l'état f à l'état e .

Les étalons atomiques de fréquence sont des systèmes expérimentaux permettant d'accéder à la fréquence caractéristique ν_{ef} d'une transition atomique choisie. Dans la configuration la plus fréquente d'un tel dispositif, on utilise une source de champ électromagnétique que l'on fait interagir avec les atomes de manière à induire la transition de f vers e et on mesure, de manière répétitive, la fraction d'atomes qui ont effectué la transition, passant de f à e . Grâce à ce processus d'interrogation, nous pouvons accorder la fréquence de la source de manière à rendre et à maintenir maximale cette efficacité de transition et ainsi faire coïncider la fréquence de la source avec celle de l'atome ν_{ef} . Ceci fait, nous disposons d'un signal électromagnétique macroscopique, c'est-à-dire suffisamment puissant pour être utilisé, et qui reproduit la fréquence atomique et donc, dans une certaine mesure, sa propriété d'être parfaitement stable et universelle.

⁹ Dennett, D., « Consciousness Explained », London, Penguin Books, 1991, cité et traduit par Chazal, G., « Bachelard et la relativité », *Cahiers Gaston Bachelard*, Vol. 12, n°1, 2012, pp. 37-48, p. 47.

¹⁰ *Ibidem*, p. 48.

Ce système expérimental illustre bien comment la mathématique, et en particulier l'algèbre linéaire au travers de la théorie de la mécanique quantique, devient une méthode plutôt qu'un langage, et provoque les conditions instrumentales qui permettent la systématisation de l'essence du réel¹¹. La phénoménologie, ou phénoménographie, encore possible lorsque l'on observait les passages successifs du Soleil au méridien, devient phénoménotechnique : « la physique mathématique correspond alors à une nouménologie très différente de la phénoménographie dans laquelle l'empirisme scientifique prétend se cantonner. Cette nouménologie explique une phénoménotechnique par laquelle les phénomènes nouveaux sont, non pas simplement trouvés, mais inventés, construits de fond en comble »¹².

Ainsi, le réductionnisme méthodologique de la science fait dépendre la connaissance et la construction du temps physique de la réalisation d'un étalon atomique de fréquence dans un système expérimental complexe. Bachelard déclare que les « instruments ne sont que des théories matérialisées »¹³. Une horloge atomique peut être vue comme une matérialisation de la mécanique quantique, produisant ainsi le temps comme quantum d'énergie, qui devient une « réalité construite ».

Un aspect important de la recherche sur les étalons atomiques de fréquence vise à comprendre et à maîtriser les phénomènes physiques qui perturbent le processus d'interrogation, ayant pour effet que le signal fourni par un étalon atomique ne coïncide pas parfaitement avec la fréquence ν_{ef} . Les perturbations sont diverses et nombreuses, certaines de nature fondamentale et universelle, d'autres de nature spécifique à la configuration de l'horloge, d'autres encore de nature plus technique. On retrouve ici l'idée de Bachelard que la phénoménotechnique « doit reconstituer de toutes pièces ses phénomènes sur le plan retrouvé par l'esprit en écartant les parasites, les perturbations, les mélanges, les impuretés qui foisonnent dans les phénomènes bruts et désordonnés »¹⁴. Ainsi : « comme l'esprit ne tire plus l'abstrait du concret, comme l'esprit est, au contraire, habilité à former directement l'abstrait, il est tout naturellement amené à proposer cet abstrait rationnel à l'expérience, bref, à produire l'expérience sur des thèmes abstraits nouveaux »¹⁵. Ce thème nouveau est ici l'algèbre linéaire appliqué à la quantification des niveaux d'énergie des atomes, abstraction qui a permis la rationalisation du temps quantique.

En quelque sorte, la métrologie est la science qui a poussé le plus loin la formalisation d'une phénoménotechnique. Le Comité mixte pour les guides de métrologie (JCGM) explicite la relation entre la valeur « vraie » et la valeur corrigée :

¹¹ Castelão Lawless, T., « La création et le développement de la phénoménotechnique dans l'œuvre de Gaston Bachelard », *Cahiers Gaston Bachelard*, Vol. 1, n°1, 1998, pp. 49-57.

¹² Bachelard, G., « Noumène et microphysique », *Recherches philosophiques*, n. 1, 1931, pp. 55-65, in Id., *Études*, Paris, Vrin, 1970, pp. 11-24.

¹³ Bachelard, G., *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, Félix Alcan, 1934.

¹⁴ Bachelard, G., *L'expérience de l'espace dans la physique contemporaine*, Paris, Félix Alcan, 1937.

¹⁵ *Ibidem*.

Le résultat du mesurage de la grandeur réalisée est corrigé de la différence entre cette grandeur et le mesurande, pour ramener le résultat de mesure à ce qu'il aurait été si la grandeur réalisée avait en fait satisfait complètement à la définition du mesurande. Le résultat du mesurage de la grandeur réalisée est aussi corrigé de tous les autres effets systématiques reconnus comme significatifs. Bien que le résultat final corrigé soit parfois considéré comme la meilleure estimation de la valeur "vraie" du mesurande, le résultat est en réalité simplement la meilleure estimation de la valeur de la grandeur que l'on veut mesurer.¹⁶

Le mesurande en métrologie doit être spécifié par la description d'une grandeur spécifique, et l'objectif du mesurage consiste à en déterminer la valeur. Un mesurage commence par une définition appropriée du mesurande, de la méthode de mesure et de la procédure de mesure. Cependant, le mesurande, et a fortiori le mesurage, ne pourraient être complètement décrits qu'avec une quantité infinie d'information. Ainsi, les lacunes de la définition du mesurande introduisent une composante d'incertitude du résultat d'un mesurage qui se répercute sur l'estimation de la grandeur en question. Une valeur est "vraie" dans les limites de la définition imparfaite du mesurande. La matérialisation de la théorie dépend ainsi de la définition théorique de la grandeur que l'on veut réaliser, et des descriptions plus ou moins complètes des méthodes et procédures de mesures. Pour l'exprimer comme Bachelard, les techniques, les mesures et les calculs se coordonnent pour donner un véritable rationalisme du temps quantique¹⁷. Le travail du métrologue est de s'assurer qu'entre lui et la grandeur qu'il mesure, tout est correctement rectifié, ce qui est généralement résumé dans le bilan d'incertitude du système expérimental.

Parmi les phénomènes universels qui perturbent le système expérimental de l'horloge atomique, il y a l'effet du rayonnement thermique, nominalement décrit par la loi de Planck, auquel les atomes sont inévitablement exposés. Il y a aussi le bruit quantique qui intervient lorsque l'état atomique est détecté. Les effets du mouvement des atomes sont aussi universellement présents. Mais nous pouvons signaler que leur manifestation et leur prégnance dépendent fortement de la configuration de l'interrogation, en particulier de l'utilisation ou non d'atomes piégés. Les interactions entre les atomes de l'échantillon et les gaz résiduels environnants produisent elles aussi des perturbations de l'interrogation. Lorsque l'échantillon atomique n'est pas réduit à un seul atome, les interactions entre atomes interviennent aussi. Parmi les phénomènes plus spécifiques ou techniques, on peut mentionner l'effet des fluctuations de la fréquence de la source d'interrogation et les effets du piégeage ou d'autres champs (magnétiques notamment) appliqués de manière intentionnelle.

Dans les étalons atomiques, nous arrivons à connaître et à maîtriser les perturbations de façon à rectifier le signal électromagnétique pour que sa fréquence

¹⁶ Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), *Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, cit.

¹⁷ Une phrase inspirée de la citation : « Ainsi les techniques, les mesures et les calculs se coordonnent pour donner un véritable rationalisme de l'électron », dans Bachelard, G., *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, PUF, 1951.

coïncide très bien avec la fréquence atomique non perturbée et que le degré de non-coïncidence soit caractérisé par une incertitude. À partir de ce signal, on peut observer une suite continue d'événements, par exemple la succession des passages par zéro du champ électrique de l'onde avec une variation positive dans une direction choisie, par rapport à laquelle on peut repérer ou dater toute autre observation. Le comptage d'un nombre successif choisi d'événements permet de réaliser un intervalle de temps. Ainsi, « le principe des fréquences domine le principe des mesures. Autrement dit, la question "combien de fois ?" prime la question "combien de temps ?" »¹⁸. Alors que le temps selon Aristote est lié au mouvement, il n'en est rien avec la conception du temps quantique qui peut être lié à la vibration, comme l'exprime bien Bachelard :

Si un corpuscule cessait de vibrer, il cesserait d'être. Désormais, il est impossible de concevoir *l'existence* d'un élément de matière sans adjoindre à cet élément une fréquence déterminée. On peut donc dire que l'énergie vibratoire est *l'énergie d'existence*. Pourquoi alors n'aurions-nous pas le droit d'inscrire la vibration sur le plan même du temps primitif ? Nous n'hésitons pas. Pour nous, le temps primitif est le temps vibré. La matière existe dans un temps vibré et seulement dans un temps vibré. Au repos même, elle a de l'énergie parce qu'elle repose sur le temps vibré.¹⁹

Les principes généraux que nous venons de décrire s'appliquent à tous types de transition électronique entre niveaux d'énergie et de systèmes atomiques possibles. Toutefois, seules quelques transitions particulières permettent de réaliser de bons étalons de fréquence. Par exemple, les étalons à atomes refroidis par laser utilisant la transition hyperfine du césium 133, qui est dans le domaine micro-onde réalisent cette transition avec une incertitude relative proche de 10^{-16} , soit 1 sur 10 million de milliards. Des étalons utilisant des transitions dans le domaine optique, par exemple dans l'atome strontium 87 ou dans l'ion aluminium ($^{27}\text{Al}^+$) atteignent des incertitudes encore 100 fois meilleures : 10^{-18} .

Des étalons atomiques de fréquences fondés sur des transitions atomiques différentes produisent des suites d'événements à des rythmes différents. Pour définir une unité de temps commune, il est donc nécessaire de faire un choix conventionnel particulier. Le choix en vigueur depuis 1967 consiste à choisir une et une seule transition atomique, la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133, et à choisir une valeur conventionnelle pour sa fréquence : 9 192 631 770 Hz.

Ce choix signifie que l'observation de 9 192 631 770 oscillations successives d'une onde électromagnétique accordée sur la transition hyperfine du césium 133 réalise une seconde. Notons dès maintenant que, dans le cadre de l'espace-temps décrit par la relativité générale, il s'agit d'une seconde de temps propre de l'horloge utilisée pour obtenir cette onde.

De plus, nous verrons en conclusion de cet article que ce choix conventionnel est remis en question : face à la multiplicité et à la plus grande précision des étalons de fréquence optiques par rapport aux fontaines atomiques (à césium), il est envi-

¹⁸ Bachelard, G., *La dialectique de la durée*, Paris, PUF, 1950.

¹⁹ *Ibidem*.

sagé de redéfinir la seconde à l'aide de nouvelles fréquences. Cette quête métrologique de la précision est souvent justifiée par des notions telles que la serendipité et l'utilité économique, ou encore par le fonctionnement propre aux technosciences : « Une bonne partie des recherches menées aujourd'hui ne le sont que parce qu'il y a des instruments pour le permettre »²⁰. Cependant, la métaphore de Bachelard peut nous apporter un éclairage différent :

Dans l'orchestre du Monde, il y a des instruments qui se taisent souvent, mais il est faux de dire qu'il y a toujours un instrument qui joue. Le Monde est réglé sur une mesure musicale imposée par la cadence des instants. Si nous pouvions entendre tous les instants de la réalité, nous comprendrions que ce n'est pas la croche qui est faite avec des morceaux de blanche, mais bien la blanche qui *répète* la croche. C'est de cette répétition que naît l'impression de continuité. Dès lors, on comprend que la richesse relative en instants nous prépare une sorte de mesure relative du temps. Pour pouvoir faire le compte exact de notre fortune temporelle, mesurer en somme tout ce qui se répète en nous-mêmes, il faudrait vraiment vivre tous les instants du Temps. C'est dans cette totalité qu'on obtiendrait le véritable déploiement du temps discontinu, et c'est dans la monotonie de la répétition qu'on retrouverait l'impression de la durée vide et par conséquent pure. Fondé sur une comparaison numérique avec la totalité des instants, le concept de richesse temporelle d'une vie ou d'un phénomène particulier prendrait alors un sens absolu, d'après la manière dont cette richesse est utilisée, ou plutôt d'après la manière où elle manque sa réalisation. Mais cette base absolue nous est refusée, nous devons nous contenter de bilans relatifs.²¹

Ainsi, cette quête métrologique de la précision du temps quantique serait une quête de la totalité, base absolue à l'aune de laquelle prendrait sens le concept de richesse temporelle d'une vie ou d'un phénomène particulier. Cela est bien exprimé dans la conclusion de l'article « La démesure de la précision » : « Le passé l'a montré, l'avenir le confirmera : les mesures de très haute précision conduisent indéniablement à des révolutions scientifiques et à des ruptures technologiques importantes pour notre société »²².

2 – Structure de l'espace-temps

En 1905, Albert Einstein a publié les principes fondamentaux de la relativité restreinte après avoir réfléchi attentivement aux problèmes liés à la synchronisation d'horloges éloignées. Cela a marqué la première étape vers sa théorie de la relativité générale complétée en 1916. Dans cet article fondateur intitulé « Zur Elektrodynamik bewegter Körper » et paru dans les *Annalen der Physik*, Einstein présente sa nouvelle perspective sur la notion de temps. Il suggère que toutes les difficultés

²⁰ Lévy-Leblond, J.-M., « L'avenir de la science, l'avenir d'une illusion ? », in *La science en question(s)*, Auxerre : Éditions Sciences Humaines, 2014, pp. 289-300.

²¹ Bachelard, G., *L'intuition de l'instant*, Paris, Gonthier, 1932.

²² Dimarcq, N., Sagnes, I., « La démesure de la précision », CNRS Le Journal, <https://lejournal.cnrs.fr/billets/la-demesure-de-la-precision> (dernière consultation 17.08.2024).

liées à la définition du temps peuvent être surmontées en remplaçant la notion de temps par « la position de la petite aiguille de ma montre ». Cette illustration met en évidence le concept fondamental du temps propre, tout en soulignant que le temps n'est plus considéré comme une quantité absolue indépendante du référentiel choisi, mais plutôt comme le résultat d'une expérience liée au référentiel de l'observateur.

Le développement de la relativité einsteinienne correspond pour Bachelard à une véritable rupture épistémologique : « Il n'y a donc pas de transition entre le système de Newton et le système d'Einstein. On ne va pas du premier au second en amassant des connaissances, en redoublant de soins dans les mesures, en rectifiant légèrement des principes. Il faut au contraire un effort de nouveauté totale »²³. Cet effort de nouveauté contraint le physicien « à une remise en question et en doute de ce qui paraissait évident jusque-là, de concepts qui demeuraient non interrogés, et principalement celui de simultanéité »²⁴, comme nous le verrons dans la section suivante. Voyons maintenant quelques conséquences contre-intuitives de la théorie de la relativité concernant le temps et l'espace.

Lorsqu'un événement se produit, tel qu'une collision d'objets, un flash ou une mesure particulière, l'expérimentateur associe une valeur temporelle et une position dans l'espace. Selon la théorie de la relativité, ces concepts sont si étroitement liés qu'ils peuvent se mélanger de différentes manières en fonction de la vitesse de l'expérimentateur (ou de son référentiel) par rapport à l'événement. Par conséquent, un expérimentateur peut mesurer des temps et des positions différents de ceux obtenus par un autre expérimentateur ayant une vitesse différente.

Dans un monde aussi "subjectif", comment peut-on pratiquer la physique ? Selon la citation d'Einstein, la clé réside dans la mise en place d'une expérience précise pour obtenir une réponse. Prenons une particule ponctuelle en mouvement. Peu importe la manière dont nous l'observons, elle suit une trajectoire dans l'espace-temps, ce qui a une réalité physique indéniable. Les relativistes appellent cette trajectoire une "ligne d'univers". Si nous attachons une horloge à la particule, elle mesurera le temps qu'il lui faut pour parcourir sa ligne d'univers, ce que nous appelons son "temps propre". Ainsi, cette horloge définit une chronologie basée sur le principe de causalité appliqué à la particule. Étant donné que l'espace et le temps sont sujets à interprétation, ce temps propre devient une mesure directe de la "longueur" de la ligne d'univers de la particule dans l'espace-temps. Cette mesure possède également une réalité intrinsèque. Raisonner globalement dans l'espace-temps nous permet de trouver des éléments physiques indépendants de l'état de l'expérimentateur qui les observe. L'observateur se contente de projeter la ligne d'univers et le temps propre associé dans les coordonnées définies par son référentiel, c'est-à-dire qu'il interprète leurs caractéristiques en termes d'espace et de temps selon son protocole d'observation.

Conséquence directe de cette approche, il en découle qu'il n'existe plus de chronologie a priori sur laquelle tous les expérimentateurs ou observateurs peuvent être d'accord. Les phénomènes décrits dans les ouvrages sur la relativité (tels que

²³ Bachelard, G., *Le nouvel esprit scientifique*, cit.

²⁴ Chazal, G., « Bachelard et la relativité », cit., p. 43.

la dilatation temporelle, la contraction des longueurs, etc., lors de changements de référentiel) sont une résultante de cette perspective. Selon la vitesse de l'expérimentateur, il est effectivement possible d'observer des phénomènes qui vont à l'encontre du bon sens commun de la physique newtonienne, tels que des événements sans lien causal se produisant dans un ordre temporel inversé, une apparence modifiée des objets, des mesures d'angles altérées, l'effet Doppler transverse, et bien d'autres encore²⁵.

Autre conséquence de la théorie de la relativité, le temps et l'espace sont liés dans les équations relativistes par une constante, généralement appelée "c", qui permet de "convertir" le temps en espace. Cette constante est caractéristique de la structure profonde de l'espace-temps. Le principe de relativité appliqué à l'électromagnétisme conduit à ce que "c" soit identifié à la vitesse de la lumière dans le vide, résultant de l'équivalence entre temps et espace plutôt que d'un privilège accordé à la lumière. Einstein a initialement posé la constance de la vitesse de la lumière comme un postulat dans sa théorie de la relativité restreinte, mais dès 1910, les chercheurs ont montré qu'une approche géométrique pouvait remplacer ce postulat en postulant une structure de l'espace-temps respectant le principe de causalité²⁶. Cela implique une limite de vitesse pour les particules sans masse, telles que les photons : la vitesse "c". Ces particules ont une trajectoire dans l'espace-temps que l'on appelle courbe de type lumière.

L'ensemble des courbes de type lumière qui se croise en un événement forment deux cônes de lumière : un cône de lumière future et un cône de lumière passé. L'espace-temps est alors divisé en différents domaines, contenant d'un côté (à l'extérieur des cônes) les courbes de type espace et de l'autre côté (à l'intérieur des cônes) les courbes de type temps. Cela a conduit Einstein et d'autres à sa suite à considérer que l'espace-temps est un univers bloc²⁷, c'est-à-dire que « tous les moments du temps coexistent, et que la succession constitue une illusion ». Cependant, cette conception se heurte à un ensemble d'objections fondées sur la conception du temps psychologique, développé par deux interlocuteurs d'Einstein, Henri Bergson et Karl Popper²⁸.

3 – Relativité restreinte et simultanéité

Nous avons vu que la théorie de la relativité est née d'une réflexion sur la synchronisation d'horloges éloignées, et donc sur le concept de simultanéité. D'après Bachelard :

²⁵ Voir Lachize – Rey, M., *infra*.

²⁶ Pour une revue voir Baccetti, V., et al., « Inertial Frames without the Relativity Principle », *Journal of High Energy Physics*, Vol. 2012, n°5, 2012, p. 119.

²⁷ Voir Einstein, A., *Relativity: The Special and General Theory*, eng. tr. by R.W. Lawson, London, Methuen, 1920, (*Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, Braunschweig, Vieweg, 1917).

²⁸ Pour une revue de l'histoire du concept de l'univers-bloc voir Dolbeault, J., « Einstein et l'univers-bloc », *Revue d'histoire des sciences*, n°71.1, 2018, pp. 79-109.

Par une exigence subite, le physicien contemporain nous demandera d'associer à l'idée pure de simultanéité l'expérience qui doit prouver la simultanéité de deux événements. C'est de cette exigence inouïe qu'est née la Relativité. Le Relativiste nous provoque : comment vous servez-vous de votre idée simple ? Comment prouvez-vous la simultanéité ? Comment la connaissez-vous ? Comment vous proposez-vous de nous la faire connaître, à nous qui n'appartenons pas à votre système de référence ? Bref, comment faites-vous fonctionner votre concept ? Dans quels jugements expérimentaux l'impliquez-vous, car l'implication des concepts dans le jugement, n'est-ce point là le sens même de l'expérience ? Et quand nous avons répondu, quand nous avons imaginé un système de signaux optiques pour que des observateurs différents puissent convenir d'une simultanéité, le Relativiste nous contraint à incorporer notre expérience dans notre conceptualisation. Il nous rappelle que notre conceptualisation est une expérience. Le monde est alors moins notre représentation que notre vérification.²⁹

Dans la théorie de la relativité restreinte, il est possible de définir un temps qui s'écoule de la même manière pour tous les observateurs dans un référentiel donné. Cependant, si le temps peut s'écouler différemment en changeant de référentiel, cela implique l'utilisation d'un outil géométrique approprié pour calculer les temps et les distances. Cet outil, issu du calcul tensoriel, est appelé la métrique de l'espace-temps. La métrique permet de calculer le temps qui s'écoule le long de la ligne d'univers d'un observateur, ou encore de calculer la "distance" entre deux événements quelconques de l'espace-temps.

Dans le cas d'un espace euclidien à trois dimensions, la métrique permet de calculer les distances classiques entre deux points de l'espace. Dans ce cas, les distances entre deux points sont toujours positives, et un espace vectoriel peut être associé, dans lequel tous les vecteurs ont une norme positive. Cependant, l'espace-temps de la relativité restreinte ne peut pas simplement être une généralisation de l'espace euclidien en quatre dimensions en raison des propriétés énoncées précédemment. Il est nécessaire de modifier la nature même de la métrique pour introduire une nouvelle phénoménologie. La métrique de la relativité restreinte est appelée métrique minkowskienne ou pseudo-euclidienne. La "distance" entre deux événements de l'espace-temps n'est plus nécessairement positive comme dans l'espace euclidien : elle peut être nulle ou même négative, tout comme les "normes" des vecteurs ! Dans cet espace-temps, la courbe de type lumière a une "longueur" nulle, alors que la courbe de type espace entre deux événements qui ne peuvent pas être reliés causalement, a une "distance" négative.

On retrouve ici, au travers du tenseur métrique, l'idée de Bachelard que c'est la théorie, la mathématique, qui va nous permettre de penser les phénomènes. Ainsi : « Le Calcul Tensoriel est vraiment le cadre psychologique de la pensée relativiste. C'est un instrument mathématique qui crée la science physique contemporaine comme le microscope crée la microbiologie. Pas de connaissances nouvelles sans la maîtrise de cet instrument mathématique nouveau »³⁰.

²⁹ Bachelard, G., *Le nouvel esprit scientifique*, cit.

³⁰ *Ibidem*.

Comment peut-on définir grâce au tenseur métrique un événement simultané dans deux référentiels où le temps s'écoule différemment en raison de leurs vitesses différentes ? Il est essentiel de pouvoir établir une relation entre les mesures du temps dans les deux référentiels. Les deux temps distincts des deux référentiels sont appelés temps "coordonnées" car ils font partie d'un système de coordonnées à quatre dimensions utilisé pour quadriller l'espace-temps et localiser les événements. Dans un référentiel donné, le temps-coordonnée correspond également au temps mesuré par un observateur immobile dans ce référentiel. Ainsi, en relativité restreinte, un référentiel peut être représenté par une classe d'observateurs fixes les uns par rapport aux autres, se déplaçant à la même vitesse et munis des mêmes horloges. Cela constitue un référentiel global. La métrique permet d'établir un lien entre les temps mesurés par deux classes d'observateurs ayant des vitesses différentes.

Pratiquement, il existe deux procédures pour relier le temps mesuré par ces deux classes d'observateurs, c'est-à-dire pour synchroniser leurs horloges :

1) La première procédure utilise des signaux lumineux : une horloge envoie un signal lumineux vers une deuxième horloge, qui le renvoie instantanément vers la première horloge. En mesurant le temps aller-retour du signal par la première horloge, ainsi que le temps de réflexion par la deuxième horloge, on peut définir opérationnellement la simultanéité. Cette procédure est connue sous le nom de synchronisation d'Einstein.

2) La deuxième procédure implique une horloge mobile : on synchronise une horloge A avec une horloge mobile, qui se déplace ensuite très lentement vers une seconde horloge B. La mesure de la différence de temps entre l'horloge B et l'horloge mobile permet de synchroniser les horloges A et B. Cette procédure est appelée synchronisation par transport lent d'horloges.

En relativité restreinte, ces deux procédures de synchronisation sont équivalentes, ce qui signifie qu'il est possible de synchroniser toutes les horloges de l'espace-temps de façon univoque.

Concentrons-nous maintenant sur une catégorie d'observateurs situés dans un référentiel en rotation, non-inertiel, tel que le référentiel terrestre dont les axes demeurent fixes par rapport à la Terre et qui est centré sur le centre de masse terrestre. De la même manière qu'un objet en chute libre ne peut pas suivre une trajectoire rectiligne et uniforme dans un référentiel non inertiel, la trajectoire d'un rayon lumineux ne peut être une ligne droite – c'est ce que l'on appelle l'effet Sagnac. Cet effet relève du référentiel, et donc des coordonnées. Dans le cas d'un système de positionnement par satellites tel que Galileo, l'omission de cet effet pour un utilisateur terrestre peut entraîner une erreur de positionnement d'environ trente mètres. Toutefois, un simple changement de coordonnées approprié permet de revenir à un référentiel inertiel et de ramener les trajectoires des rayons lumineux à des lignes droites. Cela constitue l'une des caractéristiques de l'espace-temps de la relativité restreinte. Ce n'est plus valide dans le cadre de la relativité générale, en présence de matière et d'énergie.

4 – Relativité générale et simultanéité

En 1916, Albert Einstein généralise la théorie de la relativité et propose une explication selon laquelle la gravitation est due à la déformation de l'espace-temps. Au lieu d'être considérée comme une force, la gravité est interprétée comme la courbure de l'espace-temps causée par la présence d'objets massifs et d'énergie. Cette courbure affecte les mesures effectuées par un observateur avec une intensité variable en fonction de la compacité de l'objet. Dans cette nouvelle théorie les caractéristiques de l'espace-temps de la relativité restreinte ne peuvent être applicables que localement, à proximité d'un événement sur une échelle bien inférieure la "taille" de sa courbure. Ainsi, sur une étendue de l'espace-temps de taille égale ou supérieure à sa courbure caractéristique, il n'est plus possible de trouver un changement de coordonnées permettant de transformer les trajectoires des rayons lumineux en lignes droites : le tissu de l'espace-temps est déformé tel un drap ondulé.

Nous pouvons avoir une certaine intuition des propriétés de l'espace-temps courbe. De la même manière que nous avons transformé la géométrie euclidienne de l'espace tridimensionnel en une géométrie "pseudo-euclidienne" à quatre dimensions dans le cas de la relativité restreinte, nous allons altérer la géométrie courbe – ou riemannienne – de la sphère bidimensionnelle pour obtenir une géométrie "pseudo-riemannienne" à quatre dimensions. Ainsi, certaines caractéristiques de l'espace-temps de la relativité générale peuvent être représentées par analogie à la surface courbée d'une sphère.

Par exemple, les "lignes droites" de la sphère, appelées géodésiques, correspondent aux grands cercles de la sphère, qui sont en réalité des trajectoires fermées. Ce phénomène se retrouve également dans les orbites planétaires : bien qu'elles ne subissent aucune force – puisque la gravitation n'est plus considérée comme une force – leurs trajectoires ne sont pas uniformément rectilignes, mais plutôt des géodésiques (fermées) de l'espace-temps. On peut également remarquer qu'il n'est pas possible de trouver un changement de coordonnées sur une sphère permettant de représenter tous les méridiens – qui sont des géodésiques – comme des droites sur un plan. Par exemple, grâce à une projection cylindrique, il est possible de transformer un seul grand cercle – une géodésique – en une droite, mais les autres grands cercles restent toujours des courbes sur le plan. Cela représente l'une des caractéristiques des espaces courbes, et cela reste encore un défi aujourd'hui lorsque l'on souhaite cartographier la surface terrestre. Il est également intéressant de noter que deux méridiens terrestres finissent par se croiser aux pôles, bien qu'ils soient tous deux considérés comme des "parallèles" sur la sphère.

Observons à présent une conséquence pratique plutôt contrariante de la courbure de l'espace-temps : il est impossible de synchroniser toutes les horloges de manière globale en utilisant les procédures précédemment expliquées dans le cadre de la relativité restreinte. Supposons que nous utilisions la procédure de synchronisation d'Einstein : en synchronisant une horloge A avec une horloge B, puis une horloge C avec l'horloge B, les horloges A et C ne seront généralement pas synchronisées entre elles ; cette procédure se révèle non transitive. Il devient donc nécessaire de trouver un nouveau moyen pour synchroniser les horloges.

Ce nouveau moyen est appelé “synchronisation coordonnée” et s’opère à travers la métrique de l’espace-temps. La métrique permet de relier le temps mesuré par n’importe quelle horloge à un temps-coordonnée, c’est-à-dire la coordonnée temporelle du référentiel spatio-temporel qui quadrille l’espace-temps afin de repérer ses événements. Par conséquent, la connaissance d’un modèle géométrique de l’espace-temps, représenté par la métrique, nous permet de construire un temps mathématique à partir des mesures des horloges. Ce temps est conventionnel et requiert une entente internationale concernant la forme de la métrique, c’est-à-dire le choix conventionnel du référentiel spatio-temporel.

Lorsqu’une horloge se déplace à faible vitesse autour d’une planète ou d’une étoile, le temps s’écoule différemment en fonction de sa distance par rapport à la masse. Cet effet est connu sous le nom de décalage d’Einstein ou décalage vers le rouge gravitationnel. Les horloges atomiques optiques permettent de détecter cet effet même pour des déplacements centimétriques dans le potentiel gravitationnel de la Terre. De manière plus courante, cet effet est mesuré par les horloges des systèmes de positionnement par satellites tels que le GPS ou Galileo. La différence de temps propre entre les horloges des satellites et celles des utilisateurs de la constellation doit être pris en compte pour éviter des erreurs de plus de 10 km par jour sur le géo-positionnement ! La synchronisation coordonnée des horloges du système de positionnement spatio-temporel permet alors de construire un temps commun a posteriori, grâce auquel les utilisateurs vont pouvoir dater tous les événements de façon univoque.

5 – Échelles de temps et référentiels spatio-temporels

La synchronisation des horloges avec la “synchronisation coordonnée” est la plus couramment utilisée pour l’élaboration d’échelles de temps telles que le Temps Atomique International (TAI) et les échelles de temps des systèmes de navigation par satellite (GNSS). Cependant, pour que cette convention devienne opérationnelle, il est nécessaire de définir des systèmes de référence relativistes conventionnels, au travers de l’établissement d’une métrique de l’espace-temps conventionnelle.

En 1979, il a été proposé par Ashby et Allan de construire une “grille de temps-coordonnée” globale sur et autour de la Terre³¹, réalisant ainsi l’idée d’une convention de “synchronisation coordonnée” pour les horloges qui ne posait pas le problème de non-transitivité de la synchronisation d’Einstein. Les auteurs proposent alors de prendre comme référence une horloge sur le géoïde³², c’est-à-dire de choisir un système de référence conventionnel R tel que le temps propre d’une

³¹ Ashby, N., Allan, D.W., « Practical Implications of Relativity for a Global Coordinate Time Scale », *Radio Science*, Vol. 14, n°4, 1979, pp. 649-669.

³² Au sens Newtonien, le géoïde est une surface équipotentielle du potentiel de pesanteur terrestre qui coïncide avec la surface moyenne des océans. Elle peut servir de surface de référence pour la mesure des altitudes. Pour une introduction sur ces notions voir Duquenne, F., « Le champ de pesanteur en quelques mots », *Revue XYZ*, n. 139, 2014, pp. 15-16.

horloge au repos sur le géoïde coïncide avec son temps-coordonnée dans R. Ce choix est pratique car il implique que le décalage gravitationnel en fréquence d'une horloge dépend de son altitude. La principale limitation à la réalisation d'une telle grille de temps-coordonnée globale devient alors la connaissance du géoïde, ou encore de l'altitude des horloges qui définissent l'échelle de temps.

Il est intéressant de noter que la question de la synchronisation des horloges a suscité une controverse dans les années '80, en raison du développement du système de positionnement global Navstar (GPS) et de la nécessité d'une échelle de temps globale. Cette question est examinée par A.J. Skalafuris, où l'auteur conclut : « En principe, l'espace courbe de Schwarzschild ne peut pas être intégré dans un espace plat à quatre dimensions sans l'ajout de dimensions supplémentaires. Ainsi, la base théorique du système de navigation GPS semble être défectueux et un nouvel algorithme devrait être construit »³³. En effet, la convention de temps-coordonnée ne peut être réalisée théoriquement que dans des schémas d'approximation.

Sur ce point, la réflexion de Bachelard est très intéressante : « La division classique qui séparait la théorie de son application ignorait cette nécessité d'incorporer les conditions d'application dans l'essence même de la théorie. [...] C'est alors qu'on s'aperçoit que la science réalise ses objets, sans jamais les trouver tout faits. La phénoménoteknikue étend la phénoménologie. Un concept est devenu scientifique dans la proportion où il est devenu technique, où il est accompagné d'une technique de réalisation »³⁴. Ainsi, la controverse de la constitution d'un temps global pour le développement du GPS découle de cette dialectique nouvelle entre théorie et application. La technique de réalisation d'un système de référence spatio-temporel va conditionner le développement théorique de ce système.

A la suite de ses travaux, N. Ashby propose une résolution concernant la "grille de temps-coordonnée" globale lors du symposium n° 114 de l'Union astronomique internationale (UAI)³⁵. Cette résolution n'a pas été adoptée car le président du comité d'organisation scientifique, J. Kovalesky, a estimé que les spécialistes en mécanique céleste et en astrométrie avaient besoin de plus de temps pour étudier le problème dans les commissions compétentes de l'UAI. À la suite de ce symposium, plusieurs auteurs ont contribué à la définition des échelles de temps-coordonnée, qui a aussi nécessité la définition d'un système de référence relativiste quadridimensionnel. Ces travaux ont abouti à la série de résolutions de l'UAI de 1991 et 2000 qui définissent les systèmes de référence ainsi que les échelles de temps actuels.

Nous résumons ici très brièvement ces résolutions. Un système de référence relativiste est implicitement défini en donnant les composantes du tenseur métrique dans ce système de référence, en plus d'une origine spatiale et d'une orientation

³³ Skalafuris, A.J., « Current Theoretical Attempts Toward Synchronization of a Global Satellite Network », *Radio Science*, Vol. 20, n°6, 1985, pp. 1529-1536, p. 1536, traduction de la citation des auteurs.

³⁴ Bachelard, G., *Le nouvel esprit scientifique*, cit.

³⁵ Rapporté dans Brumberg, V.A., « General Discussion », in Kovalesky, J., Brumberg, V.A. (eds.), *Relativity in Celestial Mechanics and Astrometry: High Precision Dynamical Theories And Observational Verifications*, Dordrecht, Springer, 1986.

spatiale des axes du repère, et une origine temporelle conventionnelle pour la coordonnée temporelle (l'orientation temporelle est triviale). Le tenseur métrique est une solution des équations d'Einstein dans l'approximation des faibles vitesses et des faibles champs gravitationnels pour un ensemble de N corps.

Pour modéliser des phénomènes au voisinage de la Terre, tels que son champ de pesanteur, les satellites artificiels en orbite autour de la Terre ou la rotation de la Terre, l'UAI recommande l'utilisation du GCRS (Système de Référence Céleste Géocentrique), où la coordonnée temporelle est définie en tant que TCG (Temps-Coordonnée Géocentrique). Ce temps-coordonnée représente le temps propre d'une horloge située à une distance infinie de la Terre.

Cependant, dans la pratique, nous utilisons une autre échelle de temps conventionnelle appelée TT (Temps Terrestre), qui diffère du Temps-Coordonnée Géocentrique par un ratio constant. En première approximation, le Temps Terrestre peut être réalisé par une horloge positionnée sur le géoïde. Cependant, il est en fait réalisé en utilisant un ensemble d'horloges atomiques extrêmement précises et stables à long terme³⁶. Si une horloge n'est pas située sur le géoïde, une correction en fréquence proportionnelle à son altitude est nécessaire pour obtenir le Temps Terrestre. Cette échelle temporelle conventionnelle est connue sous le nom de Temps Atomique International (TAI), à partir duquel le Temps Universel Coordonné (UTC) est défini et utilisé dans le monde entier. Ainsi, le temps auquel chacun synchronise sa montre ou son téléphone intelligent est en réalité un temps mathématique qui n'a de sens que dans le cadre d'un espace-temps courbe à quatre dimensions.

De nombreuses applications ont besoin d'une représentation physique de TAI/UTC. Pour cela, les instituts de métrologie participants à TAI/UTC réalisent des échelles de temps locales appelées UTC(k) pour l'institut k . Il s'agit d'échelles de temps physiques réalisées avec un ensemble d'horloges atomiques permettant de produire un signal ininterrompu que l'on utilise dans divers dispositifs de comptage et de dissémination, réalisant ainsi une mise en œuvre concrète des principes décrits dans les sections précédentes. Des moyens de comparaisons permettent de comparer entre elles les échelles de temps UTC(k) et les horloges y participant. Ces informations de comparaison, ainsi que les informations nécessaires pour prendre en compte le cadre relativiste sont fournies au Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) pour servir de base au calcul de TAI/UTC. En retour, le calcul fait par le BIPM donne l'écart entre chaque UTC(k) et UTC, ce qui permet à chaque institut de piloter son UTC(k) pour qu'il suive UTC. Cette architecture permet aussi d'utiliser un ensemble de 10 à 20 horloges primaires à atomes de césium réparties dans une dizaine d'instituts de métrologie pour mesurer l'intervalle de temps de TAI/UTC par rapport à la définition de la seconde.

Les échelles de temps physique UTC(k) servent de base à la dissémination d'UTC pour toutes les utilisations scientifiques ou sociétales. Cela inclut en particulier la synchronisation et la datation des événements dans les systèmes per-

³⁶ Voir Petit, G., Panfilo, G., « Comparison of Frequency Standards Used for TAI », *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 62, n°6, 2013, pp. 1550-1555.

mettant de réaliser les référentiels spatio-temporels. On estime que les meilleures UTC(k) dévient de l'échelle de temps calculée UTC de quelques nanosecondes. On se reportera à l'article de Gianna Panfilo pour une description complète de l'architecture de TAI/UTC et de ses caractéristiques.

6 – La démarche heuristique de la métrologie

Le cadre relativiste, qui traite l'espace-temps courbe à quatre dimensions comme un tout indissociable, s'applique non seulement à la construction des échelles de temps, mais également à la construction des référentiels spatiaux. En effet, ces deux aspects sont étroitement liés, car ils ne sont que les reflets d'un même objet géométrique : la métrique de l'espace-temps. Ainsi, l'espace émerge de la mesure du temps. Les référentiels modernes sont entièrement construits à partir de mesures de temps ou de fréquence. Par exemple, la construction du référentiel terrestre ITRS (Système de Référence Terrestre International) repose sur quatre techniques :

1) Les systèmes de positionnement par satellites, qui utilisent des mesures de temps de vol de signaux entre différentes horloges.

2) Le VLBI (Interférométrie à Très Longue Base), qui mesure les différences de temps d'arrivée entre différentes horloges en utilisant des signaux provenant de quasars lointains.

3) Le SLR (Satellite Laser Ranging), qui mesure les temps aller-retour de signaux laser réfléchis par des satellites.

4) Et enfin DORIS (Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégré par Satellite), un système de positionnement qui mesure la fréquence des signaux micro-ondes.

Toutes ces mesures doivent être interprétées dans le cadre de la relativité générale afin d'obtenir la plus grande précision possible dans la construction du référentiel terrestre.

Nous voyons donc que le cadre conceptuel (les lois physiques et les mathématiques qui les sous-tendent) est réalisé, on pourrait dire matérialisé, grâce à un ensemble de mesures donné par des protocoles expérimentaux bien documentés, ainsi que des conventions internationales définies dans le cadre d'organisations internationales telles que le BIPM et l'UAI³⁷. Ces mesures en retour nous donnent des informations sur notre cadre conceptuel. Elles disent quelque chose de la réalité (en elle-même inaccessible) et donc nous renseigne sur le fait que notre cadre conceptuel est une "bonne" description de la réalité, c'est-à-dire qu'il existe une cohérence entre les prédictions des mesures calculées dans le cadre conceptuel et les mesures elles-mêmes. La non-cohérence entre les pré-

³⁷ L'UAI est une organisation non gouvernementale internationale alors que le BIPM est une organisation intergouvernementale.

diction des mesures et les mesures elles-mêmes peut être due à une erreur de mesure ou bien au fait que le cadre théorique utilisé n'est pas une bonne représentation de la réalité. Plus l'écart entre les deux est grand par rapport aux erreurs de mesures, plus la probabilité est grande que ce soit le cadre théorique qui doit être remis en question.

Pendant, l'estimation des erreurs de mesures est toujours très délicate car elle fait appel à une connaissance fine des instruments et des conditions expérimentales. Il est toujours possible d'avoir oublié une source d'erreur ou bien d'avoir mal estimé un des effets qui influence le résultat de l'expérience. Dans ce cas l'erreur est sous-estimée et peut faire croire que le cadre théorique n'est pas correct. Il existe plusieurs exemples d'expériences qui ont conduit certains chercheurs à remettre en question un cadre théorique alors que le problème provenait plutôt d'un effet non pris en compte dans le bilan d'erreur, par exemple l'anomalie Pioneer³⁸ ou encore les neutrinos qui vont plus vite que la lumière³⁹.

Dans la théorie de la relativité générale, le temps est à la fois du côté du cadre conceptuel (temps-coordonnée) et du côté des mesures (temps propre). Ainsi, la réalisation d'un système de références spatio-temporel nous permet d'unifier une vision purement formelle de l'espace-temps (la théorie), et les mesures que l'on peut en faire (basées sur des instruments que l'on fabrique et que l'on comprend grâce à ce même cadre conceptuel). L'intérêt provient du fait que parfois (souvent) nos mesures ne correspondent pas à leur prédiction. C'est là tout l'intérêt, heuristique, de cette démarche. Cela nous permet de faire des découvertes : une nouvelle loi physique, une meilleure description (modèle) de nos instruments de mesures, de nos procédures expérimentales, etc.

Cet entremêlement de la technique et de la théorie et son pouvoir heuristique sont bien exprimés par Bachelard :

Ainsi, l'essor de la pensée scientifique dans ses formes contemporaines se révèle comme une solidarité du génie et de la technique. [...] si l'on aborde vraiment la réflexion sur une technique qui, déjà, est un aboutissant de la réflexion, on se rendra compte que le circuit qui va sans cesse, dans la pensée scientifique, de la théorie à la technique et des résultats techniques nouveaux aux refontes théoriques nous livre un mouvement humain nouveau. Cette liaison si forte, si indispensable de la théorie à la technique nous paraît devoir s'énoncer comme un déterminisme humain très spécial, comme un déterminisme épistémologique qui n'était guère sensible il y a quelques siècles dans la séparation des cultures mathématiques et expérimentales. On ne peut concevoir, croyons-nous, un arrêt de ce déterminisme à deux termes, à deux voies. Sous ces deux formes, ce déterminisme de la pensée et de l'expérience scientifiques fait la preuve de sa double fécondité. Il est un augmentatif humain.⁴⁰

³⁸ Turyshev, S.G., et al., « Support for the Thermal Origin of the Pioneer Anomaly », *Physical Review Letters*, Vol. 108, n°24, 2012.

³⁹ Cho, A., « Once Again, Physicists Debunk Faster-Than-Light Neutrinos », *Science*, 2012, <https://www.science.org/content/article/once-again-physicists-debunk-faster-than-light-neutrinos> (dernière consultation 21.03.2024).

⁴⁰ Bachelard, G., *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, cit.

Nous allons illustrer cette fécondité avec deux exemples : l'expérience historique du pendule des astronomes, et son pendant moderne avec des horloges atomiques.

6.1 – Le pendule des astronomes

Depuis longtemps, la forme de la Terre a suscité des interrogations, des hypothèses et des expérimentations. Dans l'Antiquité grecque, les philosophes l'imaginaient sphérique ou plate⁴¹. Ératosthène a établi un lien entre l'inclinaison des rayons solaires et la forme supposée sphérique de la Terre, ce qui lui a permis de déduire sa circonférence. Le Soleil lui-même était utilisé comme moyen de mesure du temps, par exemple à l'aide d'un gnomon. Ainsi, on peut déjà observer un lien entre un instrument de mesure du temps, le gnomon, et la forme de la Terre, alors inaccessible. Plus tard, la connaissance de la forme de la Terre s'est étendue à celle de son champ de pesanteur, ce qui a donné naissance à la géodésie physique.

Un pendule est un instrument très simple : une masse est reliée par un fil à un point fixe. Ce fil a une longueur fixe. Naturellement, la direction du fil du pendule au repos est verticale, car la masse est attirée par la Terre : c'est la direction de la pesanteur. Si on écarte la masse de sa position verticale, alors elle tombe vers le bas sous l'effet de son poids puis remonte, dans un mouvement de va-et-vient. La durée d'un va-et-vient s'appelle la période du pendule. On peut la mesurer en secondes.

Il y a un lien physique entre la période du pendule, la longueur de son fil, et la force de la pesanteur. Si le fil est plus long, alors la distance parcourue par le pendule lors d'un va-et-vient est plus longue, et donc la période du pendule augmente. Si la pesanteur est plus forte, la masse tombe plus vite et donc la période du pendule diminue. C'est ce lien quantifiable entre différentes grandeurs physiques qui fait du pendule un instrument scientifique, dont les savants du XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècle se sont emparés pour établir un lien entre le temps et l'espace, entre la durée et la longueur.

Le désir d'établir une mesure universelle était l'une des raisons pour lesquelles le pendule à secondes accompagnait les astronomes dans leurs voyages. Une mesure universelle est très importante pour les astronomes et les physiciens qui prétendent à l'universalité des théories physiques, mais aussi pour les commerçants pour mesurer les quantités des produits échangés.

L'abbé Picard, géodésien et astronome français, a mis en avant l'importance de sauvegarder la toise de Paris comme étalon de mesure universelle de distance. Le pendule offrait la possibilité de lier la longueur de la toise de Paris à sa période, pour pouvoir ensuite le transporter partout dans le monde. Cependant ce projet s'est heurté au fait que la Terre n'est pas une sphère parfaite, et donc que la pesanteur n'a pas la même force partout sur Terre : la relation entre la longueur et la période du pendule n'est en fait pas universelle. Ce phénomène a été observé pour la première fois par Jean Richer, astronome de l'Observatoire de Paris, lors de son

⁴¹ Danielle, J., *Le Monde comme le voyaient les Grecs*, Paris, Les belles lettres, 2018.

expédition à Cayenne entre 1672 et 1673. Après 10 mois d'observations, Richer a constaté que la période du pendule à secondes mesurées à Cayenne était plus longue que celle mesurée à Paris. En une journée, le pendule effectuait à Cayenne 148 oscillations de moins qu'à Paris, comme si sa longueur était plus grande.

En supposant que la longueur du fil ne change pas, ce dont Richer s'était assuré, il fallait donc que ce soit la pesanteur qui soit plus faible à Cayenne qu'à Paris. Or, Cayenne est beaucoup plus proche de l'équateur que Paris. Newton, le savant anglais qui a développé la théorie de la gravitation universelle, prenait au sérieux les mesures de Richer. Dans sa théorie, la force gravitationnelle est d'autant plus faible que l'on s'éloigne de la Terre, et donc Cayenne devait être plus éloignée du centre de la Terre que Paris. Cela corroborait une autre de ses hypothèses : la Terre est aplatie aux pôles à cause de sa rotation sur elle-même.

On voit dans cet exemple le lien étroit entre théorie et observations, qui n'est pas aussi simple que l'on peut le penser naïvement : les observations (ici la réalisation d'un étalon qui réalise la seconde) nous guident dans la construction d'un modèle théorique simplifié, qui est ensuite confronté aux observations, qui peuvent nous conduire à réviser notre modèle. Et ainsi de suite... C'est un processus de construction – de compréhension de monde – itératif, qui évolue de concert avec l'évolution technique des instruments de mesures.

6.2 – La figure de la Terre et les horloges atomiques

L'augmentation de la stabilité et de l'exactitude des horloges a nécessité d'en comprendre leur fonctionnement intime. Nous avons vu comment en étudiant les systématismes associés au pendule qui bat la seconde, celui-ci a permis d'établir et de vérifier des hypothèses importantes concernant la figure de la Terre. L'usage de l'horloge a été détourné pour devenir un instrument de mesure de la pesanteur. Plus précisément, une synergie s'est établie entre l'amélioration d'une application pratique, la mesure du temps, et la connaissance scientifique des phénomènes qui régissent celle-ci. La qualité et la nature des meilleures horloges a beaucoup évolué depuis les horloges à pendule : nous utilisons aujourd'hui des horloges atomiques. Nos moyens d'étudier la figure de la Terre ont aussi beaucoup évolué, et notamment ont connu une révolution avec l'avènement des satellites géodésiques comme GRACE et GOCE. Cependant, nous allons voir comment nous envisageons de nouveau d'utiliser les horloges pour améliorer notre connaissance de la Terre et de son champ de pesanteur.

L'extrême exactitude des horloges optiques s'est accompagnée, comme pour le pendule qui bat la seconde, d'une connaissance fine de leurs systématismes et donc de leur modélisation physique. La description locale d'une telle horloge fait appel à nos connaissances de la théorie quantique, alors que la description de la comparaison à distance des horloges fait appel à la théorie de la relativité générale. Nous avons vu que la comparaison de deux horloges placées dans des champs gravitationnels différents, donc dans un espace-temps muni d'une courbure non-nulle, conduit à une différence de fréquence apparente entre les deux horloges, ou décalage vers le rouge gravitationnel.

Cet effet est une conséquence directe du principe d'équivalence d'Einstein, un des piliers de toute la physique moderne. Considérons un photon émis depuis un point A dans un système de référence accéléré vers un point B qui est en direction de l'accélération. Nous supposons que les points A et B sont fixes et séparés par une distance h_0 dans le référentiel accéléré. Le temps de vol du photon est alors $\Delta t = h_0/c$, où c 'est la vitesse de la lumière dans le vide. Pendant ce temps Δt la vitesse du référentiel augmente d'une quantité $\Delta v = a\Delta t = ah_0/c$, où a est la magnitude de l'accélération $\vec{a}$ du référentiel. L'effet Doppler prédit alors un décalage en fréquence entre la fréquence de réception du signal au point B, ν_B , et la fréquence d'émission au point A, ν_A , d'une quantité $\nu_B/\nu_A = 1 - \Delta v/c = 1 - ah_0/c$.

Or, le principe d'équivalence d'Einstein postule l'équivalence entre le vecteur accélération de la pesanteur $\vec{g}$ et un champ d'accélération $\vec{a}$, tel que $\vec{a} = -\vec{g}$. Nous déduisons que dans un référentiel non accéléré en présence d'un champ de pesanteur $\vec{g}$: $\nu_B/\nu_A = 1 - gh_0/c$, où g est la magnitude du vecteur $\vec{g}$. ν_A est la fréquence du photon à l'émission (fort potentiel de pesanteur) et ν_B est la fréquence du photon à la réception (faible potentiel de pesanteur). En effet, le vecteur accélération de la pesanteur est le gradient du potentiel de pesanteur, qui diminue donc entre le point A et le point B. Comme $\nu_B < \nu_A$, on dit généralement que la fréquence du signal à la réception est "décalée vers le rouge". On peut aussi considérer cet effet en termes de conservation de l'énergie. Intuitivement, le photon qui se déplace du point A au point B doit "travailler" afin de s'échapper de l'attraction due au champ de pesanteur. Il perd alors de l'énergie et sa fréquence décroît en vertu de l'équivalence entre énergie et fréquence.

Ainsi, si deux horloges (parfaites et identiques) sont placées en A et en B et que l'horloge en A (potentiel de pesanteur fort) est utilisée pour générer le signal de fréquence ν_A , alors le signal reçu en B (potentiel de pesanteur faible) aura une fréquence inférieure à celle d'un signal localement généré par l'horloge en B. La différence de fréquence mesurée entre le signal généré localement et le signal reçu nous renseigne alors sur la distance h_0 entre les deux horloges et le champ de pesanteur g . Une formule plus générale, valide pour un champ de pesanteur non uniforme et appliquée à deux horloges fixes à la surface de la Terre nous dit que cette différence de fréquence est proportionnelle à la différence des potentiels de pesanteur entre les deux horloges :

$$\frac{\nu_B - \nu_A}{\nu_A} = \frac{W_B - W_A}{c^2} \quad (1)$$

Le potentiel de pesanteur W est la somme du potentiel gravitationnel U et de l'énergie cinétique par unité de masse: $W = U + v^2/2$, où v est la vitesse de l'horloge dans un référentiel inertiel fixe par rapport aux étoiles lointaines et centré sur le centre de masse de la Terre (système de référence céleste géocentrique ou GCRS).

La formule (1) lie l'effet Einstein à une différence de potentiel de pesanteur ΔW et donc à une différence d'altitude Δh . On peut en déduire les ordres de grandeurs suivants: $\Delta v/\nu \sim 10^{-18} \leftrightarrow \Delta W \sim 0.1 \text{ m}^2/\text{s}^2 \leftrightarrow \Delta h \sim 1 \text{ cm}$. Autrement dit, on peut potentiellement détecter une différence d'altitude de 1 cm en comparant

deux horloges ayant une exactitude en fréquence relative de 10^{-18} . C'est la *géo-désie chronométrique*. Cela a été démontré expérimentalement pour la première fois en septembre 2010 par l'équipe du *National Institute of Standards and Technology* (NIST): l'équipe a comparé localement deux horloges optiques basées sur l'atome d'aluminium, puis a soulevé une des deux horloges de 33 cm. Ils ont alors observé un décalage en fréquence relative de $(4.1 \pm 1.6) \times 10^{-17}$. Plus récemment, en 2020, des équipes du RIKEN et de l'Université de Tokyo ont comparé les fréquences de 2 horloges optiques placées respectivement au rez-de-chaussée et en haut d'un gratte-ciel de Tokyo, d'une hauteur de 450 mètres. Ils ont pu vérifier l'effet de décalage vers le rouge gravitationnel avec une exactitude de l'ordre de 4 cm (ou 4×10^{-18} en fréquence relative).

Il faut préciser qu'afin de comparer des horloges optiques qui ont une exactitude en fréquence relative de l'ordre de 10^{-18} , il est nécessaire d'avoir des moyens de comparaison qui ne dégrade pas cette exactitude. Les moyens classiques de comparaison temps/fréquence par satellite n'atteignent pas cette performance. Cependant, de nouvelles méthodes basées sur le transfert temps/fréquence par fibre optique permettent de faire des comparaisons avec des précisions en fréquence relative bien meilleures que 10^{-18} sur des distances continentales⁴². De plus, des méthodes de transfert optique de temps/fréquence en espace libre sont développées, atteignant des stabilités de l'ordre de 3×10^{-19} en moins d'une heure⁴³, sur des distances de 300 km. De plus, afin d'être utiles à la géodésie, plusieurs projets d'horloges optiques transportables sont en cours de développement⁴⁴.

L'observation directe des différences du potentiel de pesanteur grâce aux comparaisons d'horloges est une mesure complètement nouvelle en géodésie physique, qui utilise généralement les mesures des gradients du potentiel de pesanteur (gravimétrie, gradiométrie). Cela ouvre de nouvelles perspectives en ce qui concerne la contribution des horloges optiques à la détermination du potentiel de pesanteur terrestre. Il reste à développer de nouveaux instruments ainsi que de nouvelles méthodes d'analyse permettant d'intégrer cette nouvelle observable aux autres. En effet, l'observation des différences du potentiel de pesanteur est complémentaire des observables classiques de la géodésie physique : elle donne accès à des échelles spatiales intermédiaires entre les méthodes satellitaires, qui donnent avec précision la figure de la Terre à grande échelle, et les méthodes au sol comme la gravimétrie, qui donnent accès aux courtes échelles du potentiel de pesanteur.

⁴² Voir par exemple Lisdat, C., et al., « A Clock Network for Geodesy and Fundamental Science », *Nature Communications*, n°7, 2016.

⁴³ Caldwell, E.D., et al., « Quantum-Limited Optical Time Transfer for Future Geosynchronous Links », cit.

⁴⁴ Voir par exemple, Grotti, J., et al., « Long-Distance Chronometric Leveling with a Portable Optical Clock », *Physical Review Applied*, Vol. 21, n°6, 2024.

Conclusion

Dans le cadre de la physique, la représentation et la réalisation des échelles de temps se basent sur l'identification, l'observation et la modélisation de phénomènes périodiques. Historiquement, la rotation de la Terre servait de référence pour mesurer le temps, mais des irrégularités ont conduit à l'adoption d'une transition atomique comme nouvelle référence. La physique propose quatre conceptions majeures du temps : comme mouvement, paramètre d'évolution des équations dynamiques, quantum d'énergie, et convention géométrique. Les avancées de la physique quantique et de la relativité ont transformé les références temporelles, menant à des horloges atomiques et leurs moyens de comparaisons extrêmement précis et stables. Aujourd'hui, les références temporelles combinent ces conceptions, permettant une mesure du temps adaptée aux exigences modernes et prescrites dans les conventions internationales. Depuis le point de vue de la métrologie, nous avons décrit en détail comment les théories de la physique quantique et de la relativité générale ont permis la construction de référentiels spatio-temporels utilisés de façon internationale, grâce à la construction de nouveaux instruments de mesures ainsi qu'à l'établissement de conventions internationales.

D'un point de vue épistémologique, nous avons montré comment la métrologie, grâce à l'étude fine de la cohérence entre les mesures et le cadre théorique qui les prédit, peut permettre de détecter des incohérences et ainsi conduire à des avancées scientifiques significatives. Nous aurions pu aussi montrer comment les scientifiques ont milité en faveur d'un système horaire standardisé, du milieu du XVIII^{ème} siècle au milieu du XX^e siècle, accompagnant ainsi la régulation de nombreuses activités sociales comme les marchés, le trafic ferroviaire ou encore le travail⁴⁵. En effet, la réalisation des systèmes de références spatio-temporels fournissent un cadre absolu, universel, rigide qui s'est développé en même temps que le monde moderne industriel, et au même moment où Einstein montre que le temps physique est relatif. La maîtrise du temps, comme temps social, permet et donne le cadre à de multiples processus de dominations caractéristiques d'une société de production capitaliste où tout semble s'accélérer⁴⁶.

Nous avons mentionné plus haut que les étalons de fréquence basés sur les transitions optiques surpassaient de deux ordres de grandeurs les étalons primaires permettant de réaliser la définition actuelle de la seconde fondée sur la transition hyperfine du césium, les fontaines atomiques. La communauté du temps-fréquence, dans le cadre de la Convention du Mètre, a donc naturellement entrepris un processus pour étudier une possible redéfinition de la seconde à partir de transitions optiques. Lors de la 27^{ème} Conférence Générale des Poids et Mesures (2022), la résolution 5 « Sur la future redéfinition de la se-

⁴⁵ Souchier, C., *Maîtriser le temps. Du projet scientifique au gouvernement des temporalités*, Vulaines-sur-Seine, Éditions du Croquant, 2018.

⁴⁶ Rosa, H., *Accélération. Une critique sociale du temps*, Paris, La Découverte, 2010.

conde » encourageant le Comité International des Poids et Mesures et les états Membres à faire les efforts nécessaires pour permettre, si un certain nombre de conditions sont remplies, une redéfinition de la seconde en 2030. La résolution fait référence à la feuille de route développée par le “comité consultatif du temps et des fréquences” pour ce faire⁴⁷.

De plus, afin que les meilleures horloges optiques puissent participer à l'établissement d'un temps-coordonnée global, il faut pouvoir les comparer sur des échelles intercontinentales. Cela n'est pas encore possible. Il existe donc de nombreux développements dans ce sens, et en particulier la création de moyens de comparaison optique en espace libre (et non au travers de fibres optiques), qui pourraient permettre un jour des liaisons satellitaires. Cependant, les horloges au sol pourraient être limitées par la connaissance des effets qui perturbent la mesure de leur fréquence, et en particulier la connaissance d'un modèle suffisamment complet des répartitions et des variations des masses à la surface et à l'intérieur de la Terre, et à celles qui composent l'atmosphère. Pour s'affranchir de ces effets et dans la perspective de l'établissement d'une échelle de temps globale, il pourrait être avantageux de transporter quelques horloges optiques dans des satellites en orbite loin de la surface terrestre. Les horloges atomiques terrestres deviendraient alors des outils de mesure de la forme de la Terre et de son potentiel gravitationnel, et de ses variations. Il existe déjà des projets de telles horloges dédiées à la mesure des différences de potentiel de pesanteur : les horloges optiques transportables.

Pacôme Delva

SYRTE, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS
Sorbonne Université, LNE, 61 avenue de l'Observatoire 75014 Paris
Pacome.Delva@obspm.fr

Sébastien Bize

SYRTE, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS
Sorbonne Université, LNE, 61 avenue de l'Observatoire 75014 Paris
sebastien.bize@obspm.fr

Bibliographie

- Ashby, N., Allan, D.W., « Practical Implications of Relativity for a Global Coordinate Time Scale », *Radio Science*, Vol. 14, n°4, 1979, pp. 649-669.
Baccetti, V., et al., « Inertial Frames without the Relativity Principle », *Journal of High Energy Physics*, Vol. 2012, n°5, 2012.
Bachelard, G., « Noumène et microphysique », *Recherches philosophiques*, n. 1, 1931, pp. 55-65, in Id., *Études*, Paris, Vrin, 1970, pp. 11-24.
Bachelard, G., *L'intuition de l'instant*, Paris, Gonthier, 1932.

⁴⁷ On trouve les éléments de cette feuille de route dans l'article Dimarcq, N., et al., « Road-map Towards the Redefinition of the Second », *Metrologia*, Vol. 61, n°1, 2024.

- Bachelard, G., *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, Félix Alcan, 1934.
- Bachelard, G., *L'expérience de l'espace dans la physique contemporaine*, Paris, Félix Alcan, 1937.
- Bachelard, G., *La dialectique de la durée*, Paris, PUF, 1950.
- Bachelard, G., *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, PUF, 1951.
- Brumberg, V.A., « General Discussion », in Kovalesky, J., Brumberg, V.A. (eds.), *Relativity in Celestial Mechanics and Astrometry: High Precision Dynamical Theories And Observational Verifications*, Dordrecht, Springer, 1986.
- Caldwell, E.D. et al., « Quantum-Limited Optical Time Transfer for Future Geosynchronous Links », *Nature*, n°618, 2023, pp. 721-726.
- Castelão Lawless, T., « La création et le développement de la phénoménotecnique dans l'œuvre de Gaston Bachelard », *Cahiers Gaston Bachelard*, Vol. 1, n°1, 1998, pp. 49-57.
- Chazal, G., « Bachelard et la relativité », *Cahiers Gaston Bachelard*, Vol. 12, n°1, 2012, pp. 37-48.
- Cho, A., « Once Again, Physicists Debunk Faster-Than-Light Neutrinos », *Science*, 2012, <https://www.science.org/content/article/once-again-physicists-debunk-faster-light-neutrinos> (dernière consultation 21.03.2024).
- Cutler, L.S., « Fifty Years of Commercial Caesium Clocks », *Metrologia*, Vol. 42, n°3, 2005.
- Danielle, J., *Le Monde comme le voyaient les Grecs*, Paris, Les belles lettres, 2018.
- Dennett, D., « Consciousness Explained », London, Penguin Books, 1991.
- Dimarcq, N., et al., « Roadmap Towards the Redefinition of the Second », *Metrologia*, Vol. 61, n°1, 2024.
- Dimarcq, N., Sagnes, I., « La démesure de la précision », CNRS Le Journal, <https://lejournel.cnrs.fr/billets/la-demesure-de-la-precision> (dernière consultation 17.08.2024).
- Dolbeault, J., « Einstein et l'univers-bloc », *Revue d'histoire des sciences*, n°71.1, 2018, pp. 79-109.
- Duquenne, F., « Le champ de pesanteur en quelques mots », *Revue XYZ*, n. 139, 2014, pp. 15-16.
- Einstein, A., « Zur Elektrodynamik bewegter Körper », *Annalen der Physik*, n° 17, 1905, pp. 895-921.
- Einstein, A., *Relativity: The Special and General Theory*, eng. tr. by R.W. Lawson, London, Methuen, 1920, (*Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, Braunschweig, Vieweg, 1917).
- Grotti, J., et al., « Long-Distance Chronometric Leveling with a Portable Optical Clock », *Physical Review Applied*, Vol. 21, n°6, 2024.
- Guinot, B., Arias, E.F., « Atomic Time-Keeping from 1955 to the Present », *Metrologia*, Vol. 42, n°3, 2005.
- Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM) (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML), *Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, 2008.
- Leschiutta, S., « The Definition of the 'Atomic' Second », *Metrologia*, Vol. 42, n°3, 2005.
- Lévy-Leblond, J.-M., « L'avenir de la science, l'avenir d'une illusion ? », in *La science en question(s)*, Auxerre : Éditions Sciences Humaines, 2014.
- Lisdar, C., et al., « A Clock Network for Geodesy and Fundamental Science », *Nature Communications*, n°7, 2016.
- Petit, G., Panfilo, G., « Comparison of Frequency Standards Used for TAI », *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 62, n°6, 2013, pp. 1550-1555.
- Ramsey, N.F., « History of Early Atomic Clocks », *Metrologia*, Vol. 42, n° 3, 2005 ; Leschiutta, S., « The Definition of the 'Atomic' Second », *Metrologia*, Vol. 42, n°3, 2005.
- Rosa, H., *Accélération. Une critique sociale du temps*, Paris, La Découverte, 2010.
- Skalafuris, A.J., « Current Theoretical Attempts Toward Synchronization of a Global Satellite Network », *Radio Science*, Vol. 20, n°6, 1985, pp. 1529-1536.
- Souchier, C., *Maîtriser le temps. Du projet scientifique au gouvernement des temporalités*, Vulaines-sur-Seine, Éditions du Croquant, 2018.
- Stoyko, A., Stoyko, N., « Les fluctuations périodiques de la rotation de la terre pendant les années 1933-1940. Conclusions pour la période 1933-1954 », *Bulletins de l'Académie Royale de Belgique*, Vol. 42, 1956, pp. 693-702.

- Terrien, J., « News from the International Bureau of Weights and Measures », *Metrologia*, Vol. 3, n°1, 1967.
- Turyshev, S.G., et al., « Support for the Thermal Origin of the Pioneer Anomaly », *Physical Review Letters*, Vol. 108, n°24, 2012.