

## Le temps atomique, nouveau mètre du monde

Notre représentation de l'espace et du temps physiques est fondée aujourd'hui sur des concepts issus de la théorie de la relativité d'une part, de la physique quantique d'autre part. Cette idée a des conséquences importantes, aussi bien conceptuelles que pratiques, qui se manifestent par exemple dans la définition des unités du Système international, dans les mesures de distance dans le système solaire ou encore dans les systèmes de navigation GNSS (GPS aujourd'hui, GALILEO bientôt).

Ainsi, le mètre est la distance parcourue par la lumière dans le vide en 1/299 792 458 secondes tandis que la seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133. La distance la plus précisément mesurée dans le système solaire est celle de la Terre à la Lune, la technique consistant à mesurer le temps aller-retour d'un pulse laser entre une station sur Terre et des rétro réflecteurs déposés sur la Lune. L'unité astronomique est aujourd'hui exprimée en unités atomiques.

*Serge Reynaud, chercheur CNRS  
au Laboratoire Kastler-Brossel, à Paris  
(Ecole Normale Supérieure et Université Pierre et Marie Curie)*

### Une introduction, avec Newton, Maxwell et Einstein

Le temps atomique a détrôné aujourd'hui le temps astronomique : les mesures les plus précises réalisées dans le système solaire sont basées sur l'utilisation des horloges atomiques. Ceci n'est pas seulement le résultat d'un progrès technique utilisant les techniques quantiques pour des mesures toujours plus précises, c'est aussi celui d'une profonde révolution conceptuelle.

Il suffit pour s'en convaincre de mettre bout à bout les quelques citations qui suivent. Commençons par les définitions classiques de Newton <sup>1</sup> :

*« Le temps absolu, vrai et mathématique, sans relation à rien d'extérieur, coule uniformément et s'appelle durée. Le temps relatif, apparent et vulgaire, est cette mesure sensible d'une partie de durée quelconque prise du mouvement dont on se sert ordinairement à la place du temps vrai. »*

*« L'espace absolu, sans relation aux choses externes, demeure toujours similaire et immobile. L'espace relatif est cette mesure ou dimension qui tombe sous nos sens par sa relation aux corps et que le vulgaire confond avec l'espace immobile. »*

Continuons avec Maxwell <sup>2</sup> qui introduit les définitions atomiques :

*« En astronomie la distance moyenne de la terre au soleil est choisie comme unité de longueur. Dans l'état actuel de la science, le standard le plus universel de longueur serait la longueur d'onde dans le vide d'une sorte particulière de lumière, émise par*

---

<sup>1</sup> Philosophiae Naturalis Principia Mathematica (1687)

<sup>2</sup> A Treatise on Electricity and Magnetism (1890)

*une substance commune comme le sodium qui a des raies bien définies dans son spectre. Ce standard serait indépendant de toute modification des dimensions de la Terre... »*

*« Le standard de temps dans tous les pays civilisés est déduit du temps de rotation de la Terre sur son axe. Le jour sidéral est mesuré avec une grande exactitude par les observations des astronomes; et le jour solaire moyen en est déduit, connaissant la longueur de l'année. Une unité de temps plus universelle pourrait être définie comme la période de vibration de la sorte particulière de lumière dont la longueur d'onde est l'unité de longueur. »*

Rappelons enfin les célèbres arguments d'Einstein<sup>3</sup> fondant les conceptions relativistes :

*« Si nous voulons décrire le mouvement d'un point matériel, nous donnons les valeurs de ses coordonnées en fonction du temps. Mais il ne faut pas perdre de vue qu'une description mathématique de ce type n'a de sens physique que si l'on a au préalable précisé de façon claire ce qu'il faut entendre par "temps". Il nous faut garder à l'esprit que tous les jugements dans lesquels le temps joue un rôle sont toujours des jugements sur des événements simultanés. Lorsque par exemple je dis "tel train arrive à 7 heures", cela signifie à peu près "le passage de ma petite aiguille de ma montre sur le 7 et l'arrivée du train sont des événements simultanés"... Le "temps" d'un événement est l'indication, simultanée à cet événement, d'une horloge au repos, située à l'endroit de l'événement... »*

*« On pourrait penser que toutes les difficultés liées à la définition du "temps" peuvent être surmontées en remplaçant "temps" par "position de la petite aiguille de ma montre". Une telle définition est effectivement suffisante s'il s'agit de définir un temps uniquement à l'endroit où se trouve ma montre; elle ne suffit plus dès lors qu'il s'agit de relier temporellement des séries d'événements qui se produisent à des endroits différents. ...un observateur, qui se trouverait ainsi qu'une horloge à l'origine des coordonnées et qui, à chaque signal lumineux lui parvenant à travers l'espace vide d'un événement à évaluer, associerait une position des aiguilles de cette horloge... »*

Ces concepts sont passés aujourd'hui dans les définitions même du système international d'unités. La Treizième Conférence générale des poids et mesures (1967) a décidé de définir l'unité de temps, la seconde, dans les termes suivants :

*« La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 ».*

Après une période transitoire où l'unité de longueur a été définie comme la longueur d'onde d'une transition, ce qui réalisait la proposition de Maxwell, la Dix-septième Conférence générale des poids et mesures (1983) a décidé :

*« Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 de seconde. »*

---

<sup>3</sup> Annalen der Physik XVII p. 891-921 (1905) ; traduction française dans "Einstein Œuvres choisies" F. Balibar et al, Le Seuil (1999).

C'est donc l'idée d'Einstein qui l'a finalement emporté : la vitesse de la lumière est un facteur de conversion qui permet de transformer des secondes en mètres. C'est d'ailleurs ainsi que sont effectuées les mesures les plus précises de distances, c'est aussi ce qui permet aux systèmes GNSS (le GPS aujourd'hui) de déterminer les positions d'un récepteur dans l'espace-temps à partir d'informations bâties sur les temps atomiques délivrés par des horloges à bord des satellites.

### **Le temps de la relativité générale**

La relativité générale est la théorie relativiste de la gravitation. Einstein en a posé les bases dès 1907, même si il lui en a encore fallu presque dix ans pour en faire une théorie cohérente. Dès son premier article sur le sujet <sup>4</sup>, il en tire des connaissances essentielles pour la mesure du temps :

*« Le processus mis en jeu dans l'horloge, et plus généralement dans tout processus physique, se déroule d'autant plus vite que le potentiel de gravitation du lieu où il advient est plus grand... Or, il existe des "horloges" qui sont présentes en des lieux de potentiels gravitationnels différents et dont l'allure peut être suivie très précisément: ce sont les sources des raies spectrales... La lumière qui vient de la surface solaire, lumière émise par une source de ce type, possède une longueur d'onde supérieure d'environ 2 millièmes à celle de la lumière émise sur la terre par des substances identiques. »*

Alors que plusieurs prédictions de la nouvelle théorie ont rapidement été confirmées <sup>5</sup>, l'effet de « ralentissement » des horloges dans un potentiel gravitationnel ou, de façon équivalente, de « déplacement vers le rouge » (« redshift ») de la fréquence de ces horloges est longtemps resté dans un statut peu assuré. Un événement marquant dans ce domaine est la vérification en 1960 de ce que l'on appelle aujourd'hui l'effet Einstein. Pound et Rebka utilisent des techniques de la physique quantique pour mettre en évidence cet effet sur des noyaux de l'isotope 57 du Fer, ils réalisent le premier test expérimental de la relativité générale avec un niveau de précision de l'ordre du 1%. Et pourtant le potentiel gravitationnel est celui de la Terre, et la différence de potentiel celle qui existe entre le haut et le bas d'une tour de 22,5 mètres !

Ce succès va être suivi de beaucoup d'autres utilisant les nouvelles techniques expérimentales associées au développement des radars, de l'électronique, des horloges atomiques, de l'optique et des lasers. Cette renaissance des tests de la relativité accompagne des progrès spectaculaires en métrologie. L'apparition des techniques

---

<sup>4</sup> Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik IV p. 411-462 (1907) ; traduction française dans "*Einstein Œuvres choisies*" F. Balibar et al, Le Seuil (1999).

<sup>5</sup> L'anomalie de l'avance du périhélie de Mercure, une déviation entre l'observation du mouvement de la planète et les calculs de la physique classique, établi avec soin par les astronomes durant le 19<sup>ème</sup> siècle, est expliqué par la relativité générale dès sa naissance en 1915. La déflexion de la lumière par le champ de gravitation du Soleil est observée pendant l'éclipse de 1919 lors d'expéditions montées par Eddington. Ces tests, relativement délicats parce qu'ils concernent des effets petits, sont aujourd'hui confirmés de façon absolument claire grâce aux méthodes développées dans les dernières décennies du 20<sup>ème</sup> siècle.

spatiales y joue également un rôle décisif, revitalisant le lien ancien entre gravitation et espace en faisant de celui-ci un lieu d'expérimentation et plus seulement d'observation. Sans prétendre à une quelconque exhaustivité, discutons quelques uns des tests réalisés dans les dernières décennies et qui concernent les principes de base de la relativité.

### **Les tests expérimentaux confirment la relativité générale (1)**

Le cœur de la relativité générale est l'identification entre la gravitation et la géométrie de l'espace-temps. Les horloges idéales, dans la pratique les horloges atomiques, mesurent le temps propre le long de leur trajectoire. Les masses en chute libre suivent des lignes géodésiques pour lesquelles la longueur définie en intégrant le temps propre est extrémale. Ces propriétés révèlent la géométrie même de l'espace-temps. C'est pour cette raison que des horloges fonctionnant sur des transitions différentes battent la même seconde ou que des masses de compositions différentes lâchés sans vitesse initiale dans un champ de gravité suivent la même trajectoire, pourvu que le mouvement ne soit pas affecté par des forces autres que la gravité, par exemple la friction de l'air.

Le principe d'équivalence, exprimant ces propriétés d'universalité, est un des principes les mieux vérifiés de la physique. Les tests du principe d'équivalence atteignent des précisions meilleures qu'une partie pour 1000 milliards ( $10^{-12}$ ) grâce à l'utilisation de balances de torsion. Les améliorations portent très largement sur la compréhension et le contrôle des fluctuations des instruments qui limitent la précision ultime des mesures. Ces tests trouvent aussi leur place dans l'espace qui offre des conditions idéales puisque l'espace interplanétaire n'oppose pas de résistance au mouvement. L'idée remonte à Newton : si l'attraction de la Terre et de la Lune par le Soleil ne respectait pas le principe d'équivalence, ceci pourrait se voir sur leur mouvement. En mesurant la distance Terre-Lune par le temps d'aller-retour d'un pulse laser depuis une station terrestre jusqu'à un des réflecteurs déposés sur la Lune par les missions Apollo ou Luna, on atteint une précision meilleure qu'une partie pour 1000 milliards ( $10^{-12}$ ).

L'espace ouvre des perspectives d'amélioration de la précision du test du principe d'équivalence. Le projet MICROSCOPE utilisera des micro-accéléromètres ultrasensibles développés à l'ONERA pour détecter une éventuelle violation de l'universalité de la chute libre entre des masses de compositions différentes. L'expérience sera embarquée sur un microsatellite du CNES à compensation de traînée, c'est-à-dire obligé par une technique de contrôle actif à suivre aussi exactement que possible une géodésique. Le test du principe d'équivalence sera poussé à une précision d'une partie sur un million de milliards ( $10^{-15}$ ), soit une amélioration d'un facteur mille par rapport aux meilleures mesures faites aujourd'hui.

### **Les tests expérimentaux confirment la relativité générale (2)**

Une deuxième partie du corpus théorique de la relativité générale consiste à obtenir la métrique qui décrit les propriétés de l'espace-temps. Après des années de travail, Einstein est parvenu en 1915 à écrire l'équation différentielle dont la solution fournit la métrique quand la distribution de matière (énergie et impulsion) est connue. Cette équation remplace l'équation de Newton qui donnait le potentiel de gravitation quand la distribution de masse était connue. L'équation de Newton est d'ailleurs retrouvée comme une limite non relativiste de l'équation d'Einstein, ce qui permet de fixer la constante apparaissant dans cette dernière à partir des seules constantes  $G$  et  $c$ .

La solution obtenue pour la métrique peut être testée en vérifiant les conséquences observables sur les tests d'horloge ou les mouvements de chute libre. Si l'on veut penser en terme d'analogie newtonienne, on vérifie que le potentiel mesuré par les horloges ou la force varient en fonction de la distance à la source de gravité conformément à la théorie. Les nombreux modèles qui ont été développés pour résoudre la question cruciale de l'unification de la théorie de la gravitation avec celles des autres interactions fondamentales conduisent à des anomalies, c'est-à-dire des déviations par rapport aux prédictions de la relativité générale. Les tests des lois de la gravité, poursuivies avec des précisions encore améliorées ou dans de nouveaux domaines, sont un des moyens dont nous disposons pour tester la nouvelle physique attendue au delà des théories actuelles.

L'équivalence entre temps et longueur qui se trouve au coeur de la théorie de la relativité permet de mesurer la distance de la Terre à la Lune à quelques millimètres près<sup>6</sup>. C'est un outil formidable d'observation qui a permis de réaliser des tests parmi les plus précis de la théorie. On sait ainsi que la relativité générale décrit avec une précision extrême la dynamique du système Soleil-Terre-Lune. On mesure également les dimensions du système solaire d'une façon très précise, beaucoup plus précise que par les observations astronomiques antérieures. En faisant de la télémétrie sur les premières sondes artificielles posées sur la planète Mars, la distance entre celle-ci et la Terre a pu être mesurée à quelques dizaines de mètres près, alors qu'elle est d'environ 80 millions de kilomètres à son minimum ! Ces techniques ont aussi permis de mettre en évidence un nouvel effet de la relativité générale, le retard subi par un signal électromagnétique se propageant dans un champ de gravitation (effet Shapiro). L'accord avec la relativité générale est encore très bon.

Le test de l'effet Einstein est réalisé de façon beaucoup mieux contrôlée aujourd'hui qu'en 1960 en comparant des horloges atomiques entre elles. Les horloges les plus précises sur Terre fonctionnent avec des atomes refroidis par laser. Leurs performances seront encore améliorées dans quelques années quand elles seront emportées dans l'espace où elles bénéficieront d'un environnement favorable de microgravité. Le projet PHARAO atteindra ainsi une stabilité relative d'une partie sur dix millions de milliards ( $10^{-16}$ ) sur une durée de quelques jours. Cette expérience embarquée sur la Station Spatiale permettra de gagner un facteur 30 sur le test de l'effet Einstein, un facteur 50 sur le test d'une éventuelle variation de la constante de structure fine.

### **Les tests continuent !**

Il existe de nombreuses raisons qui nous poussent à améliorer encore les tests de la relativité générale.

Quand on mesure les vitesses de rotation dans une galaxie telle qu'Andromède, on constate qu'elles sont trop grandes par rapport aux quantités de matière contenues dans la galaxie d'après l'observation de leur rayonnement. Tout se passe comme si une partie importante de la matière échappait à nos observations, c'est ce qu'on appelle le problème de la masse manquante. La solution la plus fréquemment étudiée consiste à considérer qu'il existe

---

<sup>6</sup> Voir par exemple les informations disponibles sur le site de la station de télémétrie Laser-Lune de l'Observatoire de la Côte d'Azur à Grasse <http://www.obs-azur.fr/cerga/laser/laslune/llr.htm> .

effectivement de grandes quantités de matière contribuant à la gravitation mais non détectées par les autres moyens d'observation, c'est ce qu'on appelle la matière noire.

Le même scénario se répète à l'échelle de l'Univers : la dynamique de celui-ci ne peut être expliquée en utilisant les lois de la relativité générale et les contenus en matière, énergie et impulsion, connus par les autres moyens d'observation. La cosmologie actuelle se sort de ce paradoxe en ajoutant une composante supplémentaire au contenu de l'Univers, c'est ce qu'on appelle l'énergie noire. Il est difficile dans ces conditions de prétendre que la physique est une science finie qui a atteint tous ses objectifs de compréhension du monde : les deux composantes, matière noire et énergie noire, constitueraient selon les observations 96% du contenu en énergie de l'Univers.

Matière noire et énergie noire ne sont observées que comme des anomalies des lois de la gravité aux très grandes échelles galactiques et cosmiques. Comment savoir si les observations révèlent effectivement des composantes nouvelles, aujourd'hui de nature inconnue, ou une modification des lois de la relativité générale à ces grandes échelles. Un des rares moyens dont on dispose pour distinguer ces explications est de vérifier la variation de la force de Newton aux distances les plus grandes possible.

La plus belle expérience disponible à ce jour sur cette question a été réalisée par la NASA sur les sondes Pioneer 10 et 11. Et elle n'a pas confirmé la forme attendue pour la loi de force : les mesures montrent une anomalie analogue à celle que produirait une force supplémentaire, orientée vers le Soleil et ayant une amplitude quasiment constante. On ne sait pas encore avec certitude si cette « anomalie Pioneer » est un premier indice des limites de la relativité générale, ou simplement le résultat d'un artefact expérimental, d'une erreur d'analyse. Mais cette question a une telle importance potentielle que l'anomalie fait l'objet d'études de plus en plus poussées par des équipes de plus en plus nombreuses <sup>7</sup>.

### **Le temps atomique pour mesurer le monde !**

Les premières mesures radar de la distance entre la Terre et une planète ont été réussies en avril 1961 lors d'une plus courte approche de Venus. Ces mesures se sont améliorées au cours des années en particulier avec une évaluation de plus en plus précise de l'effet Shapiro de retard à la propagation du champ électromagnétique dans le champ de gravité du Soleil. Aujourd'hui, l'échelle de longueur dans le système solaire (l'unité astronomique = AU) est déduite de mesures radar sur les planètes et surtout sur les sondes planétaires. La valeur actuellement admise est reproduite ici pour donner une idée de la précision atteinte grâce aux techniques de « ranging » <sup>8</sup> :

---

<sup>7</sup> En ce qui concerne l'anomalie Pioneer, de nombreuses références (en anglais) et informations sont disponibles sur les pages de la « Pioneer Anomaly Investigation Team » <http://www.issi.unibe.ch/teams/Pioneer/> ; des pages (en anglais) sont consacrées à l'anomalie Pioneer sur le site de la « Planetary Society » <http://www.planetary.org> . Des informations plus générales sur les missions Pioneer se trouvent sur les pages de la NASA <http://www.nasa.gov> . Vous pouvez trouver plus d'informations sur le sujet dans le document préparé pour le Festival de Fleurance en 2006, accessible sur le site du Festival <http://www.fermedesetoiles.com/fice/> .

<sup>8</sup> Valeur prise sur le site « Solar System Dynamics » du JPL <http://ssd.jpl.nasa.gov/?constants>

$$1 \text{ AU} / c = 499.004\,783\,806 (\pm 0.000\,000\,010) \text{ s}$$

$$1 \text{ AU} = 149\,597\,870\,691 (\pm 3) \text{ m}$$

Le fait que l'unité astronomique soit mesurée en unités SI, donc en unités atomiques, rend légitime l'étude de son éventuelle variation au cours du temps. En analysant toutes les mesures de distance dans le système solaire sur la période 1971-2003, Krasinsky et Brumberg ont trouvé une tendance à la variation de l'unité astronomique. Ce résultat n'a pas d'explication dans le cadre standard et il n'est pas non plus universellement accepté<sup>9</sup>...

Il s'inscrit dans une démarche de test systématique des grands principes de la physique, qui n'hésite pas à remettre en cause le principe d'équivalence qui implique quant à lui que les constantes sont vraiment constantes<sup>10</sup>... Les mesures du Laser-Lune permettent par exemple de contraindre une éventuelle variation temporelle de la constante de gravitation  $G$ . Les tests d'universalité des horloges peuvent eux être interprétés en termes de contraintes sur l'éventuelle variation temporelle des constantes de la physique quantique (en particulier mais pas seulement la constante de structure fine  $\alpha$ ) qui interviennent dans la définition des fréquences d'horloges.

Un exemple frappant de la révolution apportée par les techniques de mesure qui appliquent les concepts introduits par Einstein est fourni par les systèmes de Navigation Globale par Satellite (GNSS), GPS aujourd'hui, Galileo bientôt. Le GPS permet à tout utilisateur équipé d'un récepteur approprié de connaître sa position avec grande précision. Les 4 positions du récepteur dans l'espace-temps sont déduites de codes radio reçus de 4 satellites (au moins) appartenant à la constellation de 24 satellites qui naviguent à une altitude de 20 200 km avec une période correspondant à un demi-jour sidéral.

Le code correspond à une série de fronts correspondant chacun à une discontinuité de la phase électromagnétique repérée par un temps d'émission mesuré par les horloges atomiques à bord des satellites. L'horloge contenue dans le récepteur n'a pas besoin pour sa part d'être précise. Le récepteur évalue sa distance par rapport aux satellites en mesurant le temps mis par le signal radio pour l'atteindre depuis le satellite. Pour cela, il compare le code émis par le satellite (qu'il connaît) au signal qu'il reçoit effectivement. Les "pseudo-distances" qu'il obtient sont corrigées des effets de propagation, du biais de l'horloge du récepteur... La précision finale du système (disons 10m) requiert la synchronisation des horloges embarquées sur les satellites avec celles des stations de contrôle au sol, ainsi que la maîtrise des erreurs au niveau de ~30ns.

---

<sup>9</sup> G.A. Krasinsky & V.A. Brumberg, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy* 90 pp. 267-288 (2004). Pour un point de vue sceptique, voir E. M. Standish in "Transits of Venus, New Views of the Solar System and Galaxy" *Proceedings of the IAU Colloquium* 196 pp. 163-179 (2004).

<sup>10</sup> Vous pouvez trouver plus d'informations sur le sujet dans le document préparé par Jean-Philippe Uzan pour le Festival de Fleurance en 2002, accessible sur le site du Festival <http://www.fermedesetoiles.com/fice/> .

## Bibliographie

Les documents liés à la relativité générale sont nombreux. On pourra consulter en particulier des articles dans le numéro spécial Pour la Science « [L'ère Einstein](#) » de décembre 2004. Signalons aussi le dossier Pour la Science « [La gravitation](#) » de janvier 2003.

Un excellent livre de Jean Eisenstaedt « *Einstein et la relativité générale, Les chemins de l'espace-temps* » (CNRS Editions) permet de suivre le cheminement de la théorie, ses succès et ses difficultés, son renouveau dans les années 60. Un livre de Clifford Will (traduit de l'anglais) est spécialement consacré aux tests de la relativité générale « *Les enfants d'Einstein* » (InterEditions).

Les projets de physique fondamentale dans l'espace font l'objet de pages sur le site du CNES [http://smc.cnes.fr/Fr/physique\\_fonda.htm](http://smc.cnes.fr/Fr/physique_fonda.htm) ; une des "conversations" sur le site web du CNES a porté en 2007 sur les tests de la relativité générale <http://www.cnes.fr/web/5703-conversations-spatiales-janvier-2007.php>.

De nombreuses informations concernant la métrologie peuvent être consultés sur le web. On consultera en particulier le site du BIPM <http://www.bipm.org/> et son remarquable dossier sur le Système international d'unités <http://www.bipm.org/fr/si/>. Au sommaire, un aperçu du rôle qu'y joue la relativité et un historique des évolutions des définitions du mètre et de la seconde...

Un livre de Claude Audoin et Bernard Guinot « *Les fondements de la mesure du temps : Comment les fréquences atomiques règlent le monde* » (Masson) décrit de manière détaillée les principes et les applications des horloges atomiques ; la relativité et le système GPS y tiennent une place significative.

De très nombreuses références sur le principe et les applications du GPS sont accessibles sur le web. En voici une parmi d'autres :

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik « Connaître sa position, un problème de relativité » <http://www.arte.tv/fr/connaissance-decouverte/einstein/841586.html> > Einstein au quotidien

