



À LA MESURE DU TEMPS

La mesure du temps a toujours été une préoccupation des hommes depuis qu'ils ont pris conscience de son écoulement. Cette mesure a très vite permis d'organiser la société. Pour cela, les hommes ont créé des dispositifs de plus en plus ingénieux pour mesurer le temps à l'aide de phénomènes physiques bien choisis. Les liens entre la mesure du temps et l'astronomie sont d'ailleurs des plus anciens. C'est pour cette raison que la mesure du temps et la mesure de l'espace ont souvent été regroupées dans les observatoires astronomiques. Et cette intrication de l'espace et du temps est encore plus prégnante dans le cadre de la théorie de la relativité d'Einstein.

TEMPS MESURÉS, TEMPS DÉMESURÉS – V

Le *xx^e* siècle est un siècle de transition pour la mesure du temps qui va passer du domaine de l'astronomie à celui de la physique. Durant cette période, l'horlogerie va évoluer en passant des mouvements dont la source d'énergie est un ressort moteur aux mouvements dont la source d'énergie est l'électricité. C'est la naissance des montres électromécaniques (elles ont encore un balancier qui oscille à la fréquence d'environ 3 Hz), puis à diapason (qui vibre entre 300 Hz et 700 Hz et qui remplace le balancier) et enfin à quartz (oscillant à 32 kHz). Ces mouvements électriques auront du succès à partir de la fin des années 1950, en particulier grâce à l'augmentation de la fréquence d'oscillation qui permet un large gain en précision.

Seul le quartz sera utilisé dans les observatoires. Cela permettra entre autres à Nicolas Stoyko, dans les années 1930, de mettre en évidence les variations saisonnières du temps universel (nous y reviendrons dans un épisode ultérieur).

*Et c'est au milieu du *xx^e* siècle que les premières horloges atomiques apparaîtront...*

D'abord un peu de physique...

Toutes les horloges mesurent le temps qui passe en utilisant un phénomène périodique. L'alternance des jours et des nuits et les balanciers sont parmi les techniques les plus connues et les plus anciennes. Mais rien n'interdit évidemment l'utilisation d'autres phénomènes périodiques. On peut penser par exemple aux pulsars millisecondes (découverts dans les années 1980) dans le domaine de l'astronomie ou à l'utilisation des propriétés de certains atomes dans le domaine de la physique. Nous reviendrons dans un épisode ultérieur sur l'utilisation des pulsars en métrologie du temps et nous al-

lons détailler ici l'utilisation de quelques atomes pour construire des horloges atomiques.

On peut tenter de modéliser un atome en imaginant qu'il s'agit d'un système solaire en miniature. C'est ce qu'on appelle le modèle de Bohr. Le noyau occupe la place « centrale » (comme le soleil) et les électrons tournent autour de lui (comme les planètes). Dans ce modèle, chaque électron a une énergie bien précise et peut passer d'une orbite à une autre en gagnant ou en perdant une quantité d'énergie elle aussi bien précise. Cette énergie peut être apportée par un photon, ou de façon équivalente par une onde électromagnétique (ce qu'on appelle la dualité onde/corpuscule). Cette

énergie très précise est liée à la fréquence du photon ou de l'onde par :

$$E = h.\nu = \frac{h.c}{\lambda}$$

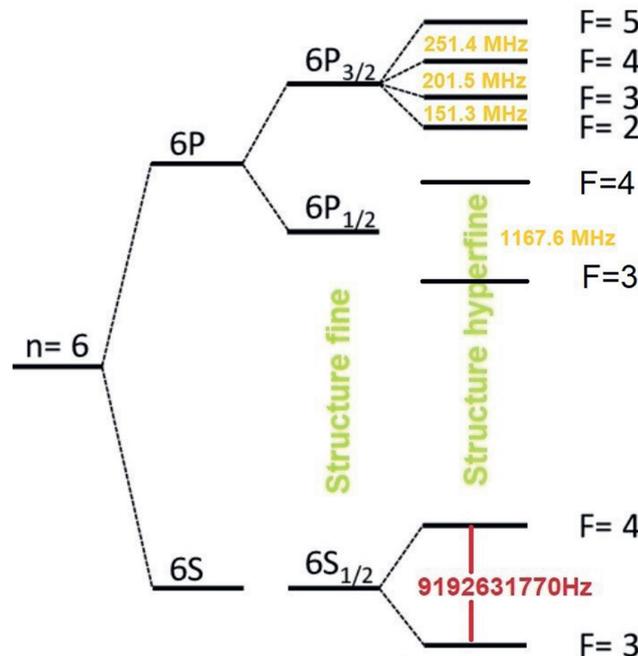
ν est la fréquence, c la vitesse de la lumière (299 792 458 m/s) et h la constante de Planck ($6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ J.s). Cette formule a été introduite par Albert Einstein en 1905, ce qui lui valut le prix Nobel en 1921 (et non pour sa théorie de relativité !). La constante de Planck a été présentée en 1900 par Max Planck dans son essai sur les longueurs d'onde de la lumière émise par un solide chauffé, *Le Corps noir*.

Le modèle de Bohr est simpliste et s'est révélé inexact, car la mécanique quantique montre qu'il n'est pas possible de connaître à la fois la position et la vitesse d'un électron sur son orbite. Les orbites « parfaites » des électrons, dans ce modèle, sont alors remplacées par des nuages de probabilité (on parle d'orbitale atomique) où un électron a plus ou

moins de chance de se trouver. Mais la quantification des niveaux d'énergie reste valable et c'est elle qui va permettre de construire une horloge atomique et de comprendre son fonctionnement.

L'ensemble des valeurs permises de l'énergie est caractéristique d'un élément donné (plus exactement d'un isotope). Au repos, un atome est toujours dans son état de plus basse énergie qu'on appelle le niveau fondamental. Tous les autres niveaux d'énergie sont des niveaux « excités » représentatifs d'un atome ayant absorbé de l'énergie.

On représente de façon conventionnelle les niveaux d'énergie d'un atome sur un diagramme. Le noyau de l'isotope 133 du césium (seul isotope stable) est constitué de 55 protons (donc 55 électrons) et de 78 neutrons. Dans les conditions normales, le césium est un métal mou, argenté, dont le point de fusion est de 28 °C. Ses électrons se répartissent suivant différentes couches et à l'intérieur de ces couches suivant des règles précises.



Quelques niveaux d'énergie de l'atome de césium 133 (état fondamental et premier état excité).

Le niveau « 6S » est le niveau fondamental de plus basse énergie. Il est lui-même constitué de deux niveaux dits « hyperfins » caractérisés par un « nombre quantique F ». La structure hyperfine résulte de l'interaction magnétique entre le noyau et les électrons. La transition d'horloge à la fréquence de définition est indiquée en rouge. La structure fine, moins importante ici, résulte de l'interaction dite « spin-orbite ».

Crédits F. Taris

Un atome qui se trouverait dans un état excité ne peut y rester indéfiniment. Il peut alors retomber dans l'état fondamental (ou dans un niveau d'énergie inférieur) de deux façons différentes. Soit spontanément en émettant un photon, le photon émis ayant une énergie égale à la différence d'énergie entre les niveaux initial et final. On parle alors d'émission spontanée. Soit par émission stimulée. Dans ce cas, un électron qui est dans un état excité va se désexciter grâce, paradoxalement, à l'apport d'une énergie supplémentaire apportée par des photons extérieurs (l'atome est illuminé par une lumière ayant une longueur d'onde correspondant à l'énergie de transition entre les deux états électroniques final et initial). En se désexcitant l'atome émet un photon « jumeau » de même fréquence, de même direction et de même phase que le photon incident (ce processus est la base du fonctionnement des lasers). Il y a donc deux photons émis pour un photon incident.

Les processus d'émission/absorption d'énergie trouveront une utilité dans le fonctionnement des horloges atomiques, en particulier celles qui utilisent le césium 133.

Tous ces rappels de physique permettent également de comprendre la définition de la seconde en vigueur depuis 1967 :

DÉFINITION OFFICIELLE

« 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 non perturbé. »

Les versions de laboratoire des horloges à jet de césium ont pour objectif de réaliser au mieux la définition de la seconde. Ce sont des étalons primaires de fréquence et de temps.

Principe de fonctionnement et réalisation des horloges atomiques à césium

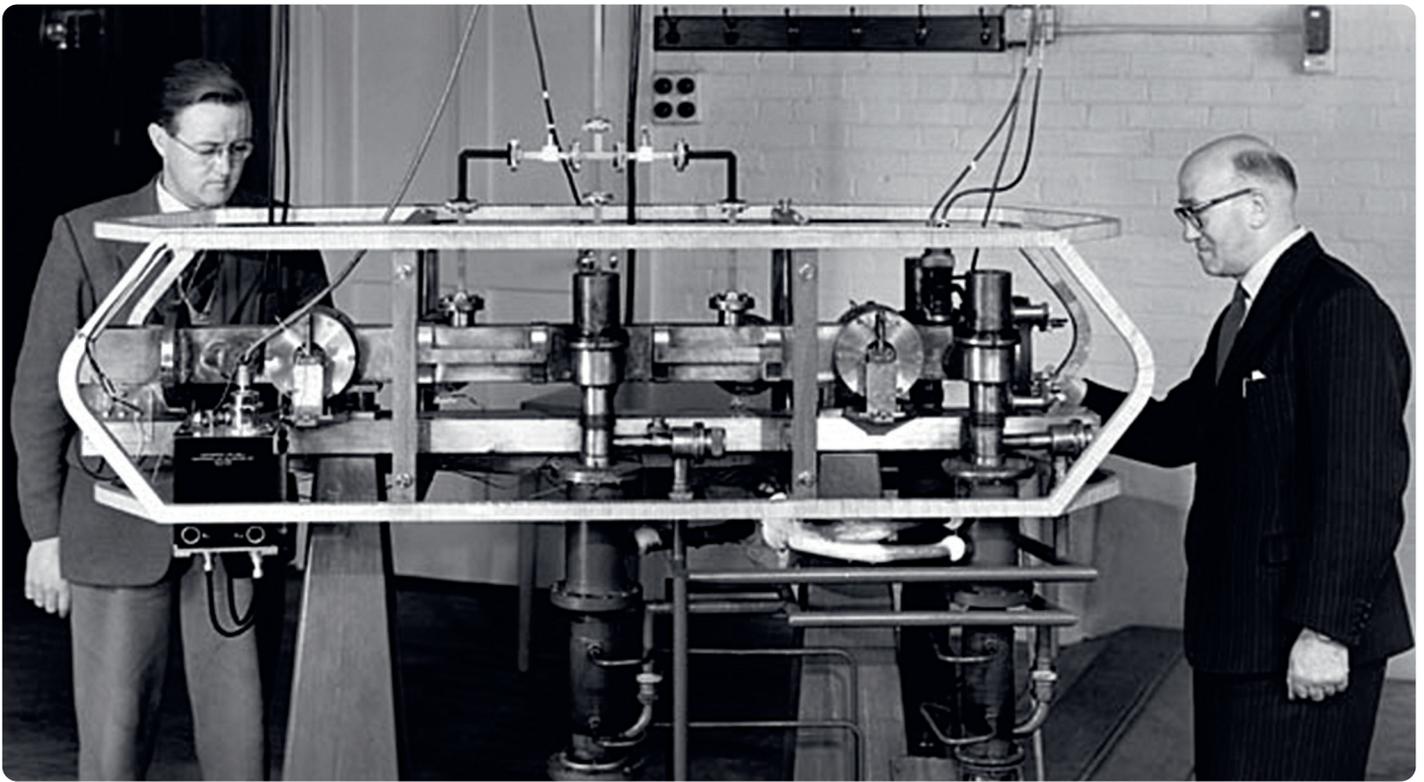
La toute première horloge atomique fut réalisée en 1948 par Lyons au National Bureau of Standards des États-Unis (maintenant National Institute of Standards and Technology, NIST). La référence était une raie d'absorption intense de la molécule d'ammoniaque à 24 GHz environ.

Puis la première horloge atomique à césium fut construite en 1955 par Essen et Parry du National Physical Laboratory (NPL) en Angleterre. Ils mettaient en œuvre les méthodes expérimentales de deux physiciens les ayant précédés, Rabi (à la fin des années 1930) et Ramsey (en 1950).

Les premières horloges commerciales apparurent en 1956, développées par la National Company sous le nom d'Atomichron. Depuis cette date, l'étude et la réalisation d'horloges à césium ont été entreprises dans de nombreux laboratoires à travers le monde comme le Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) en Allemagne, le National Research Council (NRC) au Canada, le United States Naval Observatory (USNO) aux États-Unis et bien sûr le LNE en France.

Jusqu'en 1990 toutes les horloges à césium ont gardé une architecture semblable à celle de Essen et Parry.

Une horloge atomique est donc un appareil qui fabrique une onde électromagnétique de fréquence aussi proche que possible de la fréquence de définition (ici 9 192 631 770 Hz). C'est le changement d'état des atomes de césium (le passage du niveau $F = 3$ au niveau $F = 4$ par exemple) qui va indiquer si l'onde électromagnétique est à la bonne fréquence. Plus précisément il faut quantifier le nombre d'atomes qui va passer d'un état à un autre. Plus ce



La première horloge atomique utilisant le césium, construite en 1955 par Louis Essen et J. V. L. Parry.

Domaine public

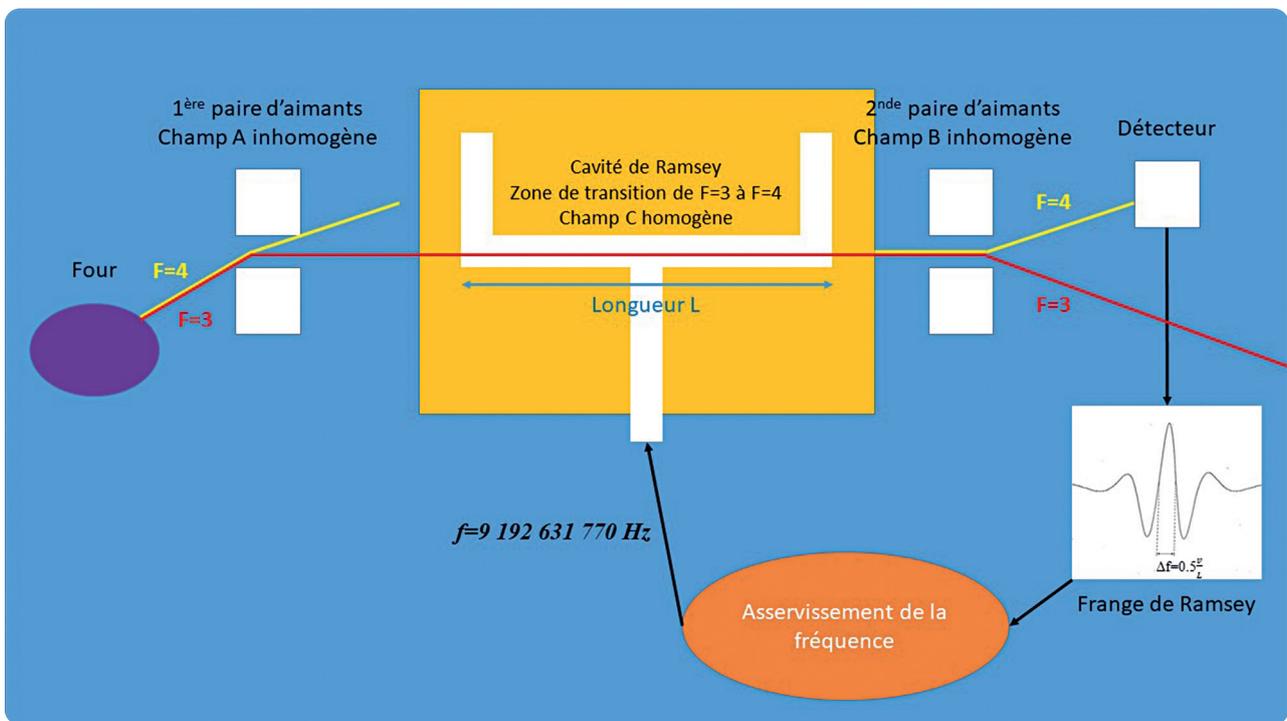
nombre est important et plus la fréquence de l'onde est proche de la fréquence de définition. Il s'agit alors de garder ce nombre à sa plus grande valeur en effectuant des corrections de fréquence qui vont minimiser ses fluctuations. On dit qu'on asservit la fréquence sur la transition du césium. L'électronique se charge de compter 9 192 631 770 oscillations ou périodes de l'onde électromagnétique, ce qui par définition se produit chaque seconde.

Mais les atomes de césium sont à l'état naturel autant dans l'état $F = 3$ que dans l'état $F = 4$ (la différence d'énergie entre ces deux états est très faible). Il faut donc d'abord créer une « différence de population » (avoir tous les atomes dans le même état) afin d'obtenir un signal exploitable.

Pour cela, on crée tout d'abord un jet atomique en vaporisant du césium à une température proche de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ce césium s'échappe via une série de diaphragmes et est donc collimaté le long d'un axe. À cet instant, les atomes sont encore à parts égales dans les états $F = 3$ et $F = 4$.

Dans les horloges atomiques classiques, afin de séparer les atomes pour ne garder que ceux qui sont dans un état donné, on utilise le champ magnétique d'aimants. En effet, les atomes possèdent un moment magnétique (ils se comportent eux-mêmes comme de petits aimants). Et ils se trouvent que les atomes dans l'état $F = 3$ ont un moment magnétique opposé à celui des atomes dans l'état $F = 4$. Ils seront donc déviés différemment en traversant le champ magnétique (inhomogène) créé par l'entrefer des aimants. On crée donc de cette façon une différence de population puisque seuls les atomes dans un état donné, par exemple $F = 3$, vont être utilisés pour subir l'interaction avec une onde électromagnétique.

Cette interaction se produit dans une cavité dite de « Ramsey » (du nom de celui qui l'a proposée en 1950), longue de quelques décimètres dans les horloges commerciales et de quelques mètres dans les horloges de laboratoire (hors fontaines atomiques, voir plus loin). Dans cette cavité, le champ magnétique (qu'on appelle champ C, les champs



Principe d'une horloge atomique à déflexion magnétique.

La longueur de la cavité est L , la vitesse moyenne des atomes de césium est v , le temps de séjour des atomes dans la cavité est donc $T = L/v$. La largeur de la frange de Ramsey (voir texte et figure suivante) est inversement proportionnelle à T . Plus T est grand, plus la frange est fine et meilleure est l'horloge. La fréquence qui est injectée dans la cavité (à la sortie de l'asservissement) est générée à l'aide d'un quartz qui oscille à 5 MHz. Cette fréquence va être modifiée électroniquement (elle subit les quatre opérations arithmétiques élémentaires) pour atteindre les 9,192 631 770 GHz en entrée de la cavité.

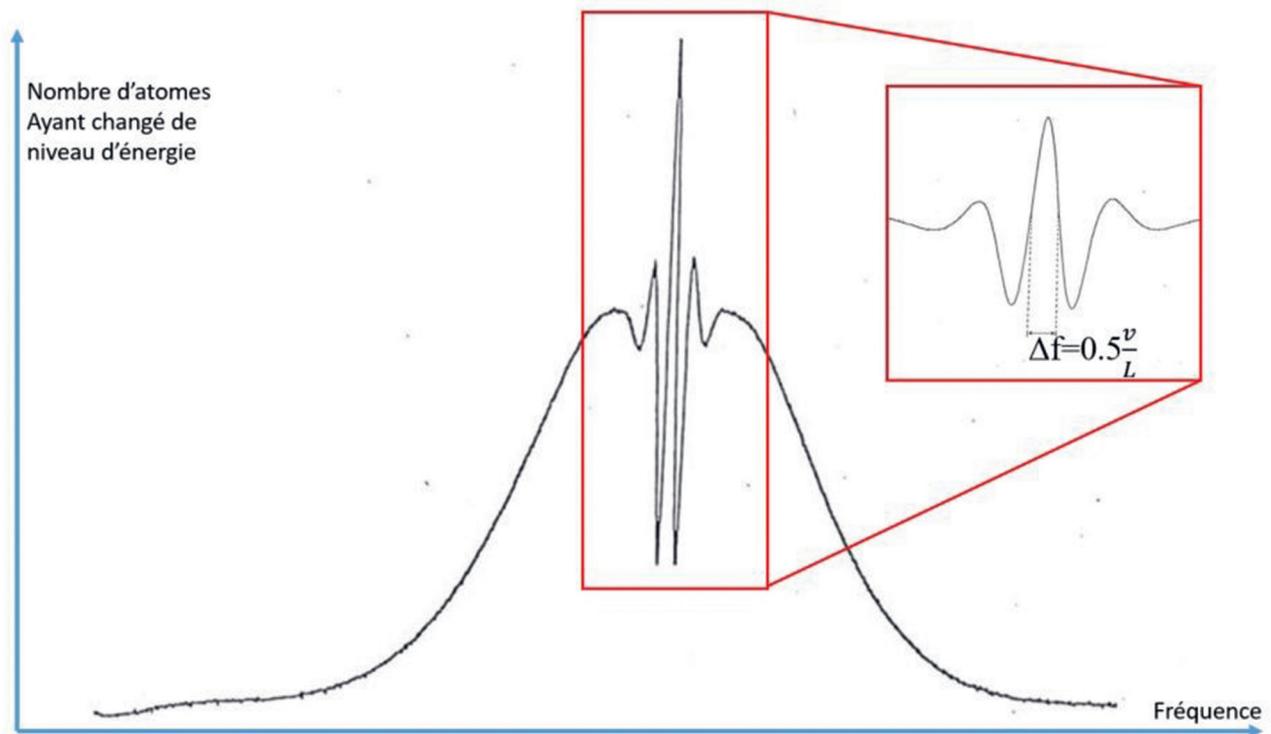
Crédits F. Taris

A et B étant ceux des aimants situés à l'entrée et à la sortie de la cavité) est cette fois constant dans l'espace et dans le temps, car sinon cela aurait des implications sur la structure hyperfine de l'atome de césium. D'ailleurs, cette cavité est isolée par différents blindages magnétiques afin d'atténuer très fortement les champs parasites (terrestre, des appareils électriques proches et même du métro, puisque les horloges de l'Observatoire de Paris sont situées en plein 14^e arrondissement !).

Comme dit précédemment, plus la fréquence de l'onde électromagnétique est proche de la fréquence de définition, plus le nombre d'atomes de césium qui vont changer d'état (de l'état $F = 3$ à l'état $F = 4$) est grand. La figure suivante montre la courbe qui donne la proportion des atomes qui changent d'état en fonction de la fréquence.

Afin de maximiser le nombre d'atomes ayant changé de niveau d'énergie, il faut d'abord pouvoir les détecter. Pour cela un second aimant est utilisé à la sortie de la cavité et, comme précédemment, le jet atomique va être divisé en deux. Les atomes ayant changé d'état sont récupérés sur un détecteur (un fil chaud) qui va ioniser les atomes de césium. Ce faisant, on crée un courant dont l'intensité est proportionnelle au nombre d'atomes ionisés. Et plus cette intensité sera importante et plus la fréquence injectée dans la cavité sera proche de la fréquence de définition de la seconde ! L'asservissement, réalisé électroniquement, consiste donc à maintenir l'intensité du courant maximum.

La première évolution des horloges atomiques classiques telles que décrites ci-dessus consiste à créer une différence de population non plus par déflexion magnétique, mais par « pompage op-



Franges de Ramsey.

L est la longueur de la cavité et v la vitesse moyenne des atomes dans le jet atomique. Plus la largeur de la raie est faible, autrement dit plus le temps de séjour $T = L/v$ des atomes dans la cavité est grand, et meilleure sera l'horloge. La vitesse moyenne des atomes est de l'ordre de quelques centaines de mètres par seconde.

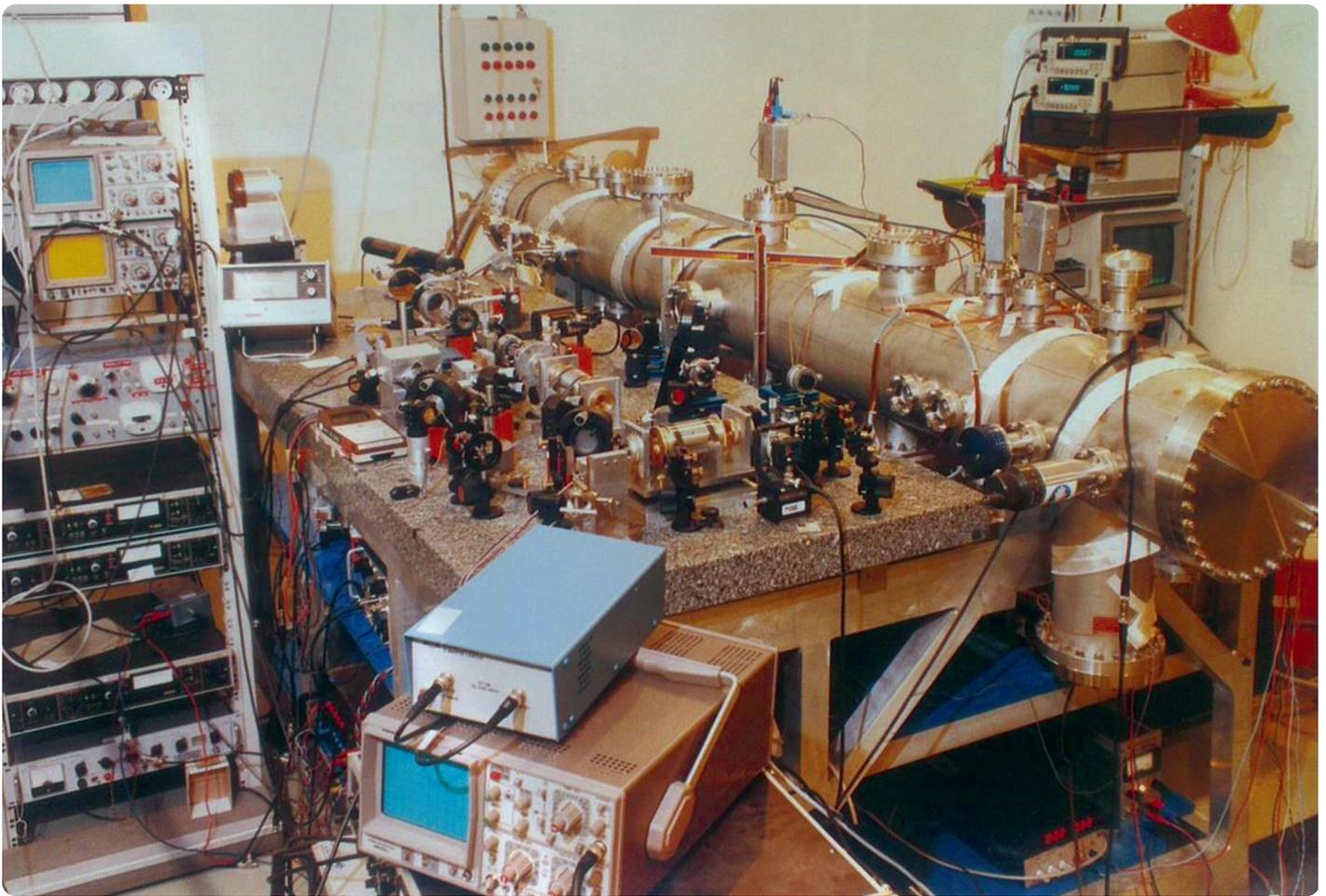
Δf est de l'ordre de quelques centaines de Hz dans une horloge commerciale et de quelques dizaines de Hz dans une horloge de laboratoire.

Crédits F. Taris

tique ». Cette technique a été proposée par Alfred Kastler en 1950 et lui a valu le prix Nobel de physique en 1966. Il s'agit d'éclairer des atomes de césium avec une lumière (laser dans le proche infrarouge à une longueur d'onde $\lambda = 0,85 \mu\text{m}$) dont la fréquence permet le passage des atomes de l'état fondamental à un état excité (le niveau $6P_{3/2}$ de la figure des niveaux d'énergie). On se souvient que l'état fondamental est constitué de deux niveaux hyperfins proches en énergie ($F = 3$ et $F = 4$). La fréquence du laser est telle que seuls les atomes dans l'état $F = 4$ passent dans l'état excité d'où ils vont revenir assez vite par émission spontanée d'un photon (voir plus haut). Cette lumière émise s'appelle la lumière de fluorescence. Les niveaux $F = 3$ et $F = 4$ de l'état fondamental étant proches en énergie, les atomes ont une chance sur deux de tomber dans l'état $F = 3$ et une chance sur deux de tomber dans l'état $F = 4$. Ceux qui sont dans l'état

$F = 3$ y restent et ceux dans l'état $F = 4$, toujours éclairés par la lumière laser, subissent à nouveau le mécanisme précédent. De plus en plus d'atomes se trouvent donc dans l'état $F = 3$ grâce à ce mécanisme de « pompage optique ». Un avantage de cette méthode est de garder tous les atomes dans l'état $F = 3$ avant leur entrée dans la cavité de Ramsey contrairement à la déflection magnétique qui n'en conserve que la moitié. Qui dit plus d'atomes dit plus de signal et qui dit plus de signal dit meilleure stabilité de fréquence (voir plus bas).

La cavité des horloges à pompage optique est identique à celle des horloges à déflection magnétique. La seconde paire d'aimants ainsi que le fil chaud sont remplacés par une détection optique. La fréquence du laser est telle que les atomes vont passer de l'état $F = 4$ au niveau excité déjà utilisé (le niveau $6P_{3/2}$). Ils retombent spontanément sur le



L'étalon primaire de fréquence JPO (Jet à Pompage Optique) dans les années 1990 au Laboratoire primaire du temps et des fréquences (LPTF) de l'Observatoire de Paris.

Crédits F. Taris

fondamental en émettant des photons de fluorescence qui sont recueillis sur une photodiode afin de contrôler la fréquence micro-onde injectée dans la cavité de Ramsey.

Sans entrer dans les détails (champs C plus homogènes, longueurs pas parfaitement identiques des bras de la cavité de Ramsey des horloges classiques...), les horloges à pompage optique ont une meilleure exactitude (voir plus bas) que les horloges à déflexion magnétiques.

Mais c'est dans les années 1990 qu'une véritable révolution a eu lieu avec la mise en fonctionnement opérationnel de la première fontaine atomique à atomes froids (FO1) au Laboratoire primaire du temps et des fréquences (LPTF) du Département d'astronomie fondamentale (DANOF, ancêtre du

SYRTE, lui-même ancêtre du LTE) de l'Observatoire de Paris.

Comme dit précédemment, la qualité d'une horloge dépend de la largeur de la raie de résonance qui elle-même est proportionnelle à l'inverse de la durée d'interaction entre les atomes et l'onde électromagnétique (plus le temps est long, plus la raie est fine et meilleure sera l'horloge). Construire des cavités de Ramsey plus longues que celles qui existent déjà est irréaliste. L'autre solution consiste à ralentir les atomes, en les refroidissant à des températures de l'ordre du μK , afin que l'interaction avec l'onde soit la plus longue possible. Les inventeurs de ces techniques, Steven Chu, William Phillips et le physicien français Claude Cohen-Tannoudji ont été récompensés par le prix Nobel de physique en 1997. Il n'est pas possible de détailler ici le refroidi-

dissement d'atomes par laser, mais les références bibliographiques permettront d'aller plus loin.

L'idée générale est de piéger une « boule d'atomes » grâce à un « piège magnéto-optique ». Six faisceaux laser, disposés par paire selon trois directions orthogonales, assurent le refroidissement Doppler

des atomes, ce qui diminue leur vitesse. Un champ magnétique quadrupolaire permet ensuite de confiner la boule d'atomes au centre du piège.

Le nuage atomique est ensuite lancé à une vitesse de quelques m/s. Au cours de leur vol parabolique, en raison de la gravité, les atomes traversent à deux

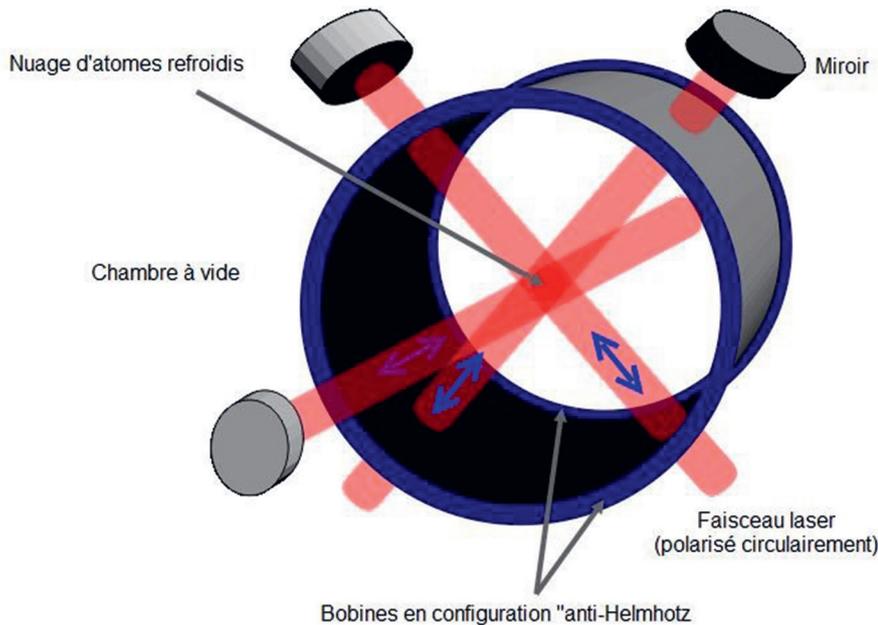


Schéma d'un piège magnéto-optique.

Les six faisceaux laser disposés par paire selon trois directions orthogonales sont représentés en rouge. Les bobines de Helmholtz utilisées en configuration inverse génèrent le champ quadrupolaire (cf. bibliographie).

Domaine public

reprises le même résonateur micro-ondes, la première fois à la montée et la seconde fois à la descente, subissant ainsi une interrogation de Ramsey (les deux extrémités de la cavité dans une horloge classique). La fluorescence induite, collectée vers une photodiode, est proportionnelle au nombre d'atomes dans l'état $F = 4$. Le temps d'interrogation atteint 0,5 s, soit une frange d'1 Hz de large, ce qui est grossièrement 100 fois plus faible qu'avec une horloge à jet thermique.

L'instabilité de fréquence relative des fontaines atomiques est environ d'un ordre de grandeur meilleure que celle des césiums primaires à pompage optique, cette dernière étant aussi environ d'un

ordre de grandeur meilleure que celle des césiums primaires à déflexion magnétique.

Mais il existe encore une solution permettant d'augmenter le temps de séjour des atomes dans la cavité de Ramsey. C'est la dernière innovation concernant les horloges à césium qui consiste à placer une fontaine à atomes froids en absence de gravité. On peut alors obtenir des temps d'interaction dans la cavité plus grands que sur Terre, la cavité ayant alors une taille très raisonnable ($\sim 0,5$ m), la vitesse des atomes étant de l'ordre de quelques cm/s. Une telle horloge a été récemment lancée dans l'espace, c'est le projet ACES-PHARAO qui a fait l'objet d'un article dans la lettre d'information de mars 2025

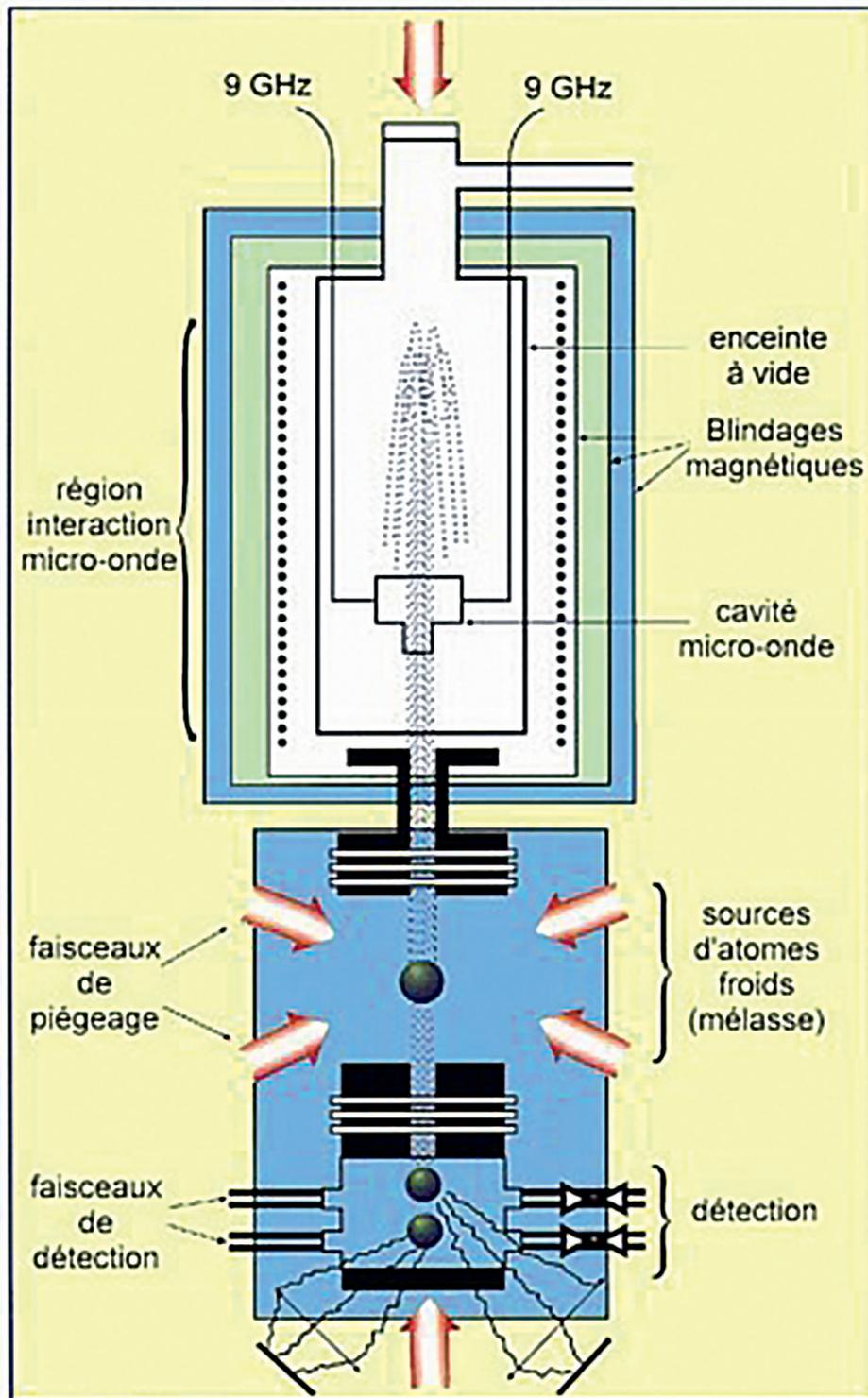
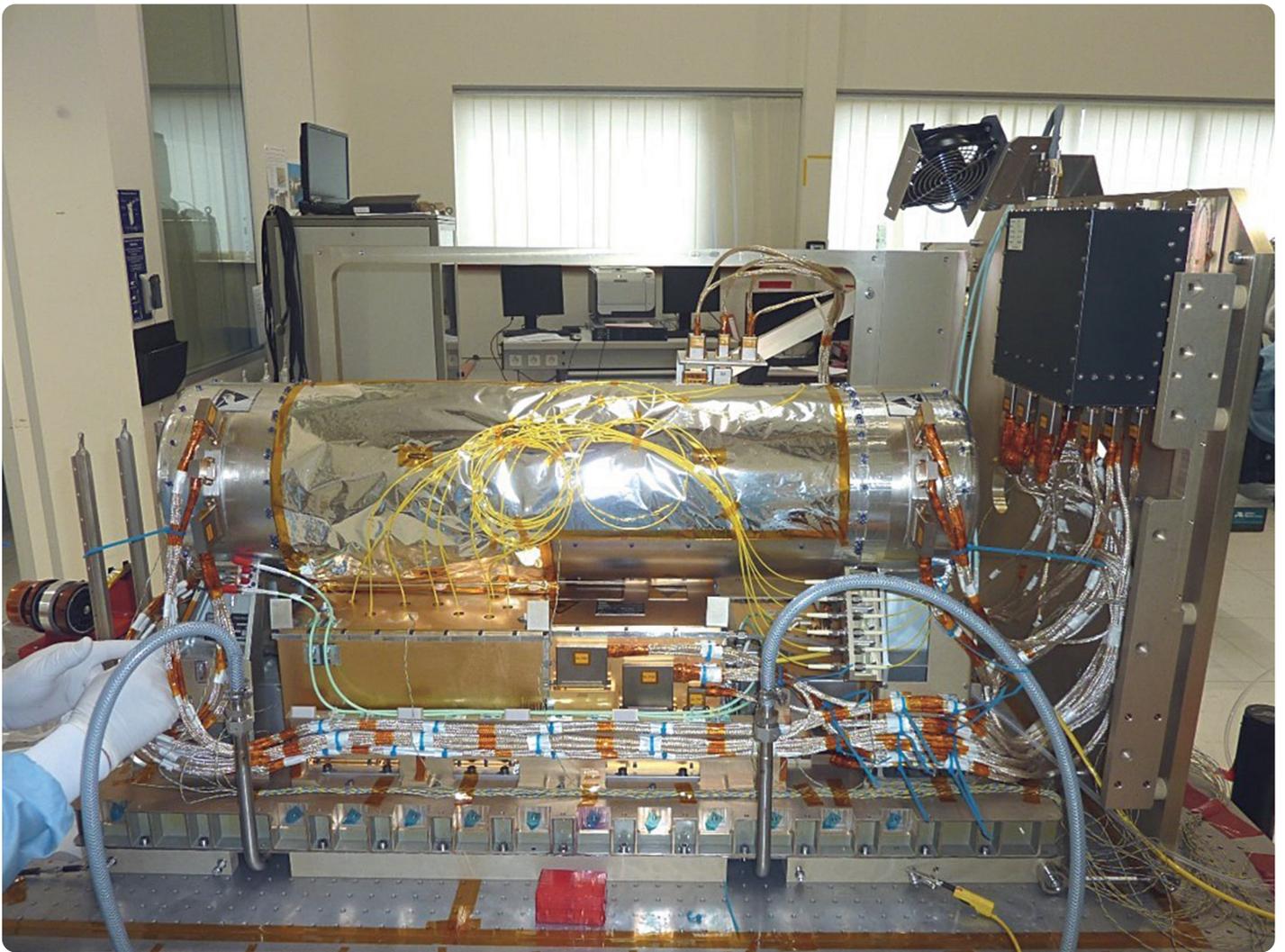


Schéma de la fontaine atomique FO1.

Crédits SYRTE

(n°221 : <https://www.imcce.fr/lettre-information/archives/221#science-article1>). L'exactitude attendue est de l'ordre de 10^{-16} , ce qui correspond à une différence de 1 s en 300 millions d'années par rapport à une horloge qui réaliserait parfaitement la définition de la seconde. Cette horloge a été

développée pendant près de 20 ans par le LTE, le Laboratoire Kastler Brossel (LKB), des industriels (Sodern, Thales) et le Centre national d'études spatiales (CNES). Cette horloge est associée à un maser actif à hydrogène.



Modèle de vol PHARAO.

Crédits Observatoire de Paris

Les autres atomes

Comme vu plus haut, l'ammoniac a été employé dès 1948 par Lyons. Les premiers travaux sur l'hydrogène datent quant à eux de 1950 à l'université de Harvard (Ramsey). Ils conduiront à la réalisation des premiers masers (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) à hydrogène dans les années 1960.

Toujours à la fin des années 1950, les premiers travaux sur les métaux alcalins ont été réalisés et aboutiront au début des années 1960 aux premières réalisations industrielles des horloges à cellule de rubidium. Le rubidium 87 sera également utilisé au milieu des années 2000 dans une fontaine ato-

mique double (FO2) au SYRTE, utilisant à la fois des atomes de rubidium et de césium. En plus de sa participation à la réalisation du temps atomique international, FO2 permet divers tests de physique comme la recherche d'une *variation de la constante de structure fine α* , la mesure absolue de la fréquence hyperfine du rubidium, la mesure absolue de la fréquence optique du strontium.

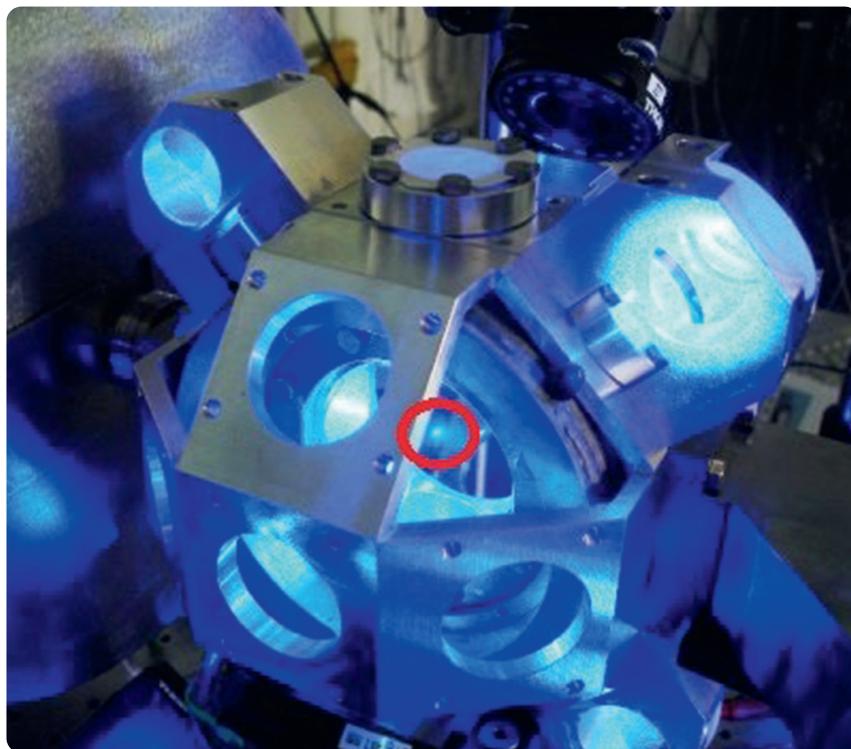
La technologie des horloges à césium, qui elle aussi, comme on l'a vu, date des années 1950, a probablement atteint des limites, fondamentales plus que techniques, en termes de stabilité et d'exactitude. De nos jours, beaucoup d'autres atomes sont utilisés pour réaliser des horloges atomiques de laboratoire.

Les résultats les plus impressionnants sont actuellement obtenus par des horloges optiques.

C'est dans le courant des années 2000 que les premières horloges optiques sont apparues. La transition d'horloge s'effectue dans le domaine optique (et non plus micro-onde), ce qui permet de gagner deux ordres de grandeur par rapport aux meilleures horloges à césium. Avant l'avènement des horloges atomiques et des lasers, la mesure du temps s'effectuait avec une exactitude de $10^{-8}/10^{-9}$. Aujourd'hui, les horloges optiques montrent une exactitude de 10^{-18} . C'est-à-dire que les horloges optiques ont permis de gagner neuf à dix ordres de grandeur dans la mesure du temps ! Cela conduit à une déviation de 1 s sur l'âge de l'Univers par rapport au temps parfait de la physique ! Remarquons encore que « seulement » cinq ou six ordres de grandeur ont été gagnés pendant les six siècles précédents, la mesure du temps déviant d'un quart d'heure par jour (le foliot au XIV^e siècle, [épisode IV de cette histoire de la mesure du temps](#)) à une centaine de mi-

crosecondes par jour (pour les meilleures horloges à quartz) !

Les horloges optiques se divisent en deux catégories : les horloges à ions et les horloges à atomes neutres. Alors que l'amélioration des horloges à césium est principalement due au refroidissement des atomes, celle des horloges optiques est principalement due à la technique du « peigne de fréquence ». Les peignes de fréquences sont des lasers très particuliers dont les impulsions ultra-courtes ont une durée de l'ordre de quelques femtosecondes à quelques centaines de femtosecondes ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$, les lasers femtoseconde sont aussi employés, par exemple, dans la chirurgie de l'œil). Leur spectre est constitué de raies espacées régulièrement en fréquence. Ils peuvent mesurer des fréquences dans le domaine optique de façon simple (ce que ne permet pas l'électronique) comme les graduations d'un double décimètre permettent de mesurer une longueur. Leur invention a été récompensée par le prix Nobel de



L'horloge optique à strontium du LTE montre à l'heure actuelle une stabilité de $7,10^{-16}$ à 1 seconde, et une exactitude de 2×10^{-17} . On observe la fluorescence des atomes de strontium piégés (à l'intérieur du cercle rouge au centre de l'image).

Crédits LTE

physique 2005, attribué à John Hall (né en 1934) et Theodor Hänsch (né en 1941).

Un grand nombre d'atomes ou d'ions sont utilisés dans le monde pour réaliser les horloges optiques, l'hydrogène (H), le calcium (Ca), le mercure (Hg⁺), l'aluminium (Al⁺), le strontium (Sr et Sr⁺), l'ytterbium (Yb et Yb⁺) ...

Les techniques utilisées dans ces nouvelles horloges sortent du cadre de cet épisode de l'histoire de la mesure du temps. La bibliographie et les liens Internet permettront aux lecteurs intéressés d'aller plus loin dans la compréhension de ces instruments.

Le fait que l'on puisse maintenant mesurer le temps à 1 seconde près sur la durée de l'âge de l'Univers a des implications innombrables et importantes.

Il est en particulier très probable qu'une redéfinition de la seconde du Système international d'unité (SI) soit effectuée dans un futur proche, des travaux dans ce sens étant déjà en cours.

Ces horloges permettront également des tests de la théorie de la relativité ainsi que, comme dit plus haut, des tests concernant une éventuelle variation des constantes fondamentales.

La relativité nous apprend que le temps d'une horloge est dépendant de l'intensité du champ de gravitation dans lequel elle se trouve. Le niveau de précision atteint par les horloges optiques permet maintenant de mesurer un décalage gravitationnel correspondant à une différence de hauteur sur le géoïde de 1 cm !

Ces horloges pourront également être utilisées pour mettre au point de nouveaux systèmes de géolocalisation et de navigation par système de satellites (GNSS ou *Global Navigation Satellite System*) ou améliorer les systèmes déjà existants (GPS, GLO-NASS, Galileo, Beidou).

Vocabulaire de métrologie. Notion de stabilité et d'exactitude

L'incertitude de mesure est un paramètre (non négatif) qui caractérise la dispersion des valeurs attribuées à la grandeur que l'on veut mesurer (qu'on appelle mesurande). L'incertitude comprend une composante de type A, évaluée par une analyse statistique des valeurs mesurées, ces dernières étant obtenues dans des conditions définies de mesurage, et une composante de type B, évaluée par d'autres moyens (certificat d'étalonnage, limites déduites de l'expérience ...)

L'exactitude représente l'étroitesse de l'accord entre une valeur mesurée et une valeur vraie d'un mesurande. On l'exprime souvent en valeur relative. Par exemple une exactitude de 10^{-13} correspond à une incertitude de $9\,192\,631\,770 \times 10^{-13}$, c'est-à-dire 0,0009 Hz.

La stabilité est la propriété d'un instrument de mesure selon laquelle celui-ci conserve ses propriétés métrologiques constantes au cours du temps. En métrologie temps/fréquence, la stabilité est quantifiée par la (les) variance(s) d'Allan.

Pour plus de détails, on pourra consulter le vocabulaire international de métrologie : https://www.bipm.org/documents/20126/41373499/JCGM_200_2012.pdf/f0e1ad45-d337-bbeb-53a6-15fe649d0ff1. ■

Bibliographie

- M. Abgrall, *Évaluation des performances de la fontaine atomique PHARAO, Participation à l'étude de l'horloge spatiale PHARAO*, thèse de l'université Paris 6, 2003.
- C. Audoin & B. Guinot, *Les Fondements de la mesure du temps*, Masson, 1998.
- X. Baillard, *Horloge à réseau optique à atomes de Strontium*, thèse de doctorat de l'université Paris 6, 2008.
- A. Bauch, « The PTB Primary Clocks CS1 and CS2 », *Metrologia*, 42, S43, 2005.
- F. Chapelet, *Fontaine atomique double de césium et de rubidium avec une exactitude de quelques 10^{-16} et applications*, thèse de l'université Paris 11, 2008
- A. Clairon *et al.*, « A Cesium Fountain Frequency Standard: Preliminary Results », *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, avril 1995, vol. 44, iss. 2.
- J. Dai, « Review of the Development of the Hydrogen Maser Technique and a Brief Introduction to its Space Applications », *Frontiers in physics*, 10:995361, <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.995361>.
- E. De Clercq, « Note technique à diffusion interne au laboratoire SYRTE ».
- M. Lombardi, « A Historical Review of U.S. Contributions to the Atomic Redefinition of the SI Second in 1967 », *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2017, vol. 122, art. n° 29, <https://doi.org/10.6028/jres.122.029>.
- W. J. Riley, A History of the Rubidium Frequency Standard, <https://ieee-uffc.org/presentation/history-rubidium-frequency-standard#description>.
- R. Vessot, Hydrogen maser frequency standard, <https://ntrs.nasa.gov/citations/19800020315>.

Liens Internet

Cours du collège de France, Serge Haroche, « Cinquante ans de révolutions en physique atomique et en optique quantique ». Voir en particulier « La passion de la précision et la mesure du temps » : <https://www.college-de-france.fr/fr/agenda/cours/cinquante-ans-de-revolutions-en-physique-atomique-et-en-optique-quantique/la-passion-de-la-precision-et-la-mesure-du-temps>

Sur les horloges atomiques en général : <https://first-tf.fr/recherche-valorisation/science-technologie/horloges-atomiques/>

A Brief History of Atomic Clocks at NIST : <https://tf.nist.gov/cesium/atomichistory.htm>

Sur les fontaines à atomes froids : <https://first-tf.fr/recherche-valorisation/science-technologie/horloges-atomiques/fontaines-a-atomes-froids/>

Sur le césium : <https://fr.wikipedia.org/wiki/C%C3%A9sium>

Sur le refroidissement laser :

https://pro.college-de-france.fr/jean.dalibard/publi2/larecherche_94.pdf

<https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2010/04/refdp201021p46.pdf>

Sur les bobines de Helmholtz : https://fr.wikipedia.org/wiki/Bobines_de_Helmholtz

Sur PHARAO :

<https://cnes.fr/projets/pharao>

<https://www.lkb.fr/en/aces-pharao-space-mission/>

<https://www.imcce.fr/lettre-information/archives/221#science-article1>

Sur les horloges optiques : <https://syrtel.obspm.fr/spip/science/fop/experiences/article/horloges-optique-a-atomes-froids-de-strontium>

Sur les peignes de fréquence : http://www.lptms.universite-paris-saclay.fr/nicolas_pavloff/files/2019/11/Peignes_frequences_Laser.pdf

Sur les variances d'Allan : https://indico.in2p3.fr/event/31598/attachments/81883/120823/2006AllanVar.pdf&ved=2ahUKEwimq8_shOyPAxUnVqQEHSJgB7EQFnoECBkQAQ&usg=AOvVaw2w9dYthNhkdVcfCfZYuQGD