

LES HORLOGES ATOMIQUES

Thierry Bastin

Abstract

In this paper, a short review of the basic physical mechanisms underlying the atomic clocks is given. We cover the standard cesium atomic clocks along with the new generation of cold atom clocks.

Introduction

La mesure du temps est vieille comme l'humanité. Pour diverses raisons liées à ses préoccupations du moment, l'homme s'est toujours attaché à déterminer le temps qui passe. Si les premières méthodes de mesure étaient assez approximatives, les procédés se sont affinés au fil du temps et on est actuellement capable de produire la seconde à 10^{-15} près (c'est-à-dire à un millionième de milliardième près). Ceci signifie, pour une horloge, une dérive d'une seconde tous les 30 millions d'années. De telles performances sont obtenues par des horloges dites *atomiques*.

On pourrait naïvement se poser la question de savoir si l'on a réellement besoin de tant de précision. Il y a plutôt lieu de s'interroger sur les recherches et technologies auxquelles cette précision donne accès. En recherche fondamentale, la détermination précise du temps (et corollairement de la fréquence, l'inverse du temps) permet de contribuer à une connaissance de plus en plus fine des multiples propriétés des atomes et des molécules. Les constantes physiques qui peuvent être déterminées par la seule mesure de fréquences de phénomènes physiques deviennent accessibles avec des précisions accrues. Enfin, la plupart des tests des modèles de structure de l'espace-temps et de la gravitation font intervenir la mesure du temps. Plusieurs expériences de transport d'horloges ont par exemple été organisées pour vérifier les prédictions de la relativité générale.

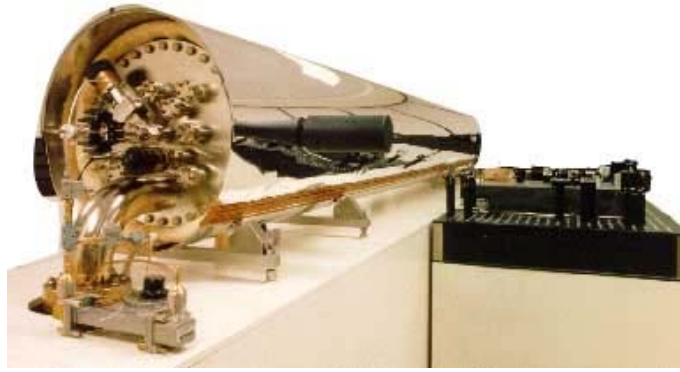


Fig. 1 : Horloge atomique de référence aux Etats-Unis (horloge NIST-7 située au NIST).

Au niveau des technologies, le système de positionnement par satellite (GPS) constitue aujourd'hui incontestablement une des applications les plus spectaculaires des horloges atomiques. Sans elles, point de GPS et finies toutes les applications qui en découlent et dont certaines ont un impact direct sur notre quotidien. En effet, ce système de positionnement est basé sur les signaux envoyés par 24 satellites en orbite quasi circulaire à une altitude de l'ordre de 20.000 km. Chacun de ces satellites se compose de plusieurs horloges atomiques qui permettent d'y maintenir une échelle de temps stable et précise. Un récepteur terrestre (installé par exemple dans une voiture) qui perçoit les signaux de plusieurs de ces satellites est capable de déterminer sa position sur la surface du globe s'il connaît les temps mis par ces signaux pour lui parvenir. Toute imprécision sur la connaissance de ces temps se répercute immédiatement sur la précision avec laquelle la position du récepteur est déterminée. Les signaux émis étant de nature électromagnétique, ils se propagent des satellites vers le récepteur à la vitesse de la lumière, soit, pour être précis, à 299792,458 km/s dans le vide¹. Il résulte ainsi d'une seule imprécision d'une nanoseconde (10^{-9} s) sur le temps de parcours des signaux une imprécision sur la détermination de la position du récepteur au sol de l'ordre de 30 cm. Les télécommunications sont un autre exemple de technologie où la détermination précise du temps est importante. La rapidité des « autoroutes de l'information » est ainsi directement liée à la précision avec laquelle le temps est échantillonné dans les signaux de transmission.

Dans cet exposé, nous décrivons les principes physiques sous-jacents au fonctionnement d'une horloge atomique. Il en existe divers modèles, mais toutes sont basées sur le même principe : *la fréquence de battement d'une horloge traditionnelle est asservie sur une fréquence caractéristique d'un système atomique. Cette fréquence est inaltérable dans le temps et confère au système une stabilité exceptionnelle.* Précisons

¹ Il s'agit d'une valeur exacte car, par *définition*, le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de $1/299792458^e$ de seconde (17^{ème} Conférence Générale des Poids et Mesures, 1983).

d'emblée que ces horloges, si elles sont certes affublées du qualificatif d'atomique, ne partagent en rien les connotations négatives parfois associées à ce qualificatif. Elles ne sont pas radioactives, elles ne génèrent pas de déchets radioactifs comme le font les centrales nucléaires, et elles n'explosent pas (rien en commun avec une bombe atomique). Ces horloges sont dites atomiques tout simplement parce qu'elles sont basées sur les propriétés *individuelles* des constituants élémentaires de la matière, à savoir les atomes. Elles sont parfaitement inoffensives et, si elles n'étaient quelque peu volumineuses, on pourrait les porter à son bracelet sans risque aucun. La figure 1 illustre l'horloge atomique de référence aux Etats-Unis. Celle-ci est située au NIST (National Institute of Standards and Technology, Colorado). Il s'agit d'une horloge à jet de césium.

Horloges à jet de césium

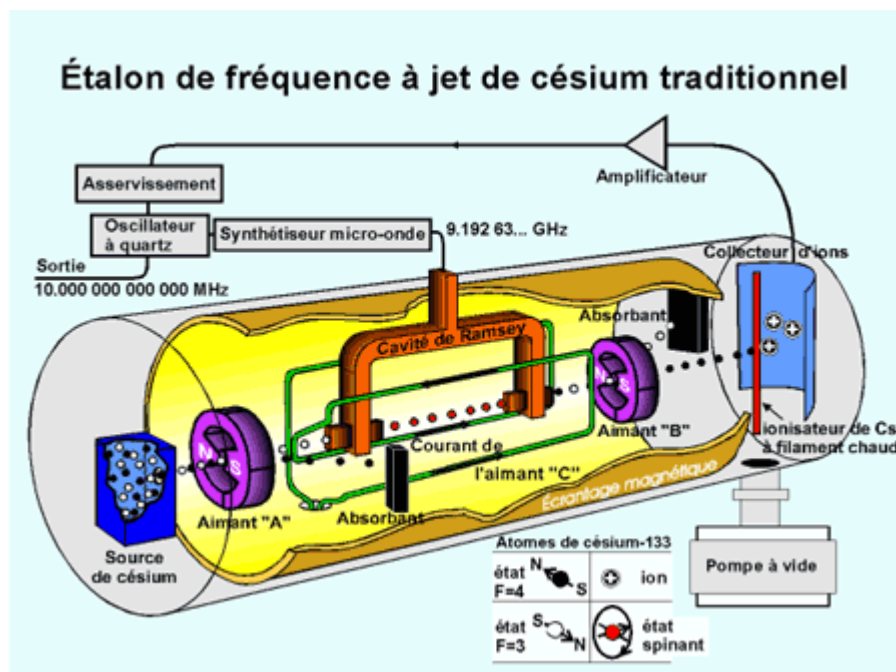


Fig. 2 : Schéma de principe d'une horloge atomique à jet de césium (figure tirée du site web de l'institut canadien des étalons nationaux de mesure, http://inms-ienm.nrc-cnrc.gc.ca/time_services/faq_f.html)

Les horloges atomiques les plus courantes sont des horloges à *jet de césium* qui utilisent les propriétés de l'atome de césium 133 (unique isotope non radioactif de cet atome). Un schéma de principe d'une telle horloge est illustré sur la figure 2. Les constituants principaux sont l'oscillateur à quartz, la source de césium pour produire un jet unidirectionnel d'atomes de césium, la cavité de Ramsey et le système d'asservissement. Nous détaillons dans ce qui suit le rôle de chacun de ces constituants.

L'oscillateur à quartz

L'oscillateur à quartz est une horloge à quartz traditionnelle. Le principe de fonctionnement est très simple. D'une part, le quartz a la particularité de générer des charges électriques à sa surface lorsqu'on exerce sur lui des forces mécaniques (et vice-versa) : c'est l'effet piézo-électrique. D'autre part, un cristal de quartz soumis à un choc engendre, comme tout cristal, des vibrations mécaniques, d'amplitude maximale selon des directions particulières (axes mécaniques) et avec une fréquence propre au quartz lui-même. Il résulte de ces 2 phénomènes qu'un choc sur un cristal de quartz engendre à sa surface l'apparition de charges électriques oscillantes. Dans un circuit électronique adapté, ces oscillations peuvent être entretenues et leur fréquence peut même être légèrement modifiée. On obtient de la sorte un oscillateur électrique à une fréquence très stable pourvu que le cristal conserve ses dimensions au cours du temps. C'est le cas si le cristal est bien isolé contre les variations de température responsables des phénomènes de dilatation. Tout phénomène périodique est l'ingrédient de base d'une horloge. Il suffit de compter le nombre d'oscillations électriques du quartz et d'égrener les secondes chaque fois que ce nombre atteint une certaine valeur, caractéristique du cristal de quartz employé. Typiquement, pour des montres-bracelet à quartz, les fréquences d'oscillations sont de l'ordre de la trentaine de MHz (30 millions d'oscillations par seconde).

La première horloge à quartz date de 1930. Utilisant des tubes électroniques elle avait des dimensions comparables à celles d'un réfrigérateur. Avec l'apparition de l'électronique, la miniaturisation a rendu possible l'apparition de la première montre-bracelet à quartz en 1970. La précision obtenue est beaucoup plus grande que celle de la meilleure des montres mécaniques.

Le principal défaut d'un oscillateur à quartz est son manque de stabilité à long terme. Au fil du temps, les propriétés mécaniques du cristal s'altèrent et la fréquence des oscillations se met à varier. L'horloge n'égrene plus les secondes correctement et finit par retarder ou avancer selon que la fréquence diminue ou augmente. Dans une horloge à quartz traditionnelle, ces variations de fréquence ne sont pas détectées et l'horloge dérive sans que l'on puisse s'en rendre compte sans la comparer à une autre horloge qui indiquerait l'heure juste. C'est à ce niveau que se situe l'apport des horloges atomiques. Par un dispositif approprié qui fait appel à des atomes individuels, il est possible de détecter *en temps réel* toutes les variations de la fréquence d'oscillation du quartz et d'y pallier en agissant sur les paramètres du circuit électronique qui contrôle ces oscillations.

Dans une horloge atomique à jet de césium, l'oscillateur à quartz est couplé à un synthétiseur micro-ondes (voir figure 2). Ce dernier génère dans une cavité métallique, dite *cavité de Ramsey*, un rayonnement électromagnétique micro-onde, de fréquence *proportionnelle* à la fréquence de l'oscillateur à quartz. Toute variation, fût-elle infime,

dans la fréquence d'oscillation du cristal de quartz se répercute immédiatement sur la fréquence du rayonnement micro-onde synthétisé dans la cavité de Ramsey. Les atomes, comme nous le décrivons ci-dessous, sont extrêmement sensibles au rayonnement électromagnétique qui les illumine. En faisant passer des atomes donnés dans la cavité de Ramsey, leur comportement varie selon la fréquence du rayonnement qui y règne. En détectant ce comportement, il devient possible de savoir si la fréquence d'oscillation du quartz est en train de varier ou non et de corriger ces variations dans le bon sens. Voici, grossièrement brossé, le principe de base de l'horloge atomique. Bien entendu, il existe une limite inférieure en deçà de laquelle les variations ne sont plus détectées. Cette limite fixe la précision de l'horloge atomique qui n'est évidemment pas arbitrairement élevée.

Tous les atomes d'une même espèce étant identiques les uns aux autres (rien ne ressemble plus à un atome de césium par exemple qu'un ... autre atome de césium), ceci garantit de construire des ensembles d'horloges atomiques qui oscillent toutes rigoureusement à la même fréquence, à la précision de l'horloge près.

Les atomes et le rayonnement électromagnétique. La cavité de Ramsey

Les atomes sont des entités qui émettent ou absorbent du rayonnement électromagnétique. Cette propriété est extrêmement sélective en la fréquence du rayonnement. Une expérience toute simple permet de s'en rendre compte. Elle est illustrée sur la figure 3. La composition en fréquences (c'est-à-dire en couleurs) d'une lumière blanche est analysée au moyen d'un prisme. Lorsque cette lumière est directement envoyée sur le prisme, toutes les couleurs de l'arc-en-ciel constitutives de la lumière blanche sont obtenues au-delà du prisme. Lorsque par contre cette lumière traverse préalablement une vapeur atomique (une vapeur dont les particules constitutives sont des atomes et non des molécules – une vapeur de césium par exemple), certaines fréquences bien déterminées sont absorbées (raies sombres dans l'arc-en-ciel). Ceci démontre directement que seules certaines fréquences du rayonnement électromagnétique sont absorbées par les atomes. Ces fréquences, caractéristiques de l'espèce atomique, sont loin de se cantonner au domaine de la lumière visible. Les rayonnements X, ultraviolets, infrarouges, micro-ondes et radio sont pareillement absorbés sélectivement par les atomes.

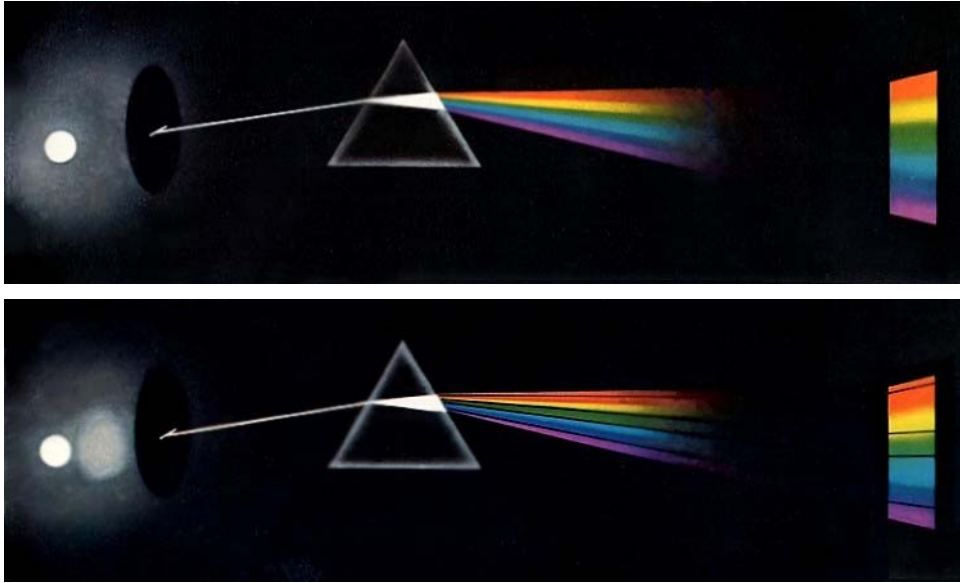


Fig. 3 : Absorption sélective de lumière blanche par une vapeur atomique.

Les atomes sont constitués d'un noyau et d'un ensemble d'électrons en mouvement autour du noyau. Ces mouvements sont contenus dans des dimensions de l'ordre du dixième de nanomètre (1 nanomètre = 1 milliardième de mètre). Les électrons sont des charges électriques négatives qui possèdent également des propriétés magnétiques. Ils se comportent comme de petits aimants avec un pôle Nord et un pôle Sud, ce que l'on appelle le *moment magnétique de spin* de l'électron. Pour des atomes à plusieurs électrons, ces petits aimants s'orientent d'une manière bien définie et peuvent conférer à l'atome électriquement neutre au global une aimantation bien déterminée (le *moment magnétique de l'atome*).

Lorsqu'un atome absorbe ou émet du rayonnement, l'état de mouvement des électrons est affecté et l'atome est dit se trouver dans un autre état qu'initialement. Selon la fréquence du rayonnement avec lequel l'atome interagit, on porte l'atome dans tel ou tel état. L'interaction d'un atome avec du rayonnement est ainsi un moyen efficace pour changer *sélectivement* l'état de l'atome. On dit que l'atome effectue une transition entre 2 de ses états. Cette propriété est optimale pour certaines fréquences ν_i bien déterminées. Les physiciens, et plus précisément les spectroscopistes, donnent un nom à chacun des états possibles des atomes. Dans une vapeur atomique à une température donnée, tous les atomes ne se trouvent pas dans le même état. Dans le cas particulier des atomes de césium, ils sont soit dans l'état dénommé « F=3 », soit dans l'état « F=4 »². On fait passer ces atomes d'un

² Il s'agit, pour être précis, des 2 états hyperfins du niveau fondamental $6s\ ^2S_{1/2}$ de l'atome de césium.

état à l'autre en les éclairant avec du rayonnement électromagnétique à la fréquence de $9.192.631.770 \text{ Hz}^3$.

La théorie quantique permet de prédire en tout instant la *probabilité* que l'atome se trouve dans tel ou tel état. Si un atome est initialement dans un état 1 et qu'il interagit avec du rayonnement monochromatique à la fréquence ν_0 adéquate pour le porter dans un état 2, la probabilité de trouver l'atome dans l'état 2 au cours du temps est illustrée sur la figure 4(a). Cette probabilité oscille entre 0 et 1 suivant une période τ . Lorsqu'elle est égale à 1 (en $t = \tau/2, 3\tau/2, \dots$), l'atome se trouve avec certitude dans l'état 2. Ces oscillations portent le nom d'*oscillations de Rabi*, du nom du physicien qui décrit ce phénomène et qui en obtint le prix Nobel en 1944.

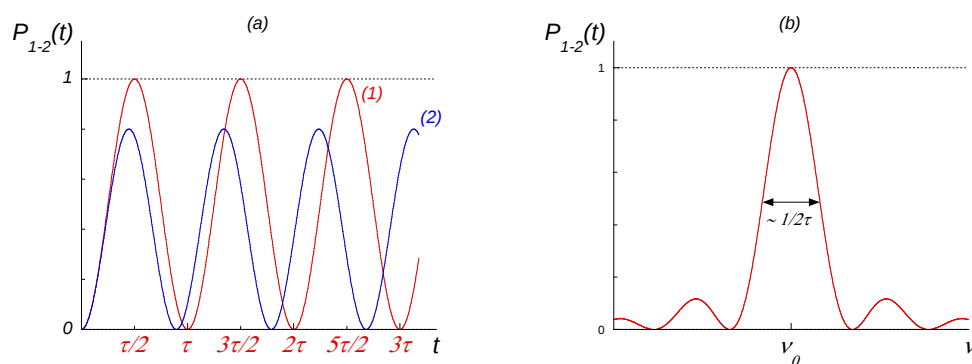


Fig. 4 : (a) Probabilité de trouver l'atome dans un état 2 en fonction du temps lorsque, initialement dans un état 1, il interagit avec du rayonnement électromagnétique (1) à la fréquence adéquate ν_0 , (2) à une fréquence $\nu \neq \nu_0$. (b) Cette même probabilité en fonction de la fréquence du rayonnement lorsque l'atome interagit pendant un temps $\tau/2$.

Si la fréquence du rayonnement qui « éclaire » l'atome est légèrement modifiée par rapport à la fréquence idéale ν_0 , l'atome peut encore évoluer de l'état 1 vers l'état 2, mais avec une efficacité moindre (voir figure 4(a)). Pour des atomes interagissant pendant une durée $\tau/2$ avec le rayonnement, la figure 4(b) illustre la probabilité de trouver ces atomes dans l'état 2 en fonction de la fréquence du rayonnement au voisinage de la fréquence idéale ν_0 . Cette probabilité décroît rapidement si la fréquence du rayonnement s'écarte de ν_0 (la largeur à mi-hauteur de la courbe est de l'ordre de $1/2\tau$). Ceci révèle que le comportement des atomes est extrêmement sensible à la fréquence du rayonnement qui les éclaire. Cette propriété rend les atomes des entités capables en quelque sorte de « mesurer »

³ Il s'agit d'une valeur exacte (sans aucune incertitude) car, par définition, la seconde (l'inverse du hertz) est précisément la durée de $9.192.631.770$ périodes de la radiation correspondant à la transition entre les 2 états « F=3 » et « F=4 » du césium 133 (13^e Conférence Générale des Poids et Mesures, 1967).

la fréquence du rayonnement. En effet, en faisant passer N atomes, initialement dans un état 1, dans une région de l'espace où règne un champ électromagnétique de fréquence proche de ν_0 , le nombre d'atomes que l'on trouvera dans l'état 2 au sortir de cette région est donné par $N p_{1 \rightarrow 2}(\nu)$. Si N est connu, on en déduit immédiatement $p_{1 \rightarrow 2}(\nu)$ et par voie de conséquence la fréquence ν elle-même.

C'est ce procédé qui est utilisé dans une horloge atomique à jet de césium. Des atomes de césium dans l'état « F=3 » sont envoyés dans une région de l'espace (cavité de Ramsey) où règne un champ électromagnétique dont la fréquence est déterminée par la fréquence d'oscillation de l'horloge à quartz en amont. Au sortir de cette région, on mesure le nombre d'atomes ayant effectué une transition vers l'état « F=4 » et on en déduit si la fréquence dans la cavité est optimale ou non. Dans le cas contraire, un système d'asservissement agit sur la fréquence du quartz de manière à corriger les éventuels écarts en fréquence.

Plus le temps τ d'interaction des atomes dans la cavité est élevé, plus la courbe illustrée sur la figure 4(b) est un pic étroit (puisque la largeur du pic est en $1/2 \tau$), plus fines en sont les variations de fréquences détectées et d'autant plus précise en est l'horloge. Idéalement, il est donc opportun de travailler avec des cavités d'autant plus grandes. Cela présente toutefois des inconvénients technologiques. N. Ramsey a en réalité montré qu'il était équivalent de considérer un système de 2 cavités séparées par un intervalle libre (comme le système illustré sur la figure 2). Dans ce cas, il s'avère que la largeur à mi-hauteur de la courbe de la figure 4(b) devient inversement proportionnelle au temps de parcours T des atomes entre les 2 cavités et c'est ce seul paramètre qui détermine la précision de l'horloge. Pour des horloges atomiques « standards », ce temps de parcours est de l'ordre de la milliseconde et la courbe de probabilité 4(b) a une largeur à mi-hauteur de l'ordre de la centaine de Hertz. Ceci permet de se rendre compte avec quelle précision la fréquence de 9.192.637.770 Hz peut être déterminée. Dès que cette fréquence varie de quelques hertz dans la cavité de Ramsey, le nombre d'atomes dans l'état « F=4 » chute et l'on sait que la fréquence d'oscillation du quartz vient de varier suivant un même rapport (quelques hertz sur 9,192 milliards de hertz, soit dans un rapport de l'ordre de 10^{-9}). Le système d'asservissement peut entrer en action pour rattraper cette dérive. Des précisions accrues dans la détermination de la seconde sont obtenues en moyennant dans le temps les fluctuations de la fréquence d'oscillation du quartz. Actuellement les meilleures horloges atomiques à jet de césium déterminent la seconde à 10^{-14} près.

La source de césium

Pour produire un jet d'atomes de césium, on chauffe tout simplement dans une enceinte fermée (le *four* sur la figure 2) un échantillon de césium pur. Sous l'effet de la chaleur, le césium se vaporise. Par un canal de sortie percé dans la paroi du four, les atomes présents dans la vapeur s'échappent dans la direction définie par l'axe du canal et définissent de la sorte un jet d'atomes directionnel. Les atomes qui s'échappent ont une vitesse typique de l'ordre de 250 m/s.

Le césium est un métal alcalin, de numéro atomique 55 (ce numéro correspond au nombre d'électrons autour du noyau) et découvert en 1861 par Bunsen et Kirchhof. C'est un métal très mou de couleur or argenté (voir figure 5). Sa température de fusion est de 28,4 °C et d'ébullition de 669 °C. Le césium s'oxyde rapidement dans l'air et peut causer des brûlures très graves quand il entre en contact avec la peau. Un gramme de césium suffit pour faire fonctionner une horloge atomique pendant une année entière.

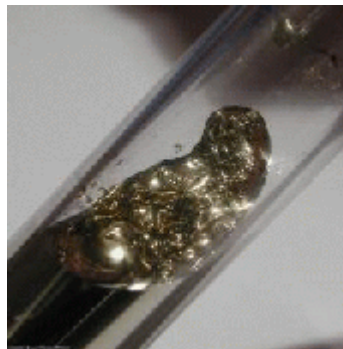


Fig. 5 : Echantillon de césium pur.

Dans le four, on trouve 50% d'atomes de césium dans l'état « $F=3$ » et 50% dans l'état « $F=4$ ». Les atomes dans ces 2 états ont des propriétés magnétiques différentes. Dans un champ magnétique, ils se comportent comme de petits aimants qui s'orientent différemment. C'est pourquoi, à la sortie du four, les atomes de césium sont envoyés dans l'entrefer d'un aimant où règne un champ magnétique⁴. Dans ce champ magnétique, les atomes suivent des trajectoires différentes selon leur état. Seuls les atomes dans l'état « $F=3$ » sont envoyés dans la cavité de Ramsey où règne le rayonnement électromagnétique. A la sortie de la cavité, les atomes peuvent avoir effectué la transition vers l'état « $F=4$ » suivant la probabilité donnée par la figure 4(b). On distingue les atomes ayant effectué cette transition des autres en les faisant passer au travers d'un second aimant.

⁴ Pour être précis, il doit s'agir d'un gradient de champ magnétique.

Seuls les atomes dans l'état « $F=4$ » sont envoyés vers un détecteur à atomes pour y être comptés (voir figure 2) afin d'en déduire la fréquence du rayonnement électromagnétique régnant dans la cavité de Ramsey.

Horloges à atomes froids

La précision d'une horloge atomique telle que celle illustrée sur la figure 2 est déterminée par un seul paramètre : le temps de parcours T des atomes entre les 2 branches de la cavité de Ramsey. Pour des atomes de césium issus d'un four, les vitesses typiques des atomes sont de l'ordre de la centaine de mètres par seconde et les temps T pour les atomes sont par conséquent de l'ordre de la milliseconde (les 2 branches de la cavité de Ramsey sont typiquement séparées d'une distance de l'ordre de quelques dizaines de centimètres, jamais beaucoup plus). Il est extrêmement difficile d'augmenter significativement ce temps T (et par conséquent la précision de l'horloge) sur base de ce schéma de principe.

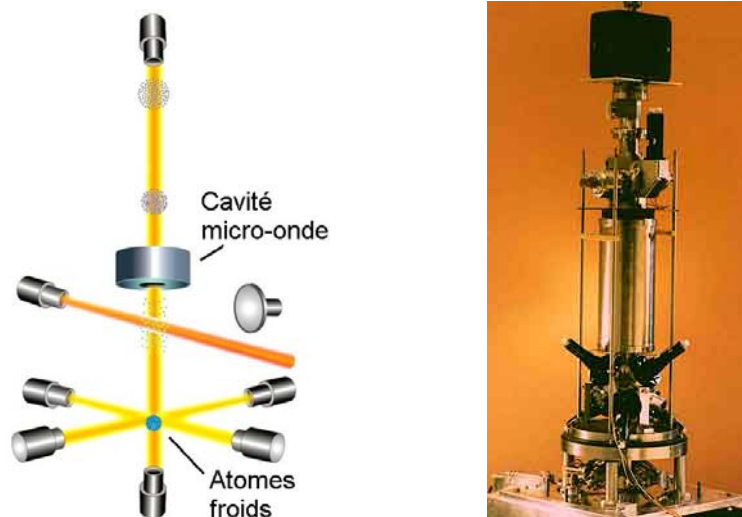


Fig. 6 : Schéma de principe d'une horloge atomique à « atomes froids ». Ces derniers sont produits à l'intersection des 6 faisceaux lasers (partie inférieure de la figure). Photo de droite : une des horloges atomiques à atomes froids du laboratoire Kastler Brossel à Paris, développée par C. Salomon *et al.*

L'avènement de la technologie des « atomes froids » a fortement changé la donne ces dernières années. Les atomes froids sont des atomes d'une vapeur que l'on fait interagir avec divers faisceaux laser. Sous une géométrie particulière (voir figure 6) et pour certaines longueurs d'onde (c'est-à-dire couleurs) bien déterminées du laser, cette interaction donne lieu à un refroidissement de la vapeur à des températures extrêmement basses (de l'ordre de

quelques millièmes de degrés seulement au-dessus du zéro absolu, soit $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$). A de telles températures, les atomes sont quasiment immobilisés et restent suspendus dans le vide par la lumière. Il devient possible de les sonder, les contrôler et les manipuler (même individuellement) avec une extrême précision. Ces possibilités nouvelles ont ouvert la voie à de nombreuses perspectives de recherche tant fondamentales qu'appliquées. Ces domaines de recherche ont été récemment couronnés par plusieurs prix Nobel de physique (C. Cohen-Tannoudji, S. Chu, W. D. Phillips en 1997, et E. A. Cornell, C. A. Wieman, W. Ketterle en 2001).

Dans une horloge atomique à « atomes froids », les atomes immobilisés à l'intersection des faisceaux laser sont « lancés » vers le haut avec une certaine vitesse (par modification de la fréquence des lasers verticaux). En coupant ensuite tous les faisceaux laser, les atomes lancés verticalement continuent leur mouvement d'ascension, atteignent une hauteur maximale, puis retombent vers le bas, ... exactement de la même façon qu'une pierre lancée verticalement finit toujours par retomber vers son point de départ (la gravité agit sur tous les corps à l'identique indépendamment de leur masse⁵). On réalise de la sorte ce que l'on appelle des *fontaines atomiques*. Dans leur mouvement vertical, les atomes traversent à 2 reprises une cavité micro-onde (une fois à la montée et une seconde fois lors de la redescente). On reproduit de la sorte le même schéma de principe de l'horloge à jet de césium où l'on fait passer des atomes de césium successivement au travers de 2 cavités micro-onde. Cependant, dans le cas présent, l'intervalle de temps T entre les 2 passages des atomes au travers de la cavité micro-onde peut être rendu significativement plus long, typiquement de l'ordre de la seconde⁶ (c'est mille fois plus que dans le cas des horloges à jet de césium). Il en résulte une horloge atomique avec une précision nettement accrue. Les horloges à atomes froids utilisent couramment des atomes de rubidium en lieu et place des atomes de césium.

Il existe actuellement un projet d'envoyer une horloge atomique à atomes froids dans l'espace (projet PHARAO - Projet d'Horloge Atomique à Refroidissement d'Atomes en Orbite). L'intérêt réside en ce que l'absence de gravité peut encore contribuer à augmenter le temps T et ainsi la précision de l'horloge. L'objectif est d'atteindre une précision de 10^{-16} , contre 10^{-15} actuellement pour les meilleures horloges à atomes froids sur terre.

Les prototypes des horloges PHARAO sont testés dans des expériences de microgravité avec l'avion zéro-G d'Airbus (figure 7). Cet avion reproduit dans son

⁵ Dans le vide, une pierre et une plume tombent côte à côte. Avec un seul atome en lieu et place de la plume, on obtiendrait exactement le même comportement.

⁶ C'est le temps caractéristique qu'il faut à un atome pour monter d'une soixantaine de centimètres et redescendre de cette même hauteur.

intérieur un environnement exempt de gravité pendant quelques secondes. A cette fin, l'avion entame un mouvement ascensionnel fort incliné en haute altitude puis coupe tous ses moteurs. L'avion poursuit alors un mouvement parabolique et « tombe » littéralement en chute libre. Pendant ces instants, tout se passe à l'intérieur comme si la gravité n'existait pas. Après une vingtaine de secondes, et pour d'évidentes raisons, les moteurs sont remis en marche et de nouvelles paraboles peuvent être entreprises. Une campagne de vols paraboliques comportent une trentaine de paraboles. Il est évidemment préférable de ne pas tomber malade dès les premières minutes de vol (cela arrive pourtant fréquemment d'après les récits des expérimentateurs prenant part à ces campagnes de mesures).



Fig. 7 : Avion Zero-G d'Airbus pour les campagnes de vols paraboliques et les expériences en micro-gravité.

Conclusions

Les horloges atomiques sont des appareillages scientifiques de haute technologie en perpétuelle évolution. Les dernières générations de ces appareils font appel aux développements récents de la recherche en physique atomique et l'on peut s'attendre à voir dans les prochaines années la définition de la seconde révisée, tant la précision sur la détermination du temps s'est accrue depuis 1967, date de l'actuelle définition. Les physiciens atomiques sont continuellement à la recherche de systèmes sensibles à des variations de plus en plus fines de la fréquence du rayonnement électromagnétique qui les

illumine. Les derniers développements en ce domaine⁷ laisse augurer dans un futur proche des horloges atomiques précises à 10^{-18} , soit au milliardième de milliardième de seconde.

Les horloges atomiques ont contribué à mettre en évidence des phénomènes qui continuent à nous surprendre aujourd'hui, tels par exemple la relativité du temps. Le temps d'un système que l'on voit bouger s'écoule plus lentement. Une horloge mise en mouvement et ramenée à son point de départ affiche un retard comparativement à une horloge qui serait restée au repos à ce même point de départ. Nul espoir de justifier un retard à une réunion en invoquant ce phénomène, ces effets sont extrêmement ténus pour des objets se déplaçant aux vitesses usuelles de notre environnement quotidien. Une horloge embarquée dans un avion se déplaçant à 1.000 km/h retarde de quelque 0,4 millième de milliardième de seconde par seconde de temps écoulée au sol. Si le vol dure 1 heure à cette vitesse, l'horloge voyageuse affichera un retard de 1,5 milliardième de seconde par rapport à une horloge restant au sol. Seules les expériences réalisées au moyen d'horloges atomiques ont été capables de mettre en évidence et de confirmer ces effets de relativité restreinte (théorie sur la nature de l'espace et du temps établie par Einstein en 1905). Pour produire des retards plus importants, il faudrait faire se mouvoir des horloges avec des vitesses beaucoup plus grandes. Les effets les plus significatifs ont lieu lorsque la vitesse de déplacement approche celle de la lumière (300.000 km/s).

De manière analogue, le temps ne s'écoule pas de la même façon selon l'altitude du point où l'on se trouve. Il s'agit là d'un effet de relativité générale (théorie de la relativité qui prend en considération le phénomène de gravitation – l'attraction universelle de tous les corps entre eux). Il faut des variations d'altitude de l'ordre de 10.000 mètres pour obtenir des effets du même ordre de grandeur que ceux obtenus en embarquant une horloge dans un avion à 1.000 km/h. Encore une fois, ces effets ont pu être mesurés et confirmés au moyen d'horloges atomiques.

Le système GPS utilise des signaux provenant de satellites situés à 20.000 km d'altitude. Les horloges atomiques embarquées dans ces satellites mesurent un temps qui s'écoule donc différemment que sur terre. Non seulement elles sont parfaitement à même de détecter cette différence, mais en outre elles doivent prendre en compte ces effets de relativité générale pour éviter de rendre immédiatement caduque le fonctionnement du GPS. Qui imagine un seul instant que, se promenant en forêt au moyen de son récepteur GPS, les équations de la relativité générale sont encodées dans ce récepteur et que ce sont des horloges atomiques situées à 20.000 km d'altitude qui lui permettent de suivre son

⁷ Ces développements font appel à d'autres technologies comme les pièges à ions refroidis par laser, ou encore la génération de radiation laser avec un spectre « peigne en fréquences » (technologie pour laquelle l'auteur, Theodor W. Hänsch du Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching (Allemagne), s'est vu attribuer le prix Nobel cette année 2005, copartagé avec R. J. Glauber et J. Hall).

chemin sans se tromper ? Les recherches à caractère fondamental ont parfois des retombées technologiques insoupçonnées bien des années plus tard. La relativité générale fut développée en 1916 par Einstein et les effets prédits sont à ce point ténus sur terre qu'à cette époque on ne s'imaginât jamais qu'un jour et une septantaine d'années plus tard des applications bien concrètes en découleraient. La détermination précise du temps est et continuera à l'avenir d'être un sujet de prime importance dont les répercussions sur la recherche fondamentale et partant la recherche appliquée ne se démentiront certainement pas.