

ÉPREUVE D'ANALYSE DE DOCUMENTS SCIENTIFIQUES

FILIÈRE MP - 2018

DOSSIER n° 4

Ce dossier comporte de très larges extraits de la transcription d'une conférence donnée par C. Cohen-Tannoudji sur le refroidissement des atomes par laser.

Dans votre exposé d'environ 15 minutes, vous mettrez en relation les principes physiques décrits par l'auteur à la réalisation du processus de refroidissement des atomes et vous ferez le lien avec l'application décrite à la fin du texte.

Ce dossier a été rédigé en vue d'une lecture par un public large ; sa compréhension requiert cependant une culture scientifique certaine et il se peut que les documents s'appuient sur des concepts nouveaux n'entrant pas dans le champ du programme, après avoir introduit ceux-ci de façon pédagogique mais souvent très concise: les examinateurs en sont conscients et apprécient le travail en conséquence.

Les candidats s'attacheront à expliciter les phénomènes physiques élémentaires mis en jeu, et pourront s'appuyer sur les « encadrés » de l'article pour mieux assimiler ces éléments. S'ils rencontrent des difficultés de compréhension portant sur ces concepts nouveaux, ou des difficultés à s'appropriier ces derniers, ils construiront leur analyse en conséquence et l'indiqueront simplement à l'examineur à l'issue de leur exposé introductif : ils n'hésiteront pas, dans ce cas, à laisser de côté la fraction concernée du dossier.

Les candidates et les candidats sont invités à éviter d'écrire leur présentation en tout petits caractères, peu lisibles lors de leur présentation devant l'examineur.

Certains textes ont subi des coupes partielles lors de la constitution du sujet. Avant l'établissement stable de l'image sur la tablette, le texte coupé peut apparaître brièvement : ce phénomène parasite est à ignorer. De même, l'élimination complète de certaines pages peut introduire une discontinuité dans la numérotation des pages du document final.

Le refroidissement des atomes par laser

par CLAUDE COHEN-TANNOUJJI

Introduction

Au cours des deux dernières décennies, des progrès spectaculaires ont été réalisés dans notre maîtrise du mouvement des atomes. En faisant interagir ces atomes avec des faisceaux laser de direction, de fréquence et de polarisation convenablement choisies, nous pouvons maintenant contrôler la vitesse de ces atomes, réduire leurs mouvements d'agitation désordonnée, en quelque sorte les assagir, ce qui revient à diminuer leur température. Ces nouvelles méthodes portent le nom de « refroidissement laser ». On sait également depuis peu contrôler la position des atomes et les maintenir confinés dans de petites régions de l'espace appelées « pièges ».

Les mécanismes physiques

LE RECU DE L'ATOME LORS DE L'ÉMISSION
OU DE L'ABSORPTION D'UN PHOTON

En physique, il y a une loi fondamentale qui est « la conservation de la quantité de mouvement ». Considérons un atome excité dans un état E_b supérieur, initialement immobile, et supposons qu'à l'instant $t = 0$, cet atome émette un photon, lequel a une quantité de mouvement $h\nu/c$. Dans l'état initial, l'atome étant tout seul et immobile, la quantité de mouvement globale est nulle. Dans l'état final, comme le photon part avec une quantité de mouvement $h\nu/c$, l'atome recule avec la quantité de mouvement opposée $M\vartheta = -h\nu/c$ (Fig. 3). Vous avez certainement déjà vu, en réalité ou à la télévision, un canon tirer un obus : lorsque le canon tire un obus, il recule. De même, lorsqu'un atome émet un photon, il recule à cause de la conservation de la quantité de mouvement. Sa vitesse de recul est donnée par $\vartheta_{\text{rec}} = h\nu/Mc$.

Le même phénomène de recul s'observe lors de l'absorption. Considérons un atome dans un état fondamental E_a , initialement immobile, et supposons qu'on envoie sur lui un photon : l'atome

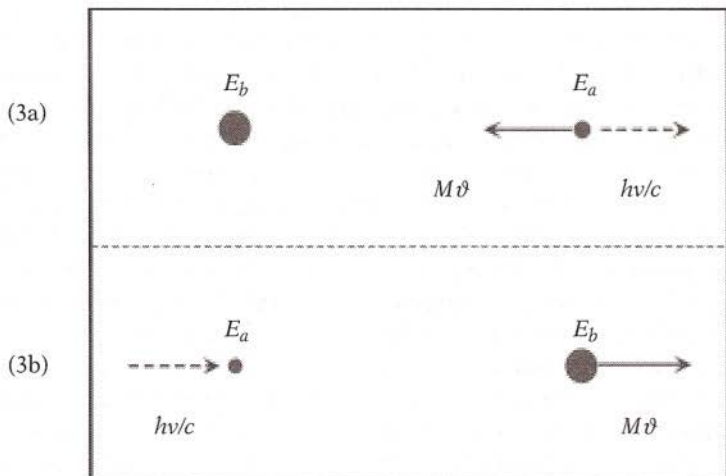


Figure 3 – Recul d'un atome lors de l'émission (figure 3a) ou de l'absorption (figure 3b) d'un photon par cet atome.

absorbe le photon et parvient à l'état excité. Il recule alors avec la même vitesse de recul $h\nu/Mc$. De même, lorsqu'on tire une balle sur une cible, la cible recule à cause de la quantité de mouvement qui lui est communiquée par le projectile.

Par ailleurs, nous savons que l'absorption de photon qui porte l'atome, initialement immobile, à l'état excité, est nécessairement suivie d'une émission puisque l'atome ne peut rester excité indéfiniment. Il retombe donc, au bout d'un temps qui est la durée de vie de l'état excité, dans l'état inférieur, en émettant spontanément un photon. Dans ce cycle absorption-émission au cours duquel l'atome absorbe un photon, recule puis émet un photon, la probabilité qu'il émette ce photon dans telle direction ou dans telle autre, dans un sens ou dans le sens opposé, est la même de sorte, qu'en moyenne, la vitesse qu'il perd lors de l'émission est nulle. Il s'ensuit donc que le changement de vitesse de l'atome est, en moyenne, uniquement lié au processus d'absorption et a pour valeur $v_{\text{rec}} = h\nu/Mc$. Ce résultat est important pour la suite.

L'ATOME DANS UN FAISCEAU LASER

Essayons maintenant de comprendre comment réagit l'atome en présence, non pas d'un seul photon incident, mais d'un faisceau laser résonnant. Un flot de photons arrive alors sur lui. Il en absorbe un premier, monte dans l'état excité, retombe en émettant un photon, puis absorbe un second photon laser, monte dans l'état excité, retombe en émettant un autre photon, puis en absorbe un troisième et ainsi de suite. L'atome, ainsi plongé dans un faisceau laser, enchaîne les cycles absorption-émission sans pouvoir s'arrêter et, à chacun de ces cycles, sa vitesse change en moyenne de $v_{\text{rec}} = h\nu/Mc$. Comme la durée de vie moyenne de l'atome excité est de 10^{-8} s, il se produit de l'ordre de 10^8 cycles absorption-émission par seconde, c'est-à-dire 100 millions de cycles par seconde ! À chacun de ces cycles, la vitesse de l'atome change de $h\nu/Mc$. Pour l'atome de sodium, le calcul de cette vitesse de recul donne 3 cm/s. Pour l'atome de césium, on obtient 3 mm/s. Ces vitesses sont très faibles, comparées par exemple aux vitesses des molécules de l'air qui nous entoure, qui sont de l'ordre de 300 m/s. C'est pourquoi pendant longtemps les changements de vitesse d'un atome dus aux effets de recul ont été considérés comme négligeables. En fait la situation est radicalement différente pour un atome dans un faisceau laser. Les cycles d'absorption-émission se répètent 100 millions de fois par seconde, générant un changement de vitesse par seconde de l'ordre de 100 millions de fois la vitesse de recul. On obtient ainsi des accélérations (ou décélérations) de l'ordre de 10^6 m/s². À titre de comparaison, prenons un exemple dans la vie courante : quand un objet tombe, l'accélération g qu'il subit du fait de la pesanteur est de 10 m/s². Un atome de sodium irradié par un faisceau laser est

soumis à une accélération, ou une décélération, qui peut atteindre 10^5 g. À titre de comparaison encore, cette accélération est 100 000 fois supérieure à celle, de l'ordre de 1 g, que subit une voiture qui roule à 36 km/heure et qui s'arrête en 1 seconde.

RALENTISSEMENT D'UN JET ATOMIQUE

Cette force considérable qu'exerce la lumière sur les atomes, résultant de l'accumulation d'un très grand nombre de petits changements de vitesse, permet d'arrêter un jet atomique. Considérons un jet d'atomes sortant d'un four à la température de 300 °K ou 400 °K et se propageant à une vitesse de l'ordre de 1 km/s. Si ce jet est éclairé tête bêche par un faisceau laser résonnant, la force de pression de radiation que les atomes subissent va ralentir ces atomes, les arrêter et même leur faire rebrousser chemin. Un atome de vitesse initiale v_0 de 1 km/s, soit 10^3 m/s, va être arrêté avec une décélération de 10^6 m/s², au bout de 10^{-3} seconde, c'est-à-dire en une milliseconde. En une milliseconde, il passe ainsi de 1 km/s à zéro ! La distance L parcourue par l'atome avant qu'il ne s'arrête est donnée par une formule classique de terminale. Elle est égale au carré de la vitesse initiale divisée par deux fois la décélération subie. On obtient ainsi $L = 0,5$ m. On peut donc ainsi, dans un laboratoire, sur une distance de l'ordre du mètre, arrêter un jet d'atomes avec un faisceau laser approprié. Évidemment, au fur et à mesure que les atomes sont ralentis, à cause de l'effet Doppler, ils sortent de résonance. Il faut donc modifier la fréquence du faisceau laser ou modifier la fréquence des atomes pour maintenir la condition de résonance et conserver la force à sa valeur maximale tout au long du processus de décélération.

Ralentir les atomes consiste à diminuer leur vitesse moyenne. Par contre la dispersion des valeurs de la vitesse autour de la valeur moyenne demeure en général inchangée. Il faut en fait faire une distinction très claire entre le mouvement d'ensemble caractérisé par la vitesse moyenne et le mouvement d'agitation désordonnée autour de la valeur moyenne de la vitesse. En physique, c'est cette vitesse d'agitation désordonnée qui caractérise la température. Plus un milieu est chaud, plus les vitesses d'agitation désordonnée de ses constituants sont élevées. Refroidir un système, cela veut dire diminuer les vitesses d'agitation désordonnée de ses constituants. Comment peut-on refroidir des atomes avec des faisceaux laser ?

REFROIDISSEMENT LASER DOPPLER

Le mécanisme de refroidissement laser le plus simple utilise l'effet Doppler et a été proposé au milieu des années 1970 par Hansch, Schawlow, Wineland et Dehmelt (*Fig. 4*). L'idée est simple : l'atome est éclairé non plus par une seule onde laser, mais

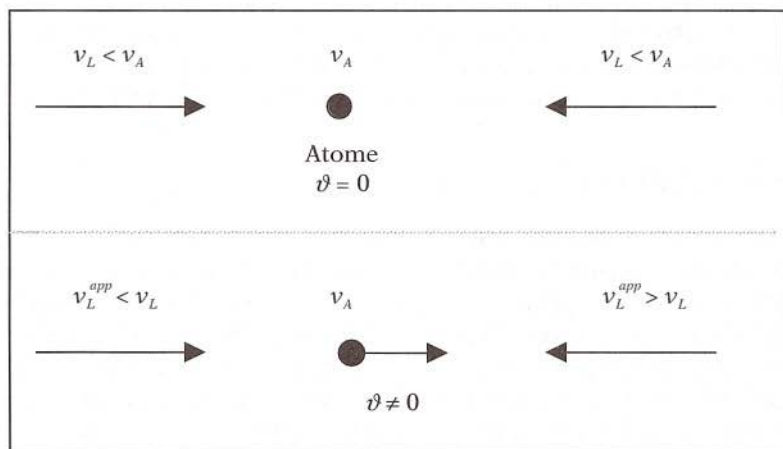


Figure 4 – Principe du mécanisme de refroidissement laser par effet Doppler. Pour un atome au repos (figure 4a) les deux forces de pression de radiation s'équilibrent exactement. Pour un atome en mouvement (figure 4b), la fréquence apparente de l'onde se propageant en sens opposé augmente et se rapproche de résonance. Elle exerce une force de pression de radiation plus grande que celle de l'onde qui se propage dans le même sens que l'atome et dont la fréquence apparente, diminuée par effet Doppler, s'éloigne de résonance.

par deux ondes laser se propageant dans des sens opposés. Ces deux ondes laser ont même intensité, et même fréquence ν_L , cette fréquence ν_L étant légèrement inférieure à celle ν_A , de la transition atomique. Que se passe-t-il alors ? Si l'atome est immobile, avec donc une vitesse nulle, $v = 0$, il n'y a pas d'effet Doppler. Dans ce cas, les deux faisceaux laser ont la même fréquence apparente. Les forces qu'ils exercent ont même module et des signes opposés. La force de pression de radiation venant de la gauche et la force de pression de radiation venant de la droite s'équilibrent donc exactement et l'atome n'est soumis à aucune force. Si l'atome se déplace vers la droite, avec une vitesse v non nulle, à cause de l'effet Doppler, la fréquence de l'onde qui se propage en sens opposé apparaît plus élevée. Cette fréquence apparente est ainsi augmentée et se rapproche de résonance. Le nombre de photons absorbés est alors plus élevé et la force augmente. Par contre, l'onde qui se propage dans le même sens que l'atome a sa fréquence apparente qui est diminuée par effet Doppler et qui s'éloigne donc de résonance. Le nombre de photons absorbés est alors moins élevé et la force diminue. À cause de l'effet Doppler, les deux forces de pression de radiation ne s'équilibrent plus. C'est la force opposée à la vitesse qui l'emporte et l'atome est ainsi soumis à une force globale non nulle, opposée à sa vitesse. Cette force globale F peut être écrite pour une vitesse v assez faible sous la forme $F = -\alpha v$ où α est un coefficient

de friction. Autrement dit, l'atome qui se déplace dans cette configuration de deux faisceaux laser se propageant dans des sens opposés est soumis à une force de friction opposée à sa vitesse. Il se retrouve dans un milieu visqueux, que l'on appelle une « mélasse optique » par analogie avec un pot de miel. Sous l'effet de cette force, la vitesse de l'atome va être amortie et tendre vers zéro.

REFROIDISSEMENT SISYPHE

L'étude théorique du mécanisme de refroidissement laser Doppler permet de prédire les températures qui pourraient être obtenues par un tel mécanisme et qu'on trouve de l'ordre de quelques centaines de microkelvin, soit quelques 10^{-4} K. Ce sont des températures très basses comparées à la température ordinaire qui est de l'ordre de 300 K. En fait, quand, à la fin des années 1980, on a pu mesurer ces températures de manière plus précise, on s'est aperçu, et ce fut une réelle surprise, que les températures mesurées étaient 100 fois plus basses que prévues, ce qui signifiait que d'autres mécanismes étaient en jeu. C'est l'un d'eux, le refroidissement *Sisyphé* que nous avons, mon collègue Jean Dalibard et moi-même, identifié et étudié en détail.

Sans entrer dans les détails d'un tel mécanisme, essayons d'en donner une idée générale. Les expériences de refroidissement laser utilisent des paires d'ondes laser se propageant dans des sens opposés (voir par exemple la *figure 4*). Ces ondes interfèrent et l'onde résultante a donc une intensité et une polarisation qui varient périodiquement dans l'espace. Or, on peut montrer que les niveaux d'énergie d'un atome sont légèrement déplacés par la lumière, d'une quantité proportionnelle à l'intensité lumineuse et qui dépend de la polarisation lumineuse. De plus, chaque atome possède en général plusieurs « sous-niveaux » d'énergie dans son état fondamental, qui correspondent chacun à une valeur différente d'une grandeur physique qui, comme l'énergie, est quantifiée. En l'occurrence, il s'agit ici du moment cinétique, l'atome pouvant être considéré comme une petite toupie qui tourne sur elle-même. La *figure 5* représente deux tels sous-niveaux dont les énergies sont modulées dans l'espace sous l'effet de la lumière. L'atome en mouvement se déplace donc dans un paysage de collines et de vallées de potentiel, paysage qui change suivant le sous-niveau dans lequel il se trouve. Considérons alors un atome se déplaçant vers la droite et initialement au fond d'une vallée de potentiel, dans un certain sous-niveau (*Fig. 5*). Cet atome gravit la colline de potentiel et atteint le sommet de cette colline où il peut avoir une probabilité importante d'absorber et d'émettre un photon, processus à l'issue duquel il va se retrouver dans l'autre sous-niveau d'énergie, au fond d'une vallée. Le même scénario peut alors se reproduire, l'atome gravissant à nouveau une colline de potentiel avant d'atteindre le

sommet et d'être transféré dans l'autre sous-niveau au fond d'une vallée, et ainsi de suite... Comme le héros de la mythologie grecque, l'atome est ainsi condamné à recommencer sans cesse la même ascension, perdant à chaque fois une partie de son énergie cinétique. Au bout d'un certain temps, il est tellement épuisé qu'il n'arrive plus à gravir les collines et se retrouve pris au piège au fond d'un puits. L'étude théorique et la comparaison avec les résultats expérimentaux ont conforté la réalité de ce mécanisme de refroidissement qui permet d'atteindre le microkelvin, c'est-à-dire une température de 10^{-6} K. Nous avons aussi mis au point au laboratoire d'autres méthodes, que je n'ai pas le temps d'approfondir aujourd'hui, qui permettent d'aller encore plus loin et d'atteindre le nanokelvin, c'est-à-dire 10^{-9} K, un milliardième de Kelvin.

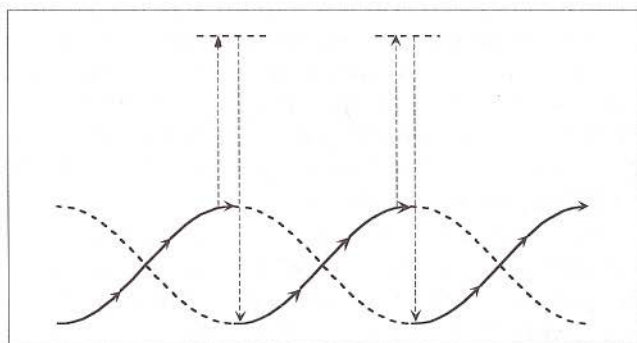


Figure 5 - L'effet Sisyphe.

À de telles températures, les vitesses des atomes sont de l'ordre du cm/s voire du mm/s alors qu'à température ordinaire, elles sont de l'ordre du km/s. Ces méthodes de refroidissement ont donc permis d'assagir considérablement le mouvement d'agitation désordonnée des atomes, de les rendre presque immobiles. Mentionnons également, sans entrer dans le détail des phénomènes, qu'on peut confiner les atomes dans une petite région de l'espace, appelée piège, grâce à l'utilisation de gradients d'intensité lumineuse ou de gradients de champ magnétique.

Description de quelques applications

LES HORLOGES ATOMIQUES

Les applications des atomes froids et les nouvelles perspectives qu'ils ouvrent sont essentiellement liées au fait qu'ils sont animés

d'une très faible vitesse. Cette particularité permet de les observer pendant une durée beaucoup plus longue. Or, en physique, une mesure est d'autant plus précise que le temps d'observation est plus long. On comprend très bien alors que, grâce à l'extrême précision des mesures pouvant être faites sur des atomes ultrafroids, des progrès ont pu être réalisés, dans la conception des horloges notamment.

Rappelons tout d'abord en quoi consiste une horloge. C'est essentiellement un oscillateur, par exemple un quartz qui oscille à une certaine fréquence. Cependant, la fréquence d'un quartz livré à lui-même, fluctue au cours du temps. Elle accélère ou ralentit. Pour réaliser une horloge stable, il est donc nécessaire d'empêcher sa fréquence de dériver. Pour ce faire, on va maintenir la fréquence du quartz égale à la fréquence centrale d'une raie atomique.

Le principe de cette opération est schématisé sur la *figure 6*. Un oscillateur, piloté par le quartz, délivre une onde électromagnétique de même fréquence ν que la fréquence d'oscillation du quartz. Cette onde permet une « interrogation » des atomes utilisés pour stabiliser l'horloge. En l'envoyant sur les atomes et en balayant la fréquence ν du quartz, on observe une « résonance » quand ν coïncide avec la fréquence $\nu_0 = (E_b - E_a)/h$ correspondant à l'écart d'énergie $E_b - E_a$ entre deux niveaux d'énergie de cet atome. Un dispositif « d'asservissement » ajuste alors en permanence la fréquence ν du quartz pour la maintenir au centre de la raie atomique. On stabilise ainsi ν en forçant ν à rester égal à ν_0 .

En fait, c'est l'atome de césium qui est utilisé pour définir l'unité de temps, la seconde. Par convention internationale, la seconde correspond à 9 192 631 770 périodes d'oscillation $T_0 = 1/\nu_0$,

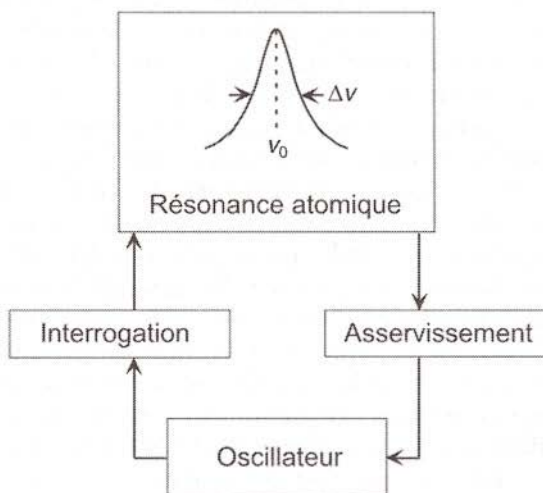


Figure 6 – Principe d'une horloge atomique.

où ν_0 est la fréquence correspondant à une certaine transition reliant deux sous-niveaux d'énergie de l'état fondamental de l'atome de césium. Cette fréquence ν_0 est universelle. Elle est la même pour tous les atomes de césium, où qu'ils se trouvent.

Les raies de résonance atomiques ne sont pas infiniment étroites. Elles ont une « largeur » $\Delta\nu$ (Fig. 6). Plus cette largeur est faible, plus l'asservissement sera efficace, et plus l'horloge sera stable. Or, on peut montrer que la largeur d'une transition atomique reliant deux sous-niveaux de l'état fondamental d'un atome est inversement proportionnelle au temps d'observation T_{obs} . Plus T_{obs} est long, plus la raie est fine. Comme les atomes froids permettent d'allonger la durée de ce temps d'observation et par conséquent de disposer de raies très fines, il est aujourd'hui possible de réaliser des horloges extrêmement précises. Les horloges qui ont été réalisées jusqu'à ces dernières années utilisent des jets d'atomes de césium se propageant à des vitesses de l'ordre du km/s, dans des appareils dont la longueur est de l'ordre du mètre. Le temps d'observation accessible avec de tels systèmes est donc de l'ordre d'une milliseconde. Avec des atomes froids, il a été possible d'allonger ce temps d'observation par un facteur 100 et d'améliorer donc les performances des horloges atomiques par le même facteur. En fait, on n'utilise pas dans ces nouveaux dispositifs un jet horizontal d'atomes ralentis, car ils tomberaient rapidement dans le champ de pesanteur. Dans les nouvelles horloges, les jets atomiques sont verticaux. Plus précisément, les atomes refroidis dans une mélasse optique sont lancés vers le haut au moyen d'une impulsion laser et forment une sorte de « fontaine ». Ils traversent la cavité électromagnétique dans laquelle la résonance atomique est mesurée, une première fois dans leur mouvement ascendant, une seconde fois dans leur mouvement descendant quand ils retombent sous l'effet du champ de pesanteur. Les temps d'observation peuvent atteindre alors quelques dixièmes de seconde et être ainsi de l'ordre de cent fois plus longs que dans les horloges précédentes. De telles horloges à atomes froids ont été réalisées à Paris par un de mes collègues, Christophe Salomon en collaboration avec André Clairon du LPTF-BNM (Laboratoire primaire du temps et des fréquences et bureau national de métrologie). Ils ont pu ainsi mettre au point, avec une fontaine haute de 1 m, l'horloge la plus stable et la plus précise jamais réalisée dans le monde. Deux critères permettent de définir la qualité d'une horloge. Le premier, la stabilité, indique la fluctuation relative de fréquence au cours du temps. Elle est de l'ordre de quelques 10^{-16} quand le signal est moyenné sur un temps de l'ordre de 10^4 s. Concrètement, cela signifie qu'une horloge atomique qui aurait été mise en marche au début de la création de l'univers ne serait, dix milliards d'années plus tard, désaccordée que de quelques secondes. Le second critère, c'est la précision. Si on réalise deux horloges, leur fréquence coïncide à 10^{-15} près, compte tenu des déplacements de fréquence liés à des effets parasites.

Ces horloges à atomes froids ont de multiples applications : le GPS (« Global Positioning System »), système de positionnement par satellite, la synchronisation des réseaux de télécommunications à haut débit, les tests de physique fondamentale (relativité générale, variation des constantes fondamentales). Pourrait-on encore augmenter leurs performances en réalisant des fontaines plus hautes, de 10 mètres par exemple ? En fait, un tel projet ne serait pas réaliste car le temps d'observation ne croît que comme la racine carrée de la hauteur et il faudrait blinder le champ magnétique terrestre (qui peut déplacer la fréquence de l'horloge) sur des distances de plus en plus grandes. La solution qui s'impose alors de manière évidente consiste à se débarrasser de la gravité et c'est la raison pour laquelle nous nous sommes engagés en France dans des expériences de microgravité depuis 1993. Ces expériences se déroulent à bord d'un avion avec lequel le pilote effectue plusieurs paraboles d'une vingtaine de secondes chacune. Pour ce faire, le pilote accélère l'avion à 45° en phase ascendante, puis coupe brutalement les gaz. Pendant les 20 secondes qui suivent l'avion est en chute libre et sa trajectoire est une parabole. À l'intérieur de l'avion, les objets flottent et ne tombent plus sur les parois de l'avion. Tout se passe comme s'il n'y avait plus de gravité. Puis le pilote remet les gaz et redresse la trajectoire de l'avion pour se remettre en phase ascendante et effectuer une nouvelle parabole. On a donc pu ainsi effectuer des tests sur le comportement des divers composants de l'expérience dans ces conditions, et leurs résultats ont montré qu'il est possible de réaliser des horloges à atomes froids en apesanteur. À la suite de ces tests, un accord a été signé pour prolonger l'expérience et placer une horloge atomique à atomes froids à bord de la station spatiale internationale aux alentours de 2004.