

International Conference on Space Optics—ICSO 1997

Toulouse, France

2–4 December 1997

Edited by George Otrio



Un projet d'horloge atomique spatiale utilisant le refroidissement des atomes par faisceaux laser: PHARAO

Ph. Laurent, P. Lemonde, E. Simon, G. Santarelli, et al.



icso proceedings



International Conference on Space Optics — ICSO 1997, edited by Georges Otrio, Proc. of SPIE Vol. 10570, 105701B · © 1997 ESA and CNES · CCC code: 0277-786X/18/\$18 · doi: 10.1117/12.2326487

Un projet d'horloge atomique spatiale utilisant le refroidissement des atomes par faisceaux laser : PHARAO

Ph.Laurent^[1], P. Lemonde^[2], E. Simon^[1], G. Santarelli^[1], P. Petit^[3], N. Dimarcq^[3],
A. Clairon^[1], C. Salomon^[2], C. Audoin^[3], F. Jamin Changeart^[4], F. Gonzalez^[4].

[1] Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences, 61, av. de l'Observatoire 75014
PARIS.

[2] Laboratoire Kastler Brossel, 24, rue Lhomond 75231 PARIS.

[3] Laboratoire de l'Horloge Atomique, Bat.221, Université Paris-Sud, 91405 ORSAY

[4] Centre National d'Etudes Spatiales, 18, av. Edouard Belin, 31055 TOULOUSE

RÉSUMÉ

Dans l'espace, les performances d'une horloge à atomes froids devraient être supérieures à celles d'une horloge terrestre. Dans le cadre du programme PHARAO (projet d'horloge atomique par refroidissement d'atomes en orbite), nous avons réalisé un prototype d'horloge spatiale utilisant des atomes de césium refroidis par laser. Ce prototype est le deuxième exemplaire d'une horloge à atomes de césium refroidis. Par rapport à la fontaine atomique du BNM-LPTF, il présente le double avantage d'être plus fiable par construction et transportable. Il est conçu pour fonctionner avec ou sans gravité. Nous l'avons testé avec succès en apesanteur, à bord de l'airbus ZERO-G du CNES. Au laboratoire, la frange de résonance expérimentale est de 13 Hz. En apesanteur, nous avons obtenu une frange de résonance de 7 Hz. C'est la première fois qu'une horloge à atomes froids est testée en gravité réduite et les résultats obtenus démontrent la faisabilité d'un dispositif spatial. Des changements mineurs vont permettre d'optimiser les performances du prototype en présence de gravité à un niveau similaire à celles de la fontaine atomique. Ainsi cette horloge transportable sera un outil idéal pour la comparaison d'horloges distantes.

ABSTRACT

PHARAO is a space program developed by French laboratories and the French space agency dealing with the construction and the utilization of a cold atomic clock. In space, an atomic clock using cold atoms could have better performances than on Earth. We have constructed a compact and reliable clock prototype which can operate on Earth or in a microgravity environment. The prototype has worked since November 1996. On Earth, the microwave resonance linewidth is 13 Hz, limited by gravity. Recently, we have successfully tested the prototype operation on board the ZERO-G CNES aircraft. During the parabolic flights, we have recorded a 7 Hz microwave resonance linewidth. We have demonstrated for the first time that a reduced gravity environment improves atomic spectroscopy. The prototype will now serve as a reference for the development of a space qualified clock through industrial contracts. On earth, the prototype will be used as a transportable frequency standard. It will be an ideal tool for the comparison of distant ground based clock at a level which cannot be attained with existing time transfer technique. For this application, the prototype will be transformed into an atomic fountain to optimize its performances.

1 INTRODUCTION

L'utilisation du refroidissement d'atomes neutres par laser améliore considérablement les caractéristiques des horloges atomiques. Les vitesses atomiques très basses obtenues avec ces techniques (de l'ordre du cm/s pour le césium [1]) permettent des temps d'interrogation des atomes beaucoup plus longs que dans les horloges conventionnelles. La stabilité de fréquence, qui est inversement proportionnelle au temps d'interrogation, s'en trouve donc améliorée. De plus, la plupart des effets systématiques qui déplacent la fréquence atomique sont réduits avec la vitesse des atomes. Ainsi, l'exactitude de fréquence est beaucoup mieux déterminée. La première horloge atomique utilisant des atomes froids, la fontaine atomique FO1 du BNM-LPTF [2], a des propriétés inégalées à ce jour. Sa stabilité de fréquence est de $1 \cdot 10^{-15}$ en valeur relative pour un temps d'intégration de quelques heures. Pour des temps d'intégration plus longs, nous atteignons le plancher de stabilité de fréquence du maser à hydrogène que nous utilisons comme oscillateur de référence. L'exactitude de fréquence est égale à $2 \cdot 10^{-15}$ [3]. Dans la fontaine atomique, la gravité terrestre limite le temps d'interrogation à 700 ms. En microgravité, il sera possible d'augmenter le temps d'interaction par un facteur 10 avec un dispositif simple et compact [4]. Le programme PHARAO vise à développer une horloge spatiale à atomes refroidis par laser qui pourrait surpasser les performances des horloges terrestres.

2 LE PROTOTYPE D'HORLOGE SPATIALE

Si la fontaine atomique délivre des performances exceptionnelles au laboratoire, elle demeure très loin d'un objet spatial. Son poids total dépasse deux tonnes, elle mesure deux mètres de hauteur et ne fonctionne que dans une atmosphère bien contrôlée. Nous avons donc construit une horloge beaucoup plus fiable et de dimensions réduites, capable de fonctionner en microgravité. Nous l'avons testée au cours de vols paraboliques à bord de l'avion ZERO-G du CNES. L'objectif de ces vols était de montrer le bon fonctionnement du prototype dans un environnement très éloigné des conditions qui règnent dans un laboratoire et de faire la démonstration de l'intérêt de l'apesanteur en enregistrant une courbe de résonance plus étroite que celle obtenue sur terre.

Prochainement, le prototype sera modifié pour optimiser ses performances, en présence de gravité, à un niveau comparable à celles de la fontaine atomique. Transportable, il pourra alors être utilisé pour la comparaison d'horloges distantes à un niveau qui ne peut être obtenu avec les techniques de transfert de temps actuelles.

Le dispositif expérimental de l'horloge est schématisé sur la figure 1. Tout comme la fontaine atomique, le prototype fonctionne de manière pulsée. Dans une enceinte à vide où règne une vapeur de césium, environ 10^7 atomes sont capturés et refroidis à l'intersection de six faisceaux laser [5]. La durée variable de cette phase de capture (entre 100 ms et 1 s) permet de varier le nombre d'atomes froids. Les atomes sont ensuite lancés par la méthode de mélasse mouvante [6,7] et sont refroidis à leur température minimum en un peu plus de 3 ms. Ils subissent l'interaction micro-onde dans une cavité cylindrique accordée sur le mode TE_{013} et sont ensuite détectés par une méthode optique. Tous les faisceaux lasers sont fournis par un banc optique séparé. Une chaîne de fréquence synthétise le champ micro-onde à 9,192 GHz à partir d'un oscillateur à quartz BVA ultra-stable à 10 MHz. Un ordinateur génère la séquence temporelle et traite les données.

La différence majeure dans le fonctionnement du prototype par rapport à la fontaine atomique est que les atomes subissent une seule interaction micro-onde. Durant toute la phase d'interrogation, les atomes sont sous l'influence du champ micro-onde. Il devient donc nécessaire de bien connaître, à chaque instant et en chaque point de la trajectoire atomique, la phase et l'amplitude du champ micro-onde pour en déduire les effets de la cavité sur la fréquence de résonance atomique. Des études sur la modélisation de la distribution du champ dans une cavité cylindrique sont en cours.

a l'IRCOM [8]. Ces calculs seront confrontés aux résultats expérimentaux obtenus au cours de l'évaluation du prototype.

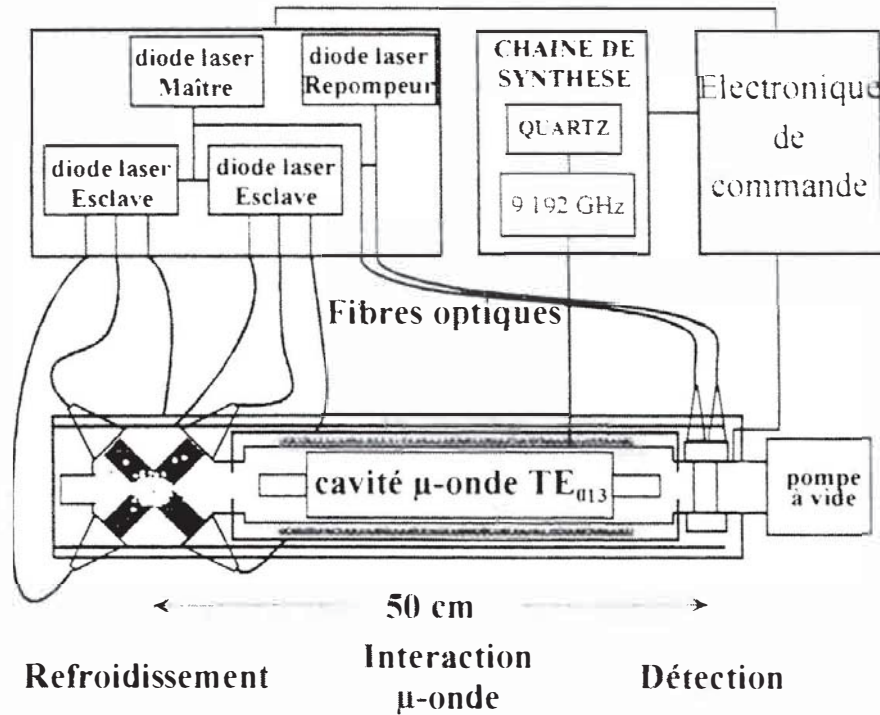


Fig. 1. Schema de principe du prototype d'horloge à atomes froids

2.1 Le banc optique

Le banc optique est enfermé dans un boîtier de dimension 65x65x15 cm. Les dimensions du banc optique ont été considérablement réduites en comparaison avec celles de la fontaine atomique. La température du boîtier est asservie autour de 30°C. Huit fibres optiques relient le banc au tube à vide : six pour la melasse optique, deux pour la détection. Nous utilisons des fibres optiques monomodes et polarisantes. La puissance de sortie de chaque fibre optique est asservie au moyen de lames à cristaux liquides à retard variable. La puissance laser vue par les atomes est ainsi stabilisée à mieux que 10^{-3} avec un temps de réponse d'une dizaine de millisecondes.

Quatre diodes lasers délivrent tous les faisceaux nécessaires à l'expérience. Un laser maître est asservi à une fréquence inférieure de 2 MHz par rapport à la transition hyperfine $F=4 \rightarrow F'=5$ de la raie D_2 du césium. Nous avons développé deux types de diode laser maître. Le premier est une diode à cavité étendue avec réseau de diffraction. Le deuxième est une diode laser DBR dont la largeur de raie est réduite par une reinjection optique sur une lame faiblement réfléchissante (quelques %) et un asservissement électronique rapide. Les deux lasers ont une largeur de raie dans la gamme des 100 kHz, bien plus faible que la largeur de la raie D_2 du césium ($\Gamma = 5\text{ MHz}$).

Une partie du faisceau du laser maître est injectée directement dans une fibre optique qui est connectée à la zone de détection de l'enceinte à vide. La puissance de sortie peut être ajustée jusqu'à 6 mW. Après un double passage dans un modulateur acousto-optique (MAO) qui fixe le désaccord de la melasse jusqu'à 12 Γ , l'autre partie du faisceau injecte deux diodes lasers esclaves de puissance. Grâce à cette injection, les 2 diodes lasers adoptent les propriétés spectrales du laser maître. Ces diodes de puissance génèrent les faisceaux de melasse. Leur puissance de sortie est de 150 mW.

Après un double passage dans un MAO, chaque faisceau des 2 lasers esclaves est divisé en trois faisceaux qui sont injectés dans les fibres optiques de refroidissement. La puissance maximale de sortie de chacune des fibres est de 13 mW. Par différence de fréquence $\Delta\nu$ entre les deux AOM esclaves, nous communiquons aux atomes froids une vitesse de lancement V donnée par la relation

$$V = \sqrt{3} \Delta\nu \lambda$$

où λ est la longueur d'onde optique. V peut être ainsi ajustée entre 0,5 m/s et 8 m/s. Les AOM esclaves permettent également une extinction rapide des faisceaux lasers. Une diode laser DBR supplémentaire est asservie sur la transition $F=3 \rightarrow F=4$ de la raie D_2 du césium. Une partie du faisceau (quelques mW) est prélevée et mélangée à quatre des faisceaux de mélasse optique pour recycler les atomes dans l'état $F=4$ au cours du processus de refroidissement. L'autre partie du faisceau (100 μ W) est injectée dans la deuxième fibre optique de détection. Pour éliminer toute lumière parasite au moment de l'interaction entre les atomes et la micro-onde, des obturateurs mécaniques assurent une extinction complète de tous les faisceaux.

2.2 L'enceinte à vide

L'enceinte à vide est un cylindre de 1 m de hauteur et de 300 mm de diamètre. Sa température est asservie à 35 °C. Dans la zone de refroidissement règne une vapeur de césium de faible pression (10^{-8} Pa). Les six fibres de la mélasse sont connectées à des collimateurs vissés autour de la zone de refroidissement. En sortie, le diamètre des faisceaux est de 16 mm. Les faisceaux de mélasse forment trois paires de faisceaux contre-propageants. Chaque paire est orthogonale aux autres. La polarisation de chacun des faisceaux est perpendiculaire à celle du faisceau contre-propageant [1]. Les atomes sont lancés par la technique de mélasse mouvante, dans la direction [1,1,1] du trièdre formé par les faisceaux [9]. Dans cette géométrie, seules deux fréquences différentes sont nécessaires pour lancer les atomes (il faut trois fréquences dans la fontaine atomique), et aucun faisceau ne traverse la cavité, celle-ci limiterait le diamètre du faisceau à 1 cm et réduirait le nombre d'atomes froids capturés. La zone de refroidissement est un polyèdre de titane dont les tolérances angulaires sont au niveau de 10^{-4} radian. La direction de la vitesse de lancement résultante est déterminée avec une incertitude de $5 \cdot 10^{-2}$ radian. La superposition des faisceaux contre-propageants est assurée à mieux que 0,1 mm. Ainsi, les tolérances mécaniques de fabrication assurent une excellente reproductibilité de l'alignement optique après démontage et montage des optiques de collimation.

La pression de vapeur de césium dans les zones d'interaction et de détection est de quelques 10^{-8} Pa, pour éviter les collisions pendant l'interaction micro-onde et la fluorescence parasite émise par ces atomes chauds dans la zone de détection. La qualité du vide est assurée par une pompe ionique et des tubes en graphite qui piègent les atomes de césium.

La cavité micro-onde, en cuivre, est cylindrique, mesure 20 cm de long et est utilisée dans le mode TE_{011} . Le facteur de qualité en charge est de plusieurs milliers. Cette cavité est suffisamment longue pour que les atomes y passent la moitié de leur temps de vol. Le diamètre des trous à chaque extrémité de la cavité est relativement grand (1 cm) pour laisser le passage à un grand nombre d'atomes froids sans trop perturber la distribution d'amplitude et de phase du champ micro-onde dans la cavité. Afin d'éviter les fuites micro-onde, des guides sous-coupeure sont placés aux extrémités de la cavité. Leur longueur est de 8 cm.

Dans la zone d'interaction, un champ magnétique de quelques mG, très homogène, est fourni par un long solénoïde et un blindage en μ -métal. Deux bobines de compensation et trois autres blindages magnétiques assurent l'homogénéité de la direction du champ magnétique tout le long de l'enceinte à vide. L'atténuation totale d'un champ magnétique extérieur parallèle à l'axe du tube est de 10^5 au centre de la cavité. L'atténuation du champ transverse n'est pas mesurable.

Après le passage des atomes dans la cavité, la population des deux niveaux hyperfins de la transition d'horloge est mesurée indépendamment par la fluorescence induite par deux faisceaux

lasers. Deux fibres optiques sont connectées à la zone de détection. Chaque faisceau est collimaté à un diamètre de 1 cm. Le faisceau asservi sur la transition $F=4 \rightarrow F=5$ est divisé en deux : une partie pour détecter directement les atomes dans l'état $F=4$. L'autre partie est mélangée au faisceau asservi sur $F=3 \rightarrow F=4$ pour détecter les atomes dans l'état $F=3$. Les deux faisceaux de détection sont parallèles et diaphragmés pour obtenir des faisceaux de section 10×5 mm séparés de quelques mm. Leur polarisation est circulaire et leur direction est perpendiculaire à la vitesse atomique. Un miroir placé de l'autre côté du tube à vide, retro-reflecte les deux faisceaux de façon à former des ondes stationnaires. Seule, la partie haute du premier faisceau $F=4$ n'est pas réfléchi. Ainsi les atomes dans l'état $F=4$ sont tout d'abord détectés dans l'onde stationnaire puis sont expulsés par l'onde progressive. Les atomes restants, dans le niveau $F=3$, sont pompés optiquement vers $F=4$ et détectés sur la transition $F=4 \rightarrow F=5$. Deux condenseurs collectent environ $5 \cdot 10^{-6}$ de la fluorescence émise par les atomes. Les signaux de fluorescence sont numérisés et traités par l'ordinateur. La distance entre la zone de refroidissement et la zone de détection est de 40 cm.

2.3 La chaîne de fréquence

Le signal micro-onde à 9 192 GHz est synthétisé à partir d'un quartz à 10 MHz multiplié en fréquence par 100 puis par 92. Le signal résultant à 9,2 GHz est alors mélangé avec un synthétiseur à 7,3 MHz piloté par l'ordinateur pour atteindre la fréquence de résonance atomique à 9 192 GHz. L'ensemble de la chaîne est enfermé dans une boîte en mu-métal pour réduire les effets du champ magnétique sur la fréquence délivrée par la chaîne. La stabilité de fréquence de la chaîne est de $1,8 \cdot 10^{-13}$ sur 1 s. Pour valider ses performances, nous l'avons utilisée comme oscillateur local sur la fontaine atomique. Nous avons mesuré une stabilité de fréquence de $1,5 \cdot 10^{-13} \tau^{-1/2}$. La particularité de cette chaîne est qu'elle repose sur l'utilisation d'un quartz de faible sensibilité accélérométrique. Ce quartz a été réalisé par le LCEP [10] et possède une sensibilité relative de fréquence de $5 \cdot 10^{-11}g$ ou g est l'accélération terrestre. Ce niveau de sensibilité est nécessaire pour conserver une fréquence stable pendant les vols paraboliques.

3 PREMIERS RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Le prototype d'horloge fonctionne au laboratoire depuis septembre 1996. Le nombre d'atomes froids détectés à chaque cycle est de quelques 10^7 . La température des atomes a été évaluée à 10 μ K. Les fluctuations du nombre d'atomes demeurent inférieures à 10^{11} en valeur relative d'un cycle à l'autre. À cause de la gravité, la vitesse de lancement optimum est de 4 m/s. Cette vitesse correspond à un temps d'interaction des atomes avec le champ micro-onde de 58 ms. La figure 2 montre les courbes de résonance de la transition hyperfine $F=4, m_f=0 \rightarrow F=3, m_f=0$ obtenues expérimentalement et théoriquement. La forme inhabituelle de la résonance provient de la cavité micro-onde utilisée dans le mode TE_{011} . Il existe un très bon accord entre les deux courbes sauf sur la deuxième bande latérale. Ce faible écart est probablement dû à la modélisation imparfaite de l'amplitude du champ micro-onde dans la cavité. La largeur de la frange centrale est de 13 Hz avec un contraste de 96 %. Le rapport signal à bruit est égal à 300 par cycle.

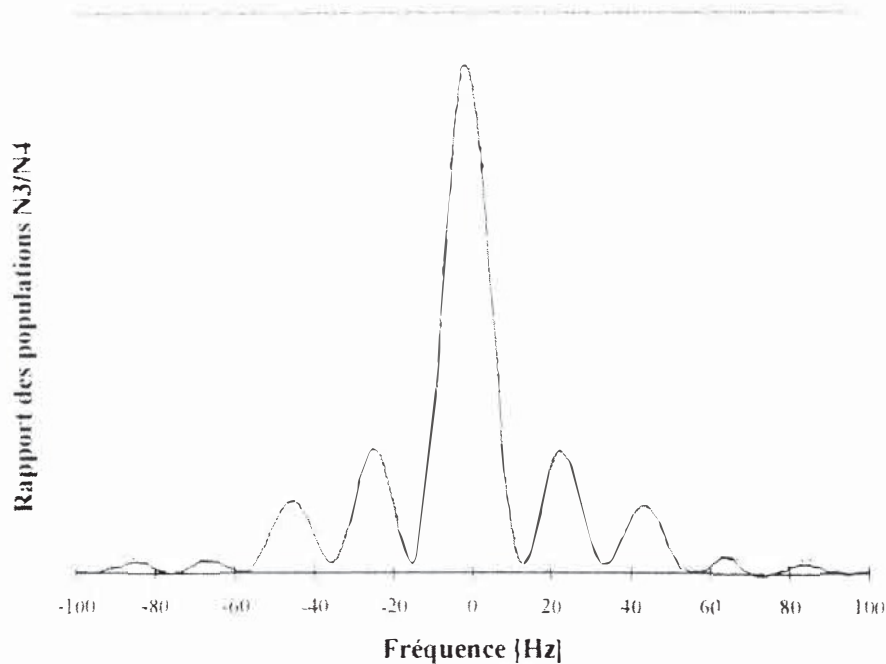


Fig 2. Courbes de resonance de la transition d'horloge. Nous avons trace le rapport N_3/N_4 des populations des 2 niveau hyperfins $F=3, m_f=0$ et $F=4, m_f=0$. La resonance experimentale est tracee en noir. La vitesse de lancement des atomes est de 4 m/s . Le pas du balayage en frequence est 1 Hz . Les donnees ne sont pas moyenees. La resonance obtenue par simulation numerique est tracee en gris. Les deux courbes de resonance sont volontairement decalees pour les distinguer.

A la fin du mois de Mai 1997, nous avons transporte par la route le prototype a Bordeaux pour la premiere campagne de vols paraboliques dans l'Airbus ZERO-G du CNES. La temperature elevee de l'atmosphere ($30-35^\circ\text{C}$), superieure aux temperatures de consigne des asservissements, nous a empêche de bien optimiser les reglages de l'experience. Malgre cela nous avons reussi a faire fonctionner le prototype en vols paraboliques. Il faut rappeler que les conditions de vols sont assez severes avec des changements d'acceleration de $1g, 2g, 0g, 2g, 1g$ par parabole (31 paraboles par vol, g est l'acceleration terrestre). Le nombre de parametres de l'experience etant relativement eleve, il etait necessaire que le dispositif fonctionne pendant plusieurs paraboles sans aucune intervention humaine. Les figures 3 et 4 montrent le signal de resonance que nous avons mesure pendant les phases de gravite reduite. Sur la figure 3, la vitesse de lancement des atomes est de 4 m/s comme au laboratoire. La largeur du pic central est de 14 Hz . Sur la figure 4 la vitesse de lancement est divisee par 2. La largeur du pic central est de 7 Hz . Le rapport signal a bruit est moins eleve parce que nous perdons des atomes a la detection a cause des fluctuations d'acceleration pendant les paraboles (de l'ordre de quelques $10^{-2}g$) et de la rotation de l'avion (100° en 20 s). Il faut rappeler que sur terre, a la vitesse de 2 m/s , les atomes n'atteignent pas la zone de detection. C'est la premiere fois qu'il est demontre experimentalement que des conditions de gravite reduite ameliorent la spectroscopie a tres haute resolution.

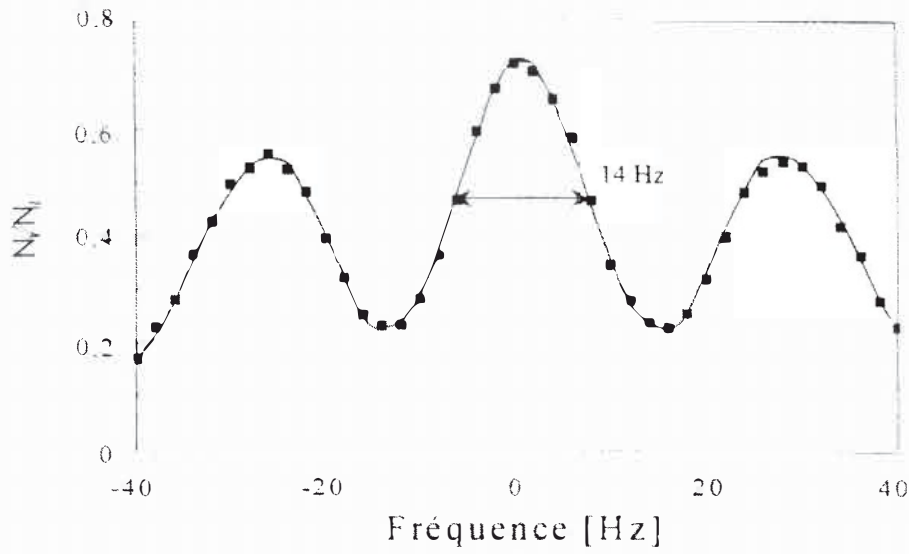


Fig 3 - Courbe expérimentale de résonance obtenue en gravité réduite pendant les vols paraboliques. La vitesse de lancement des atomes est de 4m/s.

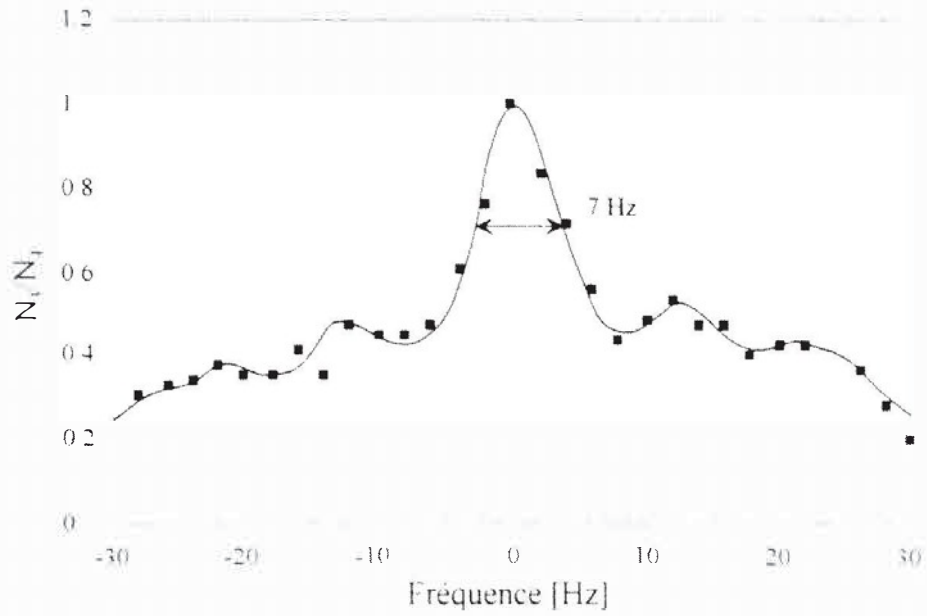


Fig 4 - Courbe expérimentale de résonance obtenue en gravité réduite pendant les vols paraboliques. La vitesse de lancement des atomes est de 2m/s.

4 PERSPECTIVES

Les performances du prototype seront prochainement évaluées au sol. Pour déterminer les effets dus à la cavité TE_{010} , le prototype sera modifié pour fonctionner alternativement dans le mode actuel ou dans un mode à double passage dans la cavité comme dans la fontaine atomique. Par comparaison avec la fontaine atomique, nous espérons mesurer une stabilité de fréquence dans la gamme des 10^{-16} sur une journée d'intégration. Après ces expériences, cette horloge transportable permettra de réaliser des comparaisons d'horloges distantes au niveau de quelques 10^{-16} .

Le succès de la première campagne de vols paraboliques ouvre la voie vers la réalisation d'une horloge spatiale à atomes froids. Une première mission spatiale, ACES [11], a été proposée à l'Agence Spatiale Européenne dans le cadre de l'utilisation de la future station internationale ISS. En plus de l'horloge à atomes froids, d'autres étalons de fréquences et des moyens de transfert temps/fréquence seront embarqués à bord de la station. Cette mission a plusieurs objectifs. Le premier est de valider les performances de tous les systèmes embarqués. Pour l'horloge à atomes froids, nous étudierons ses propriétés de stabilité et d'exactitude de fréquence en fonction du temps d'interaction des atomes. Le but est d'atteindre une stabilité sur un jour et une exactitude au niveau de 10^{-16} . Le deuxième objectif est de profiter des performances exceptionnelles de cette horloge dans le domaine de la métrologie : distribution d'une échelle de temps de haute précision à l'échelle du globe, navigation et positionnement, etc. et dans le domaine de la physique fondamentale : test de l'isotropie de la vitesse de la lumière, mesure du décalage gravitationnel vers le rouge, mesure d'une éventuelle dérive de la constante de structure fine. Ces expériences pourraient être la genèse d'un programme spatial beaucoup plus ambitieux.

Remerciements

Le programme PHARAO est soutenu par le Centre National d'Etudes Spatiales. Le développement du prototype a aussi reçu le soutien du BNM, de la région Ile de France, du Collège de France et du CNRS. M. Lours, M. Dequin, P. Avnie, A. Gerard, J. Olejnik et D. Guitard ont apporté leur concours pour la réalisation du prototype.

RÉFÉRENCES

- ¹ C. Salomon et al., Europhys. Lett., **12** (8), 1990.
- ² A. Clairon et al., IEEE Trans. on Instr. and Meas., vol. **44**, N°2, April 1995.
- ³ E. Simon et al., Proc. of the 11th EFTF, Neuchâtel (Switzerland).
- ⁴ Proc. of the 25th Moriond conference on dark matter, cosmology, ultra-stable clocks and fundamental tests.
- ⁵ A. Clairon et al., Europhys. Lett., **16**, 165 (1991).
- ⁶ J.L. Hall et al., J. Opt. Soc. Am. B., **6**, 2194 (1989).
- ⁷ P. Lett et al., J. Opt. Soc. Am. B., **6**, 2084 (1989).
- ⁸ Institut de Recherche en Communications Optiques et Microondes, Université Limoges, 123 av. Albert Thomas, 87060 Limoges.
- ⁹ K. Gibble et al., Phys. rev. Lett., **70**, 1993.
- ¹⁰ Laboratoire de Chronométrie Electronique et Piezoelectrique, 26 chemin de l'épithaphe, 25030 Besançon, France.
- ¹¹ Atomic Clock Ensemble in Space, a proposal to ESA SP1201.