

## COMPRENDRE

# Mesurer l'accélération avec des ondes de matière : de la gravimétrie à la navigation

Philippe BOUYER

LP2N, UMR 5298 du CNRS,  
de l'IOGS et de l'Université  
de Bordeaux,

Institut d'Optique d'Aquitaine,  
rue François Mitterrand,  
33400 Talence, France

[philippe.bouyer@institutoptique.fr](mailto:philippe.bouyer@institutoptique.fr)

Refroidis proche du zéro absolu, les atomes se comportent non plus comme des particules, mais comme des ondes de matière dont la propagation peut conduire à des phénomènes d'interférence. Ces interférences peuvent être exploitées pour mesurer l'accélération avec une très haute précision. Les capteurs inertiels quantiques qui en découlent sont aujourd'hui des dispositifs prometteurs de nombreuses applications comme le guidage et la navigation, ou la gravimétrie ultra-précise.

Depuis sa première démonstration à la fin des années 1980, l'interférométrie à ondes de matière [1] s'est révélée être un outil de choix pour mesurer avec précision les constantes fondamentales, tester des modèles ultra précisément ou mesurer sans biais les effets inertiels. Ainsi, la sensibilité des capteurs quantiques basés sur l'interférométrie atomique à l'accélération ou la rotation a montré qu'ils pouvaient concurrencer, voire dépasser, l'état de l'art des capteurs basés sur d'autres technologies. La haute stabilité et la précision de ces capteurs sont à la base de plusieurs applications allant de la physique fondamentale (par exemple les tests de la relativité générale et des mesures de constantes fondamentales), à la géophysique (gravimétrie, gradiométrie) et la navigation inertielle.

Aujourd'hui, à l'image du développement des horloges atomiques [2], la recherche en interférométrie atomique s'oriente à la fois vers la physique fondamentale et les applications. Dans le premier cas, un des enjeux est d'atteindre des sensibilités ultimes en exploitant les fondements de la physique quantique et de l'interaction matière-rayonnement; l'autre enjeu est d'utiliser ces instruments pour des tests de physique fondamentale, comme la détection des ondes gravitationnelles [3] ou le test du principe d'équivalence. Dans le second cas, la recherche repose sur l'innovation dans les concepts et dans les briques technologiques-clés. Ainsi, des développements technologiques considérables ont été réalisés et ont permis la mise sur le marché des premiers gravimètres et horloges à atomes froids opérant à très hautes précision et exactitude (voir *figure 1*). Aujourd'hui, les enjeux scientifiques et technologiques sont l'embarquabilité, la compacité, la continuité de la mesure ainsi que l'opération de ces capteurs en environnement réel et en

présence d'autres instruments de mesure. Répondre à ces défis permettra d'étendre encore les domaines d'utilisation de ces capteurs quantiques, vers la gravimétrie embarquée, la navigation et le positionnement.

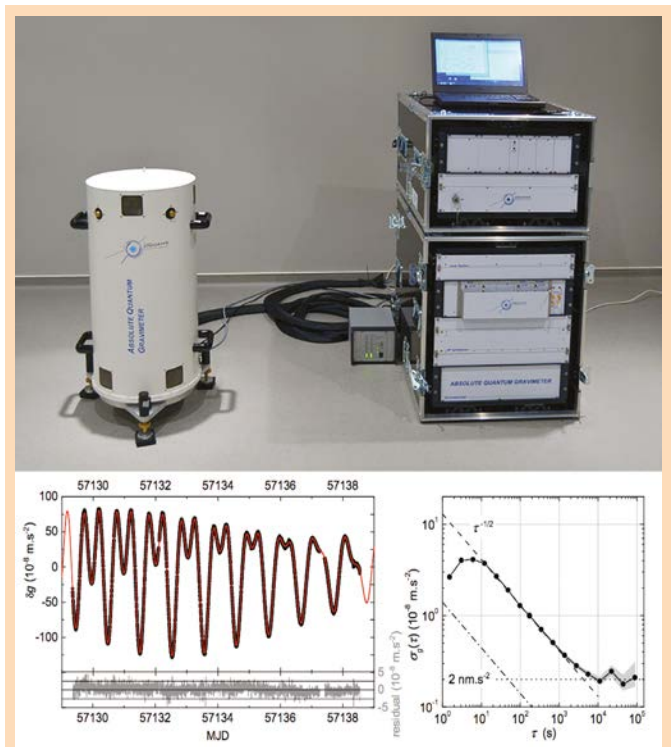


Figure 1. Gravimètre transportable AQQ-01 commercialisé par la société μQuans ([www.muquans.com](http://www.muquans.com)). Mesure de la variation temporelle de la pesanteur et exemple de courbe d'intégration de la valeur de la pesanteur en un point, mesurée avec le gravimètre développé au LNE-SYRTE [4].

## Des ondes de matière à la pesanteur : la gravimétrie

La gravimétrie est un domaine de la géophysique consacré à la mesure et l'étude de la pesanteur, c'est-à-dire de l'accélération que subit un corps au repos à la surface de la Terre (ou de toute autre planète), sous l'influence de la force gravitationnelle exercée par la Terre, des autres astres (Lune, Soleil, planètes), ainsi que de l'effet centrifuge dû à la rotation de la Terre. Globalement, l'accélération de la pesanteur vaut à peu près  $9,8 \text{ m/s}^2$  à la surface de la Terre, mais cette valeur varie selon l'endroit, en raison par exemple de la forme non-sphérique du globe ou de la répartition hétérogène des différentes masses avoisinantes. Elle varie également de façon temporelle sous l'influence des marées, ou à cause des mouvements tectoniques.

Les géophysiciens ont besoin de mesurer l'accélération de la pesanteur avec une grande précision. Il faut que l'erreur de mesure, c'est-à-dire la différence entre la valeur mesurée et la valeur réelle, soit la plus faible possible en permanence. La variation de pesanteur à la surface de la terre reste relativement importante ; elle varie entre  $9,83 \text{ m/s}^2$  au pôle où le « rayon » de la terre est le plus faible, et  $9,78 \text{ m/s}^2$  à l'équateur où la croûte terrestre est le plus éloignée du centre de la Terre. Il existe cependant de nombreux phénomènes induisant d'infimes variations de la pesanteur. Ainsi, les variations induites par la déformation de la terre provoquée par les marées (la surface de la Terre monte et

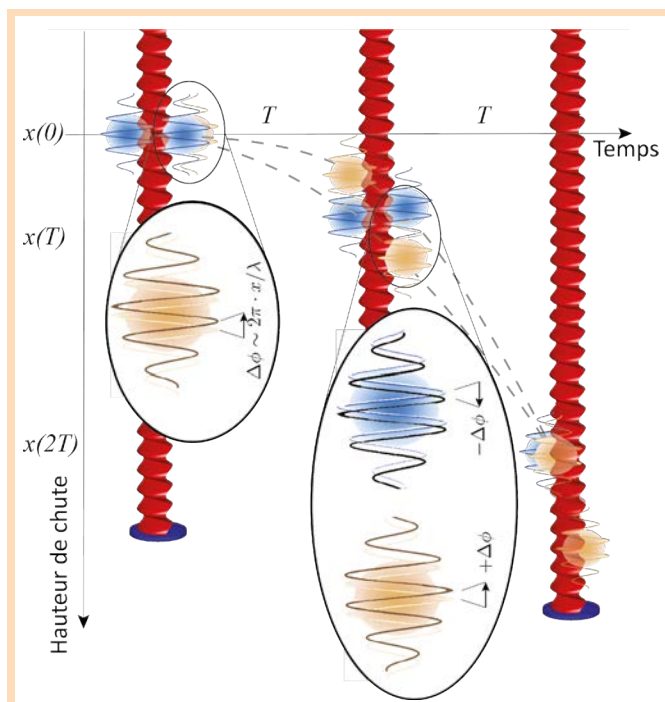
descend de plusieurs dizaines de cm en moyenne) entraînent une modulation quotidienne de la pesanteur d'environ  $3 \mu\text{m/s}^2$ , soit 3 millions de fois moins que sa valeur absolue. Si l'on souhaite étudier voire cartographier le sous-sol, les variations que l'on doit détecter sont encore plus de 100 fois plus faibles. Il faut alors non seulement atteindre une sensibilité de mesure permettant de détecter des variations inférieures à quelques milliardièmes de l'accélération de la pesanteur, mais aussi s'assurer que l'appareil utilisé fournit effectivement une mesure pour laquelle les erreurs et biais sont connus à ce niveau, et ce sur des périodes allant de quelques semaines à quelques années.

L'appareil permettant d'atteindre ces performances se nomme un gravimètre absolu, et, jusqu'à l'avènement des technologies quantiques, la meilleure méthode était de mesurer par interférométrie laser la hauteur parcourue par un réflecteur à coin de cube en chute libre dans un tube dans lequel un vide poussé a été obtenu. Le gravimètre quantique s'inspire du même principe, mais ce ne sont plus des objets macroscopiques qui chutent, ce sont des paquets d'ondes de matière [1].

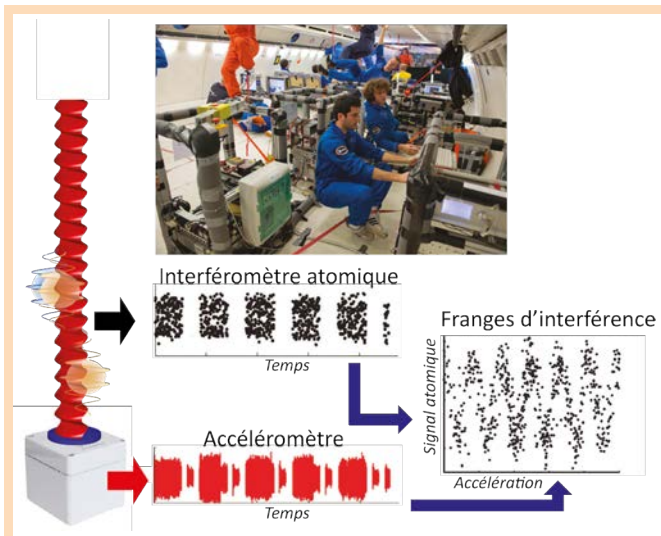
## Comment fonctionne un gravimètre quantique ?

Dans le gravimètre quantique, environ 1 million d'atomes sont refroidis dans un nuage de quelques centaines de micromètres de diamètre, à une température proche du zéro absolu. À cette température, chaque atome n'est plus qu'un paquet d'ondes dont le centre va évoluer comme son alter-ego classique, suivant ainsi une trajectoire en chute libre sous l'influence de la pesanteur. Trois impulsions laser vont successivement : (1) dédoubler le paquet d'onde et retarder légèrement la chute d'une des copies, créant ainsi deux chemins légèrement différents comme chaque bras d'un interféromètre ; (2) intervertir le retard à la chute entre les deux copies afin qu'elles se rejoignent à nouveau, et ainsi refermer l'interféromètre ; (3) fusionner les copies lorsqu'elles se rejoignent afin d'observer les interférences qui résulteraient d'un déphasage entre elles.

D'où vient ce déphasage ? Chaque fois que l'impulsion lumineuse – très fréquemment une onde stationnaire réalisée par l'interférence de deux ondes laser se propageant dans des directions opposées – va influencer la trajectoire d'une des copies du paquet d'onde, elle va induire un léger déphasage proportionnel à  $2\pi \cdot x / \lambda$ , où  $x$  est la position du centre du paquet d'onde dans l'onde laser et  $\lambda$  la longueur d'onde du laser, et dont le signe variera si l'on retarde ou si l'on accélère la chute de la copie du paquet d'onde. Le déphasage final est alors directement proportionnel à la distance parcourue par le paquet d'onde entre la première et la dernière impulsion, soit  $\Delta\phi_g \sim \frac{4\pi}{\lambda} \cdot g \cdot T^2$  où  $T$  est le temps d'interrogation entre les impulsions lumineuses. Dans la majorité des dispositifs, est de l'ordre de 50 ms, le déphasage vaut alors presque 400 000 radians pour une accélération de  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Si l'on peut mesurer ce déphasage avec une résolution de 1 mrad



**Figure 2.** Principe de fonctionnement d'un gravimètre quantique. Un paquet d'ondes de matière, résultant du refroidissement des atomes à une température proche du zéro absolu, est éclairé 3 fois de suite par une impulsion lumineuse. À chaque fois que le paquet d'onde est modifié par l'impulsion, sa phase est modifiée d'une quantité  $\Delta\phi$  proportionnelle à la position de son centre de masse dans l'onde lumineuse.



**Figure 3.** Illustration de la corrélation entre un accéléromètre à ondes de matière et un accéléromètre classique tels qu'utilisés lors des expériences de mesure dans l'Airbus 0-g de la société Novespace (en photo). Alors que les vibrations de l'avion ne permettent pas de faire ressortir le signal d'interférence, il est possible de reconstruire les franges en faisant correspondre à chaque mesure de l'interféromètre l'accélération correspondante lue avec une précision moindre. Cette méthode permet d'exploiter pleinement la précision du capteur quantique<sup>1</sup>.

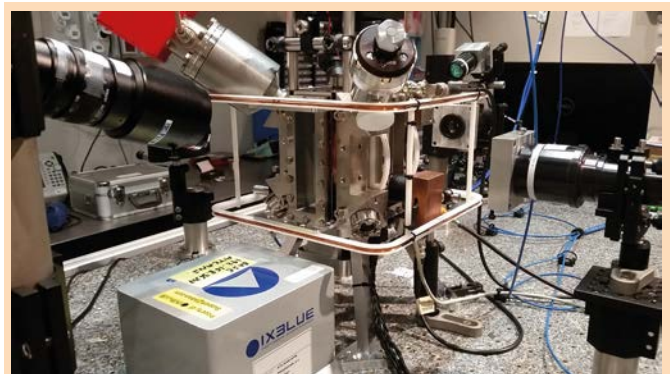
(soit un rapport signal à bruit de 1000 à la sortie de l'interféromètre), la variation d'accélération minimale que l'on pourra observer sera de l'ordre du microgal [5] : 1 milliard de fois plus petit que la pesanteur.

En pratique, il est nécessaire de mettre en oeuvre de nombreuses « astuces » pour que les gravimètres quantiques atteignent, voire dépassent ces performances. La première consiste à contrebalancer la variation de vitesse des atomes en chute libre, qui peut varier de plusieurs dizaines de centimètres par seconde sous l'influence de la pesanteur, en ajoutant un déphasage supplémentaire dans l'interféromètre, grâce à un balayage de la fréquence laser. Ce déphasage, proportionnel à  $\Delta\phi_\alpha \sim \alpha \cdot T^2$  où  $\alpha$  est la vitesse de balayage de la fréquence, pourra parfaitement compenser le déphasage gravitationnel et ainsi faire opérer l'interféromètre à différence de marche nulle. La deuxième consiste à compenser les vibrations qui, sur la durée, peuvent entraîner une mesure erronée de la pesanteur. Ceci peut être réalisé en plaçant le capteur dans un endroit calme (comme pour les courbes de la figure 1), ou sur une plateforme stabilisée. L'autre méthode consiste à corréler les mesures du capteur avec celle d'un interféromètre classique moins performant (voir figure 3). On garantit ainsi non seulement la possibilité d'intégrer la mesure gravimétrique sur de longues périodes, mais aussi la possibilité de faire fonctionner l'appareil n'importe où, offrant ainsi une embarquabilité qu'aucun autre gravimètre ne peut concurrencer [6].

<sup>1</sup> Le Gal est l'unité utilisée en gravimétrie. Elle correspond à une accélération de 1 cm/s<sup>2</sup>. L'accélération de la pesanteur vaut environ 981 Gal.

## Aller plus loin avec les capteurs quantiques : cartographie, navigation et positionnement

Outre les méthodes permettant de faire fonctionner les capteurs quantiques sur un véhicule en mouvement – en microgravité dans un vol parabolique comme pour l'expérience ICE du CNES, sur bateau comme le test effectué par l'ONERA et le SHOM – l'enjeu de l'embarquabilité va beaucoup plus loin. Réaliser des capteurs plus compacts, plus fiables, et capables d'opérer dans une gamme de température extrême permettra d'étendre l'application de la gravimétrie à la cartographie gravimétrique embarquée. En survolant (ou naviguant) au dessus des zones géographiques, il devient possible d'enregistrer les variations spatiales du champ de gravité ou de son gradient, et de réaliser une cartographie du gradient de gravité utilisable soit pour détecter des ressources souterraines, soit pour se positionner précisément. Pour ce faire, il devient nécessaire de corréler le capteur quantique avec un système de positionnement complémentaire (GPS ou, mieux, centrale inertielle embarquée). Les premiers dispositifs de centrale inertielle hybride quantique/classique sont déjà à l'étude (figure 4), et plusieurs consortiums industrie/académie en France, en Angleterre et aux USA par exemple ont relevé le défi de pousser encore plus loin l'intégration de cette technologie.



**Figure 4.** Image des premiers essais de centrale inertielle hybride dans le cadre du programme commun entre le LP2N et la société iXBlue.

### POUR EN SAVOIR PLUS

- [1] P. Bouyer, Comprendre les senseurs inertiels basés sur l'interférométrie atomique, *Photoniques* 44, nov.-déc. 2009
- [2] C. Salomon, À quoi servent les horloges atomiques : [http://www.lemonde.fr/sciences/video/2015/02/25/a-quoi-servent-les-horloges-atomiques\\_4583091\\_1650684.html](http://www.lemonde.fr/sciences/video/2015/02/25/a-quoi-servent-les-horloges-atomiques_4583091_1650684.html)
- [3] D. Larousserie, Les secousses souterraines de l'espace-temps, *Le Monde Science et Techno*, 17 oct. 2016. En savoir plus sur <https://www.coldatomsbordeaux.org/miga>
- [4] B. Fang et al., Metrology with atom interferometry: inertial sensors from laboratory to field applications, *Journal of Physics : Conference Series* 723 (2016) 012049. En savoir plus sur <https://arxiv.org/abs/1601.06082>