

Les technologies quantiques pour l'étude de la Terre et la physique fondamentale

Des physiciens français du laboratoire Systèmes de référence temps-espace (CNRS/Observatoire de Paris/UPMC, associés au LNE) et du Laboratoire de physique des lasers (CNRS/Université Paris 13), et allemands du Physikalisch-Technische Bundesanstalt viennent pour la première fois de mesurer la différence de rythme de deux horloges atomiques ultra-précises situées l'une à Paris et l'autre à Braunschweig, distantes de plus de 700 kilomètres, grâce à une liaison par fibre optique. Cette comparaison est 20 fois plus précise que les comparaisons actuelles d'horloges qui reposent sur le système GPS, et la mesure est 10 000 fois plus rapide à résolution égale. La différence relative de fréquence observée, de deux milliardièmes de milliardième, est la signature d'un effet de relativité générale qui affecte les horloges situées à des altitudes différentes, ici 20 mètres d'écart. Les équipements installés sur la partie française de la liaison fibrée et développés par les laboratoires LNE-Syrté et LPL, avec un soutien crucial de l'équipe et du réseau Renater¹, font l'objet d'un transfert de savoir-faire en direction de trois PME françaises – Muquans (qui assure la coordination), Syrlinks et Kéopsys – dans le cadre de l'Equipex Refimeve². Ces développements constituent l'un des piliers du projet de flagship européen « Quantum Technologies ». Ces travaux sont publiés le 9 août 2016 dans la revue *Nature Communications*.

Au cours des dernières années, les horloges atomiques optiques, où un laser sonde une transition de référence entre deux niveaux quantiques d'un atome, ont connu des progrès très spectaculaires. Ces horloges sont 100 fois plus précises que les horloges à césium qui servent actuellement à définir la seconde du Système international d'unités. Cette précision n'était jusque-là utilisable qu'à proximité immédiate de l'horloge car les systèmes utilisés pour transmettre le signal d'horloge par voie satellitaire comme le GPS sont loin d'avoir la précision suffisante. Pour pallier cette difficulté, des physiciens français et allemands ont choisi de transporter les signaux d'horloge au moyen d'un faisceau laser conduit dans une liaison par fibre optique de 1400 km. Pour cela, ils ont dû compenser l'atténuation de la lumière laser et les fluctuations introduites lors de sa propagation dans la fibre. Ils ont conçu et réalisé des amplificateurs et des répéteurs qui régénèrent le signal d'horloge en rendant négligeables ces fluctuations. Ils ont montré que cette méthode par fibre optique possède une résolution de 10^{-19} , environ 10 000 fois meilleure que le GPS, très largement suffisante pour comparer les horloges quantiques du SYRTE et du PTB. Ces horloges ont révélé une différence de fréquence relative de $2 \cdot 10^{-15}$, qui reflète exactement les prédictions de la relativité générale pour la différence d'altitude de 20 mètres entre les deux sites. L'incertitude de ces horloges, qui vaut $5 \cdot 10^{-17}$, est donc 40 fois plus petite que l'effet observé (elle équivaut à une différence d'altitude de 50 cm), et montre la bonne maîtrise des effets affectant les horloges à Paris et à Braunschweig.

Les horloges ultra-précises sont au cœur des systèmes de communication, du positionnement par satellite, ... Les performances actuelles de la liaison par fibre optique repoussent très loin les limites des comparaisons d'horloges et des nombreuses applications qu'on peut en attendre. Dans les années à venir, la précision de ces nouvelles horloges quantiques devrait excéder 10^{-18} , soit le milliardième de milliardième. A ce niveau de précision, la mesure du rythme de ces horloges conduira à une sensibilité en altitude meilleure que le centimètre, ce qui excède les méthodes actuelles les plus performantes de géodésie, et ouvre le champ de la géodésie chronométrique³. Ces horloges quantiques deviennent ainsi des senseurs gravitationnels ultrasensibles.

¹ Réseau national de télécommunications pour la technologie, l'enseignement et la recherche

² Réseau fibré métrologique à vocation européenne

³ La géodésie chronométrique consistera à mesurer très précisément les altitudes, et donc la forme de la Terre, à partir des petites différences de rythme qui affectent ces horloges en fonction de l'altitude.

Les enjeux de la distribution par fibre optique de ces signaux ultra-précis sans aucune dégradation sont considérables. Les retombées scientifiques seront très importantes, notamment dans le domaine des mesures de très grande précision, dans des expériences de test de relativité générale avec des horloges en orbite (future mission spatiale ACES⁴) ou de physique fondamentale comme la recherche de matière noire, ou dans la synchronisation d'expériences sur de grandes distances. Ainsi le projet Refimeve+ œuvre à distribuer le signal métrologique des horloges quantiques à 20 laboratoires en France à travers le réseau Renater (en parallèle du flux de données internet), pour des mesures à un haut niveau de précision. Cette mutualisation des ressources optiques permet l'optimisation des investissements pour des résultats inimaginables auparavant.

A l'échelle européenne, l'enjeu est la construction d'un réseau unique au monde des laboratoires nationaux de métrologie, connectés par fibre optique, et le positionnement de l'Europe comme leader dans la future définition du temps international.

De nombreuses retombées industrielles et économiques sont également attendues.



Chemin de la liaison optique de 1415 km entre le Syrte en France et le PTB en Allemagne. Les points rouges, violets et bleus marquent les lieux où les équipements scientifiques conçus par les chercheurs franco-allemands ont été installés (Copyright : LNE-Syrte/ Meynadier / Le Targat / Pottie)

⁴ Atomic Clock Ensemble in Space