

Le réseau REFIMEVE : le temps et la fréquence de haute performance à la portée de tous

Christian CHARDONNET*

Directeur de l'Infrastructure de Recherche REFIMEVE

Laboratoire de Physique des Lasers, UMR 7538 CNRS/Université Sorbonne Paris Nord, Villetaneuse

* chardonnet@univ-paris13.fr



<https://doi.org/10.1051/photon/202413024>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

Nous présentons ci-dessous comment des développements photoniques des années 2000 qui ont permis de transporter par fibre optique des signaux d'horloges avec une erreur résiduelle inférieure à 10^{-19} sont en passe de révolutionner des domaines bien au-delà de la métrologie. Le réseau REFIMEVE reposant sur cette technologie dessert aujourd'hui 30 laboratoires en France et assure le lead d'un projet d'infrastructure européenne appelé FOREST. L'impact concerne la physique fondamentale, l'astrophysique, la physique des hautes énergies, les sciences de la Terre et de l'environnement mais les impacts sociétaux promettent d'être très nombreux.

Contexte général

La société est devenue extrêmement dépendante des services PNT (Positioning, Navigation and Timing) fournis par les systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS – Global Navigation Satellite System), tels que le GPS américain et le système européen Galileo. Ces services sont rendus possibles par des horloges atomiques à bord de satellites, qui leur permettent de transmettre des messages temporels de grande précision. Malgré leurs performances et leur impact,

les GNSS sont un frein à de nouvelles innovations. Les performances actuelles des GNSS sont un facteur limitant en radioastronomie et pour les réseaux quantiques. Elles ne permettent pas une redéfinition de la seconde basée sur des horloges optiques qui atteignent des exactitudes relatives de 10^{-18} ! En outre, les services GNSS peuvent être totalement perdus en raison de causes naturelles (par exemple une éruption solaire) ou d'un brouillage accidentel ou intentionnel. Une panne des GNSS pourrait avoir des

effets désastreux sur l'économie¹ et les infrastructures vitales, ce qui a incité les législateurs (y compris la Commission européenne) à rechercher des solutions alternatives. Une technologie candidate particulièrement prometteuse est la distribution du temps et de la fréquence par des réseaux de fibres optiques, qui pourrait transformer les réseaux

¹ Une étude a estimé qu'une panne de GNSS de 7 jours pourrait coûter 7644 millions de livres sterling à l'économie britannique.

de télécommunications existants en systèmes terrestres pour les services PNT au-delà du GNSS, la détection sismique à grande échelle, l'amélioration de la radioastronomie, la communication quantique et les nouvelles disciplines de recherche « en réseau ». L'infrastructure de recherche REFIMEVE et, à l'échelle européenne, le projet FOREST visent à concrétiser cette vision.

Contexte historique

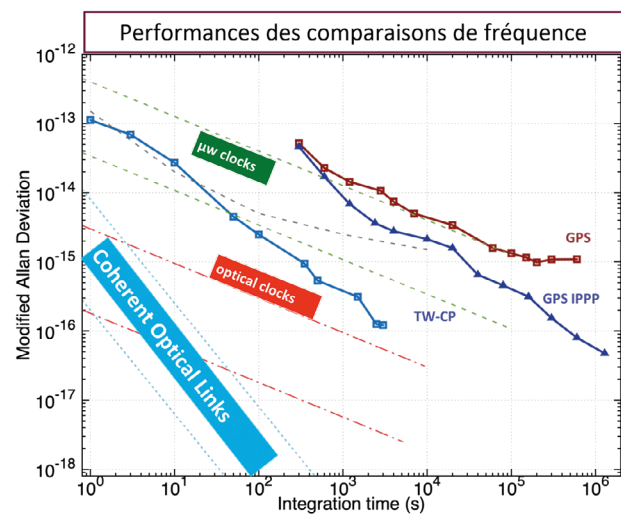
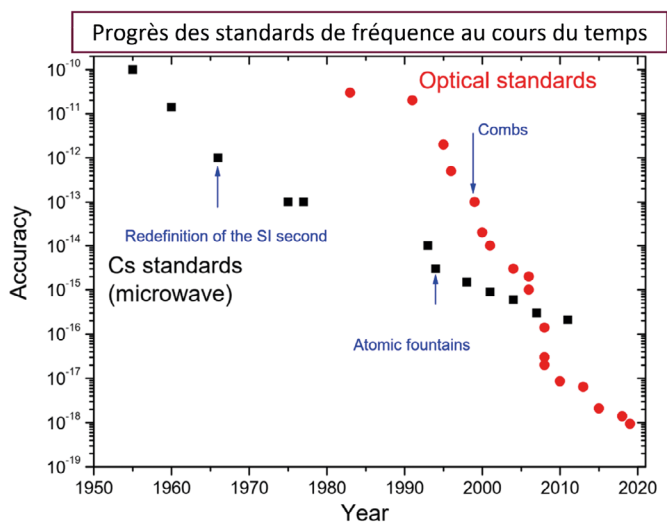
Les GNSS actuels sont basés sur la technologie des horloges atomiques inventée dans les années 1950, utilisant des signaux d'horloge dans la gamme des gigahertz. Cela détermine les erreurs de temps résiduelles (nanosecondes) qui peuvent être obtenues avec un récepteur GNSS par rapport au temps atomique international. La stabilité de fréquence du GNSS est également devenue largement insuffisante. Il faut dire que les horloges du GNSS n'ont pas bénéficié des 3 révolutions scientifiques majeures dont l'impact est illustré sur la Figure 1 (à gauche) : 1°/ l'utilisation du refroidissement des atomes par laser qui a remplacé les horloges à jet de césium par des fontaines atomiques, savoir-faire développé par le LTE (ex-SYRTE, ex-LPTF) dans les années 1990, 2°/ le développement de lasers femtosecondes à peignes

de fréquences qui ont remplacé des chaînes de fréquences d'une incroyable complexité et qui permettent de raccorder/comparer deux fréquences quelconques du spectre radiofréquence jusqu'à l'UV. 3°/ Cette seconde révolution a ouvert la voie à une troisième : le développement d'horloges dont la fréquence est dans le domaine optique. 6 ordres de grandeur ont ainsi été gagnés dans l'exactitude des horloges depuis 1967, année de la définition de la seconde basée sur une transition à 9,2 GHz du césium. Il n'existe pas de domaine de la mesure où de tels niveaux de précision sont atteints. C'est pourquoi sous l'impulsion du BIPM, une série d'unités physiques ont été raccordées à la seconde en fixant la valeur de quelques constantes fondamentales. La plus connue est la vitesse de la lumière fixée en 1983, ramenant ainsi la définition du mètre à celle de la seconde. La seconde est aujourd'hui la pierre angulaire du SI. Au vu des progrès

des horloges optiques, il devient tentant de définir la seconde par rapport à une (ou plusieurs) fréquence optique. Le BIPM a tracé une route exigeante pour y parvenir mais qui ne devrait pas déboucher avant une dizaine d'années.

Outre le choix de la (des) fréquence optique à sélectionner, le plus grand défi est de savoir comment assurer l'intercomparaison des horloges optiques des différents laboratoires de métrologie de la planète sans être limité par les performances des GNSS comme illustré sur la figure 1 (à droite). Le GPS, même en moyennant sur plusieurs jours est, de très loin, le facteur limitant dans la comparaison d'horloges optiques. Qui plus est, utiliser dans les satellites des horloges plus performantes ne servirait à rien car l'incertitude dominante résulte des fluctuations de phase des signaux dues à la traversée des basses couches de l'atmosphère. Sauf à rapprocher physiquement les horloges, le seul moyen de comparer au bon niveau des horloges optiques distantes est d'établir une liaison fibrée entre les deux laboratoires et d'injecter l'un des signaux d'horloge dans la fibre tout en corrigeant le bruit de phase rapporté lors de la propagation. Le signal transmis par la fibre est réinjecté à l'autre extrémité, effectuant ainsi un aller-retour. On réalise le battement entre ●●●

Figure 1. À gauche, les progrès de 6 ordres de grandeur des horloges atomiques depuis 1967. À droite, la révolution des liaisons par fibre optique avec un progrès de 5 ordres de grandeur par rapport au GPS pour les comparaisons des fréquences d'horloges.



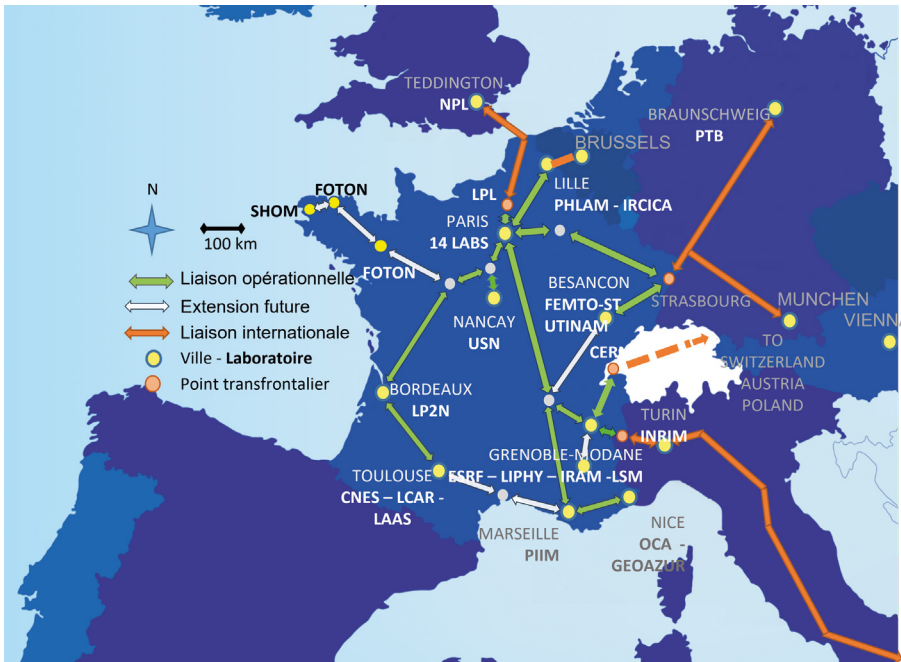


Figure 2. Carte du réseau REFIMEVE connectant 30 laboratoires avec ses extensions européennes vers l'Allemagne, l'Italie et le Royaume-Uni. Environ 10 connexions supplémentaires devraient avoir lieu en 2025.

le signal injecté et le signal retour. Ceci donne l'erreur de phase accumulée. On applique une correction égale, au signe près, à la moitié de l'erreur de phase mesurée de façon à ce que le signal à l'extrémité de la fibre soit affranchi du bruit induit lors de l'aller simple. Cette méthode suppose l'absence de bruits non réciproques qui ne peuvent pas être corrigés. Pour vérifier la fréquence arrivant dans le laboratoire distant, elle est renvoyée vers le laboratoire initial *via* une seconde fibre stabilisée selon le même procédé. Elle est dès lors comparée avec celle du signal initial. La bande passante de l'asservissement est limitée par le temps aller-retour de la lumière dans la fibre. Pour une fibre de 100 km, elle est de l'ordre d'un kHz. Ces développements pionniers ont été effectués dès les années 2000 sur une liaison entre le Laboratoire de Physique des Lasers (LPL) et le SYRTE (Observatoire de Paris) qui a en charge le temps atomique français et qui fournit aujourd'hui les signaux du réseau REFIMEVE. La première comparaison de deux horloges optiques a eu lieu en 2015 entre les horloges à Strontium du SYRTE (Paris) et du

PTB (Braunschweig) [2]. Ces deux laboratoires étaient reliés par une liaison fibrée de 1400 km. La comparaison a révélé une différence de fréquence relative de 2.10^{-15} , bien supérieure à l'incertitude cumulée des deux horloges évaluée à 5.10^{-17} . Cet écart s'interprète par le décalage gravitationnel que prévoit la relativité générale pour une différence d'altitude des deux horloges de 20m. Cette différence d'altitude a été confirmée par des méthodes de géodésie reposant sur le... GPS. Ce résultat pionnier a eu un gros impact et a ouvert la voie à la géodésie chronométrique ayant une incertitude potentielle du cm. Dans cette comparaison, la contribution de la liaison fibrée au budget d'incertitude a été évaluée à 10^{-19} , ce qui la rend tout à fait négligeable. Ce niveau de performance étonnant s'explique par le fait que la correction d'erreur repose sur un asservissement en phase. Si le bruit blanc de

phase résiduel se moyenne comme l'inverse de la racine carrée du temps de mesure, dans le domaine des fréquences, cela conduit à une moyenne variant comme l'inverse du temps de mesure. C'est ce que montre la figure 1 où l'on atteint la région des 10^{-18} au bout de seulement 100 secondes.

Le réseau REFIMEVE

REFIMEVE - Réseau Fibré Métrologique à Vocation Européenne - est un projet porté par le LPL et le SYRTE et né de la collaboration initiée en 2008 avec RENATER, le GIP bien connu du monde académique qui donne l'accès internet à une partie importante de l'enseignement supérieur et de la recherche. Cette collaboration [1] va jouer un rôle déterminant dans l'avance stratégique de REFIMEVE en tant que réseau temps-fréquence (T&F) dans le contexte européen et international.

En effet, l'accès à la fibre est un point bloquant pour ce type d'applications dans la plupart des cas. Or RENATER a permis la mutualisation de son réseau dédié au trafic de données. Par des méthodes de multiplexage-démultiplexage standard, le signal métrologique est introduit sur le réseau RENATER dans le canal 44 de la bande C. Ce canal 44 correspond à la longueur d'onde 1542 nm utilisée sur l'ensemble du réseau REFIMEVE que nous avons pu imposer dans nos collaborations à l'échelle européenne. Ce canal « noir » doit donc être libéré par les services de RENATER, ce qui est une contrainte assez mineure. Plus contraignant est le fait que REFIMEVE requiert un fonctionnement bidirectionnel comme expliqué ci-dessus alors que l'internet repose sur une paire de fibres optiques avec une fibre « montante » et une « descendante » et des amplificateurs monodirectionnels. Les obligations de service de RENATER impliquent de faire appel à des sous-traitants habilités lors de l'introduction des OADM

(Optical Add-Drop Multiplexer) sur le réseau pour la pose de nos équipements spécifiques.

Un enjeu industriel

Si la preuve du concept était une performance, l'appliquer à grande échelle soulève des difficultés d'une autre nature. Grâce à un financement du Programme d'Investissement d'Avenir en 2012, nous avons développé un partenariat avec une start-up MuQuans (aujourd'hui Exail) qui a développé une Station de Régénération Laser version industrielle à partir du prototype de laboratoire. Elle assure la stabilisation de la longueur optique du lien fibré et la distribution du signal corrigé vers le lien suivant ou vers un utilisateur. Une nouvelle version appelée MLS (Multi-branch Laser Station) permet aujourd'hui de distribuer le signal stabilisé dans cinq liens différents. Kheopsys (aujourd'hui Lumibird), quant à lui, a développé les amplificateurs bidirectionnels. Un point majeur aura été le développement d'un système de supervision distant qui assure le recueil de toutes les informations clés des instruments, le pilotage des asservissements. Ce système

est essentiel pour développer un réseau à l'échelle nationale avec un minimum de ressources humaines. Il est articulé avec la supervision du réseau RENATER qui, en cas d'urgence, peut interrompre les amplificateurs de REFIMEVE. Ce « droit de veto » n'a jamais été activé et voici 15 ans que coexistent sans encombre sur le même réseau physique le trafic de données et la distribution de temps-fréquence. Le transfert de savoir-faire a donné à ces entreprises une avance technologique qui leur permet aujourd'hui d'exporter dans de nombreux pays.

REFIMEVE, premier réseau T&F d'envergure nationale

En 2021, nous avons bénéficié d'un second financement du PIA sur 8 ans pour un projet T-REFIMEVE (ANR-21-ESRE-0029). La même année le réseau a acquis le statut d'infrastructure de recherche nationale. Outre une fréquence optique ultra-stable, nous nous sommes engagés à distribuer des signaux de temps et de radiofréquence. Dans une première phase, nous privilégions la technologie mature « White Rabbit » développée par le CERN il y a plus de 15 ans pour ses besoins

de synchronisation. Depuis, nous avons démontré que cette technologie peut être utilisée sur des liens de plusieurs centaines de km [3] et avons engagé une collaboration avec le CERN sur ce sujet. Quelques laboratoires bénéficient déjà de ce nouveau service. Tout le réseau en sera équipé en 2025. Il s'agit là d'une ouverture majeure car le champ d'applications s'en trouve considérablement élargi. Tous les domaines requérant la synchronisation de signaux localement comme les accélérateurs (synchrotrons, LHC, ...) ou distants comme les méthodes VLBI (Very Long Baseline Interferometry) en astrophysique peuvent être concernés. Des perspectives de développement de distribution de temps plus haute performance sont envisagées. La figure 2 représente l'ensemble du réseau REFIMEVE et l'encart résume les performances du réseau aujourd'hui et à horizon de 5 ans. Il distingue les performances des signaux T&F arrivant chez les utilisateurs – nécessairement limitées par celles des signaux injectés dans le réseau – des performances du réseau lui-même dans sa capacité à distribuer des signaux avec une dégradation minimale.

LA FLEXIBILITÉ ET L'EXPERTISE AU SERVICE DE L'INNOVATION

LED UV

LED / MODULES LED VERSION STANDARD ET CUSTOM POUR PETITES À GRANDES SÉRIES

- De 237 à 405 nm
- Large choix de puissances et d'angles
- Boîtiers CMS ou traversants

Large gamme de Photodiodes UV également disponible

APPLICATIONS

Décontamination - Stérilisation surfaces, fluides et air - Analyse de gaz - Spectroscopie - Curing - Fluorescence - Effets spéciaux - Forensic - Détection de contrefaçon...

HTDS
Hi-Tech Detection Systems

Suivez nous ! www.htds.fr
Info@htds.fr

Ces signaux ont vocation à être distribués en continu. En pratique, l'injection dans le réseau par le SYRTE est effective à 99% du temps. Le fonctionnement des liens eux-mêmes est de l'ordre de 80 à 90% du temps. Nombre d'interruptions ont lieu pour des raisons de service indépendante de REFIMEVE (intervention sur le réseau RENATER, déménagement de data centres). Un gros effort est mené pour que les utilisateurs disposent en temps réel des informations sur l'état du réseau, de ses performances, ... La gestion de ces données est un enjeu majeur pour la qualité de service et nous nous projetons dans des applications du réseau qui requièrent une continuité sans faille sur plusieurs semaines comme pour certaines campagnes d'acquisition de données astrophysiques.

Des applications potentielles fascinantes

L'exploitation des signaux de REFIMEVE est essentiellement à l'initiative des utilisateurs. Par exemple, l'expérience ALPHA du CERN (mesure de la gravité sur de l'antimatière dont des résultats pionniers ont été publiés en 2023) teste la référence de fréquence optique de REFIMEVE dans la perspective de s'affranchir d'une fontaine atomique nécessaire aujourd'hui pour la calibration de cette expérience. De très nombreuses utilisations en physique fondamentale, en spectroscopie, sont déjà à l'œuvre. Nous n'avons surement pas imaginé tout le potentiel que peut apporter cette infrastructure en développement. Nous voulons néanmoins mettre l'accent sur deux domaines emblématiques, les applications au « fiber sensing » et aux communications quantiques et à la distribution de clés quantiques.

Le réseau REFIMEVE utilisé comme capteur

Les fibres optiques sont très sensibles à leur environnement. C'est

grâce à des méthodes d'asservissement très efficaces corrigeant ces bruits que les signaux de fréquence optique sont transmis sans dégradation. Si, au contraire, nous cherchons à analyser ces « bruits », ils peuvent révéler des signaux très riches. Il se trouve que dans le processus de stabilisation d'un lien optique, nous enregistrons systématiquement le signal d'erreur avant toute correction. Ceci est illustré (Fig. 3) sur la liaison Observatoire de Paris - Villetaneuse (43 km) où l'on a extrait une séquence coïncidant avec un tremblement de terre qui s'est produit au Mexique en septembre 2022. Le signal obtenu est comparé avec celui d'un sismomètre de l'IPGP (Institut de Physique du Globe de Paris) et une corrélation de 94% des signaux a été obtenue. L'utilisation de fibres optiques pour détecter tout type d'effets sismiques

ou de température n'a rien de nouveau. C'est un champ de développement extrêmement actif présentant un haut niveau de maturité industrielle. Appelée « Distributed Acoustic Sensing » - DAS, l'une des méthodes de détection les plus connues, Optical Time Domain Reflectometry (OTDR) repose sur la rétrodiffusion Rayleigh. Grâce à un codage temporel variable de la source laser injectée dans la fibre optique, on peut obtenir de l'information distribuée le long de la fibre optique. La longueur utile de la fibre est limitée en pratique à 50-100 km par la longueur de cohérence de la source laser des systèmes DAS industriels. Cette contrainte disparaît si on dispose d'une source comme celle de REFIMEVE dont la longueur de cohérence est largement supérieure à 10000 km. Disposer d'une source de qualité métrologique

SYNTHÈSE DES PERFORMANCES DES SIGNAUX DE REFIMEVE AUJOURD'HUI ET À HORIZON DE CINQ ANS

Signal distribué par REFIMEVE		Stabilité absolue ou relative @1s	Stabilité absolue ou relative @1 jour	Incertitude	
				en routine	ultime
Radiofréquence	1 ^{ère} phase - 10 MHz (White Rabbit)*	1,00E-12	1,00E-15	1,00E-14	1,00E-15
	2 ^{ème} phase - 1 GHz	1,00E-13	3,00E-16	1,00E-14	2,00E-16
Temps	1 ^{ère} phase (White Rabbit)*	1 ns	1 ns	10 ns	10 ns
	2 ^{ème} phase	20-50 ps	500 ps	10 ns	2ns to 100ps [§]
Fréquence optique (@1542 nm)	Aujourd'hui	1,00E-15	3,00E-16	1,00E-14	2,00E-17
	A horizon 5 ans	1,00E-16	2,00E-17	1,00E-14	1,00E-18

Les signaux injectés dans le réseau REFIMEVE sont tracés par rapport à l'UTC(OP), temps atomique français élaboré à l'Observatoire de Paris. Les performances ci-dessus sont susceptibles d'évoluer avec celles des signaux injectés.

Performance du lien optique*		Stabilité absolue ou relative @1s	Stabilité absolue ou relative @1 jour	Incertitude
Radiofréquence	1 ^{ère} phase - 10 MHz (White Rabbit)*	1,00E-12	1,00E-15	1,00E-15
	2 ^{ème} phase - 1 GHz	1,00E-13	1,00E-17	1,00E-17
Temps	1 ^{ère} phase (White Rabbit)*	1-5 ps	10-100 ps	10 ns
	2 ^{ème} phase	1 fs	100 fs	100 ps
Fréquence optique (@1542 nm)	Aujourd'hui	1,00E-15	1,00E-19	1,00E-19
	A horizon 5 ans	1,00E-16	1,00E-20	1,00E-20

* ces performances peuvent dépendre du lieu du laboratoire utilisateur

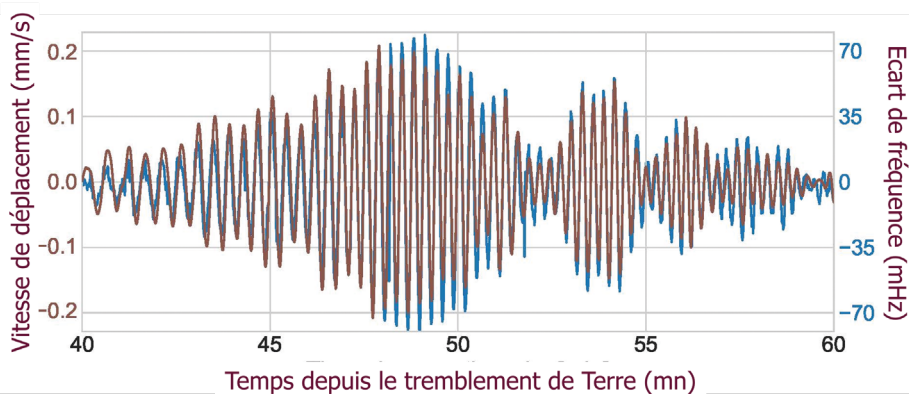


Figure 3. Signal d'erreur enregistré sur la fibre optique SYRTE-LPL en septembre 2022 pendant 20 mn, environ 40mn après le tremblement de Terre à Mexico. Ce signal présente une corrélation à 94% avec celui d'un sismomètre de l'IPGP [4].

permettra d'appliquer le DAS sur des longueurs de plusieurs centaines de km, ce qui élargit très sensiblement les perspectives applicatives. Les sujets concernés sont l'étude de tous effets sismiques d'origine naturelle mais aussi la surveillance des bâtiments, des routes et voies de chemin de fer. L'autre grand domaine est les effets thermiques qui présentent des temps caractéristiques beaucoup plus longs, ce qui permet de les distinguer des effets sismiques. L'enjeu principal est le suivi des variations de température du fond des océans et le long des côtes à l'aide de fibres sous-marines. L'avantage est l'obtention d'information en continu, distribuée et requérant très peu de logistique. Ces perspectives relèvent encore de la R&D mais sont au cœur du projet européen SENSEI – Smart European Networks for Sensing the Environment and Internet quality – où nous portons l'essentiel des développements photoniques du projet en collaboration avec les industriels du domaine.

Le temps-fréquence et les communications quantiques

Le domaine des technologies quantiques a connu un développement extrêmement intense au cours des 10 dernières années, avec un soutien financier étatique très puissant à travers le monde. L'initiative EuroQCI en est un exemple emblématique, avec de fortes collaborations entre programmes au niveau national. En effet, de nombreuses applications du secteur majeur de la

communication quantique et de la distribution de clés quantiques (QKD) nécessitent un timing ultra-précis pour synchroniser l'heure d'arrivée des paires de signaux quantiques, et une stabilisation de la liaison par fibre optique pour éviter la décohérence due au bruit de liaison. Le timing ultra-précis délivré par REFIMEVE pourrait conduire à des réseaux quantiques plus performants. Inversement, la technologie quantique pourrait aider à protéger les infrastructures T&F telles que REFIMEVE contre les risques de cybersécurité.

La symbiose des communautés T&F et de la communication quantique a déjà pris forme dans plusieurs pays européens. Parmi les exemples, citons le projet QTF-backbone en Allemagne qui vise à construire un réseau dédié à double paire de fibres noires à l'échelle nationale,

l'initiative similaire IQT dans le domaine de l'informatique et les recherches menées dans le cadre du programme QDNL aux Pays-Bas. Une synergie accrue entre ces deux communautés faciliterait la R&D conjointe, en utilisant éventuellement une partie dédiée du réseau REFIMEVE (en particulier là où des fibres noires sont disponibles) où en connectant directement les bancs d'essai de la QKD au réseau REFIMEVE.

Conclusion

Le réseau REFIMEVE encore en phase de développement pourrait rapidement devenir un outil indispensable pour de nombreux domaines scientifiques mais aussi pour des acteurs industriels tels que les télécoms, le monde de la défense, plus largement les secteurs de R&D ayant besoin de références de temps ou fréquence ultrastables. Ces développements pourraient franchir une nouvelle étape si le projet d'infrastructure européenne appelé FOREST – Fiber-based Optical network for European Science and Technology – est retenu sur la feuille de route ESFRI en 2026. Ce projet s'appuie sur les instituts nationaux de métrologie, les « National Research and Education Networks » (NREN) comme RENATER et GEANT organisation européenne qui assure les connexions transfrontalières entre les réseaux nationaux. L'Europe disposerait ainsi d'une infrastructure sans équivalent au monde et dont l'impact dépasserait très largement la seule sphère académique. ●

RÉFÉRENCES

- [1] O. Lopez *et al*, *Opt. Express* **18**, 16849 (2010).
- [2] C. Lisdar *et al*, *Nature Commun* **7**, 12443 (2016)
- [3] N. Namneet Kaur. Thèse, Observatoire de Paris, 2018. tel-01913286
- [4] M. Tønnes. These Université Paris sciences et lettres, 2022. tel-04218313