

MetriQs-France : Levier stratégique pour la compétitivité des entreprises des technologies quantiques

Par **Félicien SCHOPFER** et **Benoît DALBERT**

Directeur du programme Technologies quantiques et Responsable de la gestion de projets au Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE)

S'inscrivant dans la Stratégie nationale sur les technologies quantiques, MetriQs-France est le programme consacré aux référentiels de mesure, à l'évaluation et à la normalisation des technologies quantiques. Coordonné par le LNE, il soutient l'émergence d'une industrie quantique durable réalisant les promesses du domaine, dans le contexte d'une vive compétition internationale. Le programme vise la mise en place d'un système d'assurance qualité complet, fondé sur une métrologie forte, en soutien à l'innovation et à la compétitivité des entreprises. Avec une subvention publique de 13 M€ (2022-2028), MetriQs-France s'articule suivant deux axes complémentaires, autour de la fourniture de spécifications techniques fiables : i) le développement et l'exploitation de méthodes de mesure de référence (projets de R&D collaboratifs, coopérations internationales et normalisation) ; et ii) le déploiement d'une infrastructure experte et indépendante, ouverte aux utilisateurs académiques et industriels les mettant en œuvre. Ainsi, le programme entend contribuer à lever les verrous technologiques, mettre en place une filière industrielle solide et souveraine, des chaînes d'approvisionnement sûres, et démontrer l'avantage des technologies quantiques par rapport aux technologies existantes pour en accélérer l'adoption par le marché.

Des « Technologies quantiques pour la métrologie » à la « Métrologie pour les technologies quantiques »

Les technologies quantiques ont révolutionné la métrologie en fournissant des étalons de mesure universels et extrêmement reproductibles, liés à des constantes de la nature (horloges atomiques, étalons électriques quantiques fondés sur l'effet Hall quantique ou l'effet Josephson). Ces étalons ont conduit à plusieurs évolutions majeures du système international d'unités : redéfinition de la seconde par rapport à la fréquence de la transition hyperfine du césium $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ en 1967, et, plus récemment, en 2018, redéfinition du kilogramme par rapport à la constante de Planck h , et redéfinition de l'ampère par rapport à la charge élémentaire e ¹. Ils permettent aujourd'hui de réaliser ces unités avec une exactitude sans précédent. Les progrès dans l'exploitation des technologies quantiques en métrologie se poursuivent, avec des capteurs toujours plus sensibles, mais également face à un certain nombre de défis comme la miniaturisation des dispositifs, la simplification de leur

mise en œuvre, à moindre coût, l'amélioration de leur robustesse, leur embarquabilité, etc.

Les laboratoires nationaux de métrologie, dont le LNE et ses partenaires du Réseau national de la métrologie française (RNMF)², sont des acteurs majeurs de ces développements, et ont acquis une expertise unique dans l'ingénierie et la mesure de précision des systèmes quantiques (atomes froids, ions piégés, circuits supraconducteurs ou autres boîtes quantiques), mais aussi dans les technologies habilitantes qui permettent la mise en œuvre de ces systèmes (électronique, cryogénie, vide, lasers, etc.).

Avec l'émergence de la nouvelle génération de technologies quantiques à laquelle nous assistons³ et les promesses de rupture qu'elle porte pour de multiples industries (énergie, santé, matériaux, logistique, banque et assurance, défense...), les besoins de métrologie se multiplient, d'autant que les enjeux socio-économiques, de défense, de sécurité et de souveraineté sont d'ampleur. Disposer de mesures fiables, objectives et comparables des caractéristiques et des performances de ces nouvelles technologies apparaît

¹ <https://doi.org/10.1051/refdp/201962011>

² <https://metrologie-francaise.lne.fr/fr>

³ <https://doi.org/10.1007/978-3-319-98824-5>

nécessaire pour estimer si elles tiennent promesse, et accompagner leur transfert du laboratoire à l'industrie et aux usages. Fournir les preuves de concept, démontrer les avantages des solutions quantiques, améliorer la reproductibilité et la qualité des produits, maîtriser la chaîne d'approvisionnement des composants, rassurer les investisseurs, positionner les fournisseurs sur le marché, sécuriser les usages sont autant de sujets sur lesquels de telles mesures sont déterminantes. Ainsi, la métrologie s'inscrit en soutien à l'innovation, à l'industrialisation, à la compétitivité des entreprises sur le marché et à l'adoption des technologies quantiques par les utilisateurs.

Les besoins de métrologie concernent tous les domaines d'application des technologies quantiques, des capteurs quantiques – domaine de prédilection de la métrologie –, jusqu'au calcul quantique et aux communications quantiques, en passant par les technologies habilitantes. L'expertise acquise par les laboratoires nationaux de métrologie dans le développement des étalons et des capteurs quantiques est un véritable atout pour faire face aux nombreux défis de mesure à relever, comme la mesure du taux d'erreur de qubits.

Dans cette perspective d'industrialisation et de marché, la métrologie constitue le premier maillon d'un système d'assurance qualité à développer pour répondre aux spécificités des technologies quantiques. Ce système doit être complété par des capacités d'essais, des travaux de normalisation et le développement de référentiels de certification à plus long terme, ainsi que la mise en place d'autorités d'accréditation pour permettre l'intervention d'acteurs multiples capables de faire face à la demande. Enfin, la compétition internationale et les rapports de force géopolitiques autour des multiples enjeux des technologies quantiques exigent la mise en place d'une organisation, de partenariats et de coopération adaptés pour réaliser ces travaux.

C'est avec cette vision complète que le programme MetriQs-France⁴ a été lancé en 2022 dans le cadre de la Stratégie nationale sur les technologies quantiques.

Stratégie nationale quantique et programme MetriQs-France

Dans un contexte d'accélération du développement des technologies quantiques et d'accroissement massif des investissements mondiaux, la France entend s'affirmer comme un acteur majeur dans ce domaine. À cette fin, l'État a déployé, dès 2021, une Stratégie nationale sur les technologies quantiques (SNQ)⁵, soutenue par une enveloppe budgétaire d'un milliard d'euros entre 2021 et 2025. Cette ambition a été réaffirmée le 22 mai 2026 par l'annonce présidentielle d'un investissement public

supplémentaire d'un milliard d'euros pour la période 2026-2030⁶.

En 2022, l'État a confié au LNE la mission de coordonner le développement de référentiels de mesure, l'évaluation des technologies quantiques et des technologies habilitantes, ainsi que la promotion des résultats, notamment sur le plan de la normalisation. Les objectifs : démontrer la crédibilité des solutions technologiques françaises, construire une filière industrielle française solide et souveraine, faciliter l'accès des entreprises françaises au marché, et soutenir leur compétitivité.

Pour accomplir cette mission, le LNE tire profit de sa connaissance des technologies quantiques, de son expertise dans les domaines de la métrologie, des essais, de la normalisation et de la certification, mais aussi de son statut de tiers de confiance.

Doté d'une subvention de 13 M€ dans le cadre de France 2030 sur la période 2022-2028, MetriQs-France s'articule autour de deux volets :

- Le volet développement (9 M€) comprend des projets de R&D (BACQ et MOCQUA) portant sur l'élaboration de référentiels de mesure et l'évaluation des technologies quantiques et des technologies habilitantes, le développement de partenariats scientifiques et de coopérations internationales, et des travaux de normalisation.
- Le volet infrastructure (4 M€) se traduit dans le déploiement d'une plateforme de métrologie de référence pour la caractérisation et l'évaluation des technologies quantiques, experte et indépendante, et ouverte aux utilisateurs académiques et industriels. La plateforme MetriQs-France est hébergée par les laboratoires du Réseau national de la métrologie française (RNMF) exerçant dans le domaine quantique (LNE, CNAM et Observatoire de Paris).

Au service de l'écosystème, le programme est, notamment, mené en collaboration avec les autres programmes de la SNQ, qui développent ou déploient des technologies quantiques ou habilitantes. Citons en particulier Q-LOOP, CRYONEXT, HQI, PROQCIMA, le PEPR-Quantique.

Projet BACQ - Benchmarks applicatifs pour les calculateurs quantiques

Le projet BACQ (09/2023-11/2026), coordonné par Thales, s'attaque à la question des performances des calculateurs quantiques du point de vue des utilisateurs finaux. Réunissant Thales, Bull, le CEA, le CNRS, Teratec et le LNE, celui-ci vise à développer des *benchmarks* applicatifs pour comparer les performances des calculateurs quantiques sous l'angle d'applications concrètes. En évaluant les machines sur leur capacité réelle à résoudre des problèmes d'optimisation, de simulation physique quantique, de factorisation ou des

⁴ <https://www.lne.fr/fr/metriqs-france>

⁵ https://www.info.gouv.fr/upload/media/organization/0001/01/sites_default/files_contenu_piece-jointe_2021_01_dossier_de_presse_quantique_vfinale.pdf

⁶ <https://www.info.gouv.fr/actualite/souverainete-technologique-la-france-investit-1-milliard-d-euros-supplementaire-dans-la-strategie-nationale-quantique>

systèmes d'équations linéaires, BACQ traduit la performance de calcul en valeur ajoutée métier.

Les résultats sont probants : une dizaine de *benchmarks* et métriques ont été finalisés, ainsi qu'un modèle d'analyse multicritère permettant de combiner les résultats et de tenir compte des préférences des utilisateurs, de manière transparente, pour fournir une notation globale de la performance des ordinateurs quantiques. Leur mise à disposition en accès libre sur des GitHub ainsi que la collaboration avec d'autres initiatives de *benchmarking* visent une appropriation et une reconnaissance des *benchmarks* développés la plus large possible par la communauté⁷.

Les *benchmarks* développés dans BACQ visent à mesurer, de manière objective, le progrès des technologies de calcul quantique vers l'utilité, et à permettre la comparaison entre les différentes technologies.

Projet MOCQUA - Métrologie des composants pour les ordinateurs quantiques fondés sur des qubits à l'état solide

Le projet MOCQUA (10/2025-09/2028) se concentre sur la chaîne d'approvisionnement des composants matériels des calculateurs quantiques exploitant des qubits à l'état solide, qubits supraconducteurs ou qubits de spin. MOCQUA vise à établir des méthodes de mesure de référence pour la caractérisation fiable et objective des composants matériels et sous-systèmes nécessaires à la réalisation de ces calculateurs quantiques, à grande échelle : générateurs et analyseurs de signaux RF, composants d'interconnexion, filtres, atténuateurs, amplificateurs, réfrigérateurs. Coordonné par le LNE, ce projet regroupe organismes de recherche (LNE, CNAM, CEA, CNRS Institut Néel) et partenaires industriels, à savoir fournisseurs de calculateurs quantiques (Alice & Bob, C12, Quobly) et fournisseurs de composants (Isentroniq, Radiall, Silent Waves, VIQTHOR).

Par la fourniture de spécifications fiables de ces composants, MOCQUA permet :

- l'optimisation du fonctionnement des calculateurs quantiques ;
- la sécurisation de la chaîne d'approvisionnement, en garantissant l'équivalence de composants par des fournisseurs multiples, atténuant le risque de dépendance à un fournisseur unique ;
- le positionnement des fournisseurs français sur le marché.

Enfin, les spécifications techniques solidement établies par la métrologie dans MOCQUA, comme dans BACQ, viendront en appui aux travaux de normalisation, qui contribueront aussi à la reconnaissance des méthodes de mesure développées au rang de références à l'échelle internationale.

Normalisation

La normalisation est un élément clé pour l'innovation, l'industrialisation et le développement d'un marché. Elle permet le partage d'un langage commun, de bonnes pratiques communes, l'amélioration de la qualité, l'interopérabilité, la reconnaissance et la confiance. MetriQs-France place la normalisation au cœur de sa stratégie pour asseoir la compétitivité des entreprises françaises du quantique sur le marché international. Le programme promeut le concept de normes « pilotées par l'industrie, étayées par la métrologie, fondées sur la science ».

À travers la Commission nationale de normalisation AFNOR sur les technologies quantiques (CN AFNOR Quantique⁸), la France mobilise une cinquantaine d'experts pour contribuer aux travaux du comité CEN-CENELEC JTC22 en Europe et des comités IEC/ISO JTC3 et IEEE SA à l'international. En pilotant des projets de normes sur les *benchmarks* pour les calculateurs quantiques, l'hybridation quantique / HPC, les câbles RF cryogéniques, ou la caractérisation des gravimètres quantiques, la France ne se contente pas de simple contributions aux normes, elle cherche à les définir. En outre, la France pilote le groupe de travail européen WG3 au JTC22 et le sous-comité international JSC3A au JTC3, tous deux consacrés au calcul quantique. Cette influence normative est un levier stratégique pour s'assurer que les solutions industrielles françaises ne soient pas exclues des marchés mondiaux par des normes défavorables que d'autres fixeraient.

Plateforme de métrologie MetriQs-France

L'aboutissement du programme MetriQs-France, en termes d'infrastructure, est la mise en place de la plateforme de métrologie pour les technologies quantiques qui fédère des installations de métrologie fondamentale, des équipements à l'état de l'art et les compétences du Réseau national de la métrologie française (RNMF). Experte et indépendante, cette plateforme est exploitée pour les travaux de R&D visant l'élaboration des moyens de mesure de référence pour la caractérisation, et l'évaluation des performances des technologies quantiques au meilleur niveau. Ouverte aux acteurs académiques et industriels, elle est aussi destinée à leur fournir des services de mesure selon les meilleures pratiques : accès à des équipements dont ils ne disposent pas, bilan d'exactitude de leurs produits, évaluation et validation de performances, en vue de levées de fonds ou d'une mise sur le marché.

La plateforme MetriQs-France est organisée autour de quatre pôles d'excellence :

- caractérisation des qubits à l'état solide et des technologies habilitantes (électronique DC & RF et cryogénie) - LNE (Trappes) ;
- thermométrie à très basse température - CNAM (Saint-Denis) ;

⁷<https://arxiv.org/abs/2403.12205>

⁸<https://norminfo.afnor.org/structure/afnorcn-qt/cn-quantique/183732>



Plateforme MetriQs-France, laboratoire de métrologie des qubits à l'état solide et des technologies habilitantes associées, LNE-Trappes, France (© Philippe Stroppa – LNE).

- caractérisation des gravimètres quantiques - Observatoire de Paris (Trappes) ;
- caractérisation d'horloges atomiques - Observatoire de Paris (Paris).

Cette infrastructure ouverte favorise une synergie unique entre la recherche fondamentale et l'industrie.

Structuration européenne et coopération internationale

Le développement de moyens de mesure de référence, harmonisés et reconnus, permettant de mesurer et de comparer les caractéristiques et les performances sur une même base, nécessite des collaborations. La normalisation, exercice de consensus, nécessite également dialogue et diplomatie, dans un contexte de forte compétition géopolitique.

À l'échelle européenne, la coopération sera renforcée par la Quantum Europe Strategy⁹, dévoilée en 2025, et le futur European Quantum Act¹⁰, annoncé pour 2027, qui reconnaissent la métrologie, les essais, les *benchmarks*, la normalisation et la certification, comme essentiels au développement des technologies quantiques et à l'affirmation de la position de l'Europe dans le domaine.

Sous l'égide d'EURAMET¹¹, l'association européenne des laboratoires nationaux de métrologie, dans le cadre

du réseau EMN-Q¹² (European Metrology Network for Quantum Technologies) et dans le cadre du programme EPM¹³ (European Partnership on Metrology), les laboratoires nationaux de métrologie, principalement le LNE (FR), la PTB (DE), l'INRiM (IT), le VTT (FI) et le NPL (UK), collaborent au travers de projets de recherche comme MetSuperQ¹⁴. Ces collaborations s'étendent aux organismes de recherche technologique (*research and technology organisations* ou RTOs en anglais) dans le cadre du projet européen Qu-Test¹⁵, projet d'ampleur (2023-2030) qui vise le développement d'une infrastructure européenne d'essai et d'expérimentation pour les technologies quantiques, au service des industriels.

S'agissant spécifiquement des *benchmarks* pour les calculateurs quantiques, des collaborations ont été initiées entre la France, l'Allemagne et les Pays-Bas. Elles se développent aujourd'hui dans le cadre de la proposition d'un projet européen collaboratif nommé Q-MAESTRO.

Les travaux des experts européens dans les comités de normalisation européens et internationaux sont soutenus, quant à eux, par différents projets européens dont le projet EISMEA StandQuTe, copiloté par la France et l'Allemagne, qui permet spécifiquement de financer les experts, et participe ainsi à la consolidation des positions européennes à faire valoir à l'international.

⁹<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/quantum-europe-strategy>

¹⁰<https://www.european-quantum-act.com/>

¹¹<https://www.euramet.org/>

¹²<https://www.euramet.org/european-metrology-networks/quantum-technologies>

¹³<https://www.metpart.eu/>

¹⁴<https://www.metsuperq.eu/home>

¹⁵<https://qu-test.eu/>

À l'échelle internationale, les collaborations sur les travaux de métrologie et de normalisation sont soutenues en particulier par l'initiative NMI-Q¹⁶. Reconnue par le G7, cette initiative, signée au LNE en octobre 2025, rassemble les laboratoires nationaux de métrologie du G7 et de l'Australie - INRIM (IT), LNE (FR), NIST (US), NMIA (AU), NMIJ (JP), NPL (UK), NRC (CA), PTB (DE) -, et, dans ce format restreint, vise à accélérer ces travaux, au service de l'industrialisation et de l'adoption des technologies quantiques. Elle prévoit le développement conjoint de bonnes pratiques de mesure, de plateformes de mesure et d'essais, pour soutenir, notamment, les travaux de normalisation.

Conclusion

Inscrit au cœur de la Stratégie nationale sur les technologies quantiques (SNQ), le programme MetriQs-France repose sur la conviction que la métrologie, les *benchmarks* et la normalisation constituent des leviers de compétitivité majeurs. La France figure, d'ailleurs, parmi les premières nations à avoir formellement reconnu que la maîtrise des mesures et des normes constitue un avantage stratégique pour l'émergence des technologies quantiques.

Le programme s'appuie sur l'excellence reconnue de la France en métrologie quantique, ainsi que sur l'expertise du LNE dont le statut de tiers de confiance garantit l'objectivité et la fiabilité des mesures. La fourniture de spécifications techniques rigoureuses et impartiales s'inscrit dans la perspective de la mise en place d'un système d'assurance qualité complet répondant aux spécificités de ces technologies.

En soutien à l'industrialisation, MetriQs-France permet une sécurisation accrue de la chaîne d'approvisionnement des composants et une meilleure maîtrise de la production. En assurant la reconnaissance internationale des référentiels développés grâce à une stratégie de coopération active, le programme permet aux entreprises françaises de faire valoir leurs atouts technologiques, renforçant ainsi leur attractivité et leur compétitivité sur le marché mondial.

¹⁶ <https://nmi-q.org/>