

**Patrice Geoffron**

Professeur d'Economie
à Paris Dauphine - PSL

**Elie Girard**

Président exécutif
D'Alice & Bob

L'ORDINATEUR QUANTIQUE AU SERVICE DU GREEN DEAL

L'Union européenne est la zone du monde la plus engagée en matière de décarbonation, visant l'atteinte d'une neutralité climatique en 2050, avec une réduction des émissions qui vise l'atteinte de -90% dès 2040 par rapport à 1990. Cette ambition va progressivement créer des problèmes inédits par leur complexité : l'intermittence des énergies renouvelables devenues dominantes dans les mix électriques, la gestion optimisée des réseaux et de leur résilience, le stockage à grande échelle, le développement de nouveaux matériaux, la planification urbaine durable, etc. Ces chantiers d'ingénierie nécessitent une puissance de calcul inédite, défi face auquel les ordinateurs quantiques présentent des qualités intrinsèques prometteuses, même si celles-ci ne sauraient affranchir des efforts déjà engagés, fondés sur les technologies existantes.

Ces ordinateurs reposent sur les principes fondamentaux de la mécanique quantique. Leur singularité est que les « qubits » (pour « quantum bits »), unités fondamentales d'information quantique, existent simultanément dans plusieurs états (pas seulement 0 ou 1 comme les bits classiques) et interagissent entre eux. L'intuition suivante permet de comprendre la différence entre calculateurs traditionnels et quantiques : les premiers traitent les informations séquentiellement, tandis que les seconds ont la capacité à explorer un très grand nombre de solutions en parallèle. Ce nouveau paradigme de calcul permet d'envisager la résolution en temps limité de problèmes qui, pour certains, prendraient des siècles à un supercalculateur classique.

Cette capacité nouvelle mérite d'être examinée au regard des chantiers de la transition énergétique (section 1) - en y intégrant la réduction de l'empreinte environnementale des ordinateurs quantiques par rapport à leurs prédécesseurs - en soulignant la densité de l'écosystème français (section 2) et européen (section 3) dans ce domaine, tout en rappelant, en conclusion, l'importance des étapes encore à franchir.

1. Un vaste champ d'applications au service de la transition énergétique et de l'anticipation des dérèglements climatiques

Dès lors que la transition énergétique procède, centralement, de transferts d'usages du thermique vers l'électrique (véhicules électriques, électrolyseurs, pompes à chaleur, divers procédés industriels, etc.) et du remplacement de moyens de production massifs et pilotables (centrales à charbon et gaz) par des sources non pilotables, granulaires et dispersées (éolien et solaire), **la gestion des systèmes électriques** se trouve drastiquement bouleversée.

Les ordinateurs quantiques pourraient contribuer à **anticiper les fluctuations** avec une précision accrue et proposer les ajustements qui en découlent pour **stabiliser le réseau** en analysant simultanément un grand nombre de variables et de scénarios: prévisions météorologiques, comportements de consommation ou encore contraintes liées à la configuration des infrastructures existantes. Ces mêmes caractéristiques sont intéressantes pour évaluer des risques de pannes et anticiper les menaces de défaillances majeures.

Le secteur automobile devrait également intégrer progressivement les technologies quantiques dans sa transition, des constructeurs s'appuyant sur des partenariats stratégiques pour améliorer **l'efficacité énergétique des véhicules** et optimiser les chaînes de traction décarbonées, avec l'espoir que ce type de calcul accélère la conception de motorisations plus efficaces et réduise les pertes énergétiques. Le quantique pourrait également jouer un rôle sur la répartition et la gestion des **bornes de recharge pour les véhicules électriques**, permettant à ces derniers de contribuer à l'équilibre du système.

Les simulations quantiques présentent aussi un potentiel de **modélisation de nouveaux matériaux**, pour des batteries plus performantes, moins coûteuses et plus respectueuses de l'environnement, ou pour optimiser la structure nanométrique des panneaux solaires, afin d'améliorer leur rendement global. L'intérêt porte également sur les processus électrochimiques impliqués dans la production d'hydrogène par électrolyse ou la recherche sur les **carburants alternatifs**, tels que l'ammoniac vert. *Last but not least* en la matière, l'optimisation de la **capture et de la séquestration de carbone** conforterait la perspective d'une économie circulaire du carbone, visant à transformer le CO₂ en molécules d'intérêt pour les carburants ou les matériaux de construction.

Au-delà du secteur énergétique *stricto sensu*, le quantique est prometteur pour la **modélisation climatique**, via la simulation de systèmes complexes, dans l'objectif d'affiner la modélisation des interactions entre l'atmosphère, les océans et la biosphère.

L'objectif est l'identification des tendances et des anomalies indétectables avec les méthodes traditionnelles, améliorant la détection précoce d'événements extrêmes, en se fondant sur un grand nombre d'équations éprouvées régissant les phénomènes climatiques, mais trop complexes ou trop nombreuses pour être maîtrisées par les outils de simulation les plus puissants actuels.

En outre, les technologies de **communications quantiques** et la **cryptographie post-quantique** (distinctes des technologies de calcul quantique, même si elles reposent également sur les propriétés de la physique quantique) pourraient sécuriser les réseaux électriques critiques et les flux de données d'infrastructure face aux futures capacités de déchiffrement permises par l'ordinateur quantique. Cette dimension revêt une importance stratégique dans un contexte de vulnérabilité accrue des systèmes énergétiques distribués.

Si ces technologies sont encore en amont de la maturité, certains travaux suggèrent pourtant **un avantage massif en termes de consommation énergétique du calcul quantique par rapport au calcul classique**. De fait, les puces quantiques requièrent une puissance énergétique se comptant en kW, là où elle s'exprime en MW pour les supercalculateurs classiques. De ce fait, l'utilisation hybride de calculs classiques et quantiques contribuera à optimiser l'efficacité énergétique globale.

Naturellement, l'évaluation de l'empreinte environnementale implique de considérer l'ensemble du cycle de vie. L'Institut Quantique de l'Université de Sherbrooke mène actuellement un projet de comparaison des impacts environnementaux entre un ordinateur quantique et un ordinateur classique. Les systèmes quantiques présentent des besoins particuliers en matériaux ou gaz précieux qu'il s'agit d'intégrer à l'analyse: le diamant, le niobium et les nanotubes de carbone, ou encore les gaz rares comme l'hélium-3, sont essentiels au développement de certains ordinateurs quantiques, en fonction de la technologie utilisée ; l'or peut aussi jouer un rôle grâce à ses propriétés de conductivité thermique et est utilisé pour recouvrir les plaques internes des cryostats, qui maintiennent les puces quantiques à des températures extrêmement basses, proches du zéro absolu (-273°C, soit quelques millikelvins).

2. Un écosystème français à la pointe de la recherche et de l'efficacité énergétique

L'année 2025 a marqué une étape majeure pour l'écosystème quantique français et mondial. **Le Prix Nobel de Physique 2025** a été décerné à **John Clarke, Michel Devoret et John Martinis** « pour leurs travaux fondateurs sur les propriétés quantiques macroscopiques et la quantification de l'énergie dans les circuits électriques ».

Michel Devoret, figure clé de cette reconnaissance, a co-inventé le qubit «de chat» et conseillé les cofondateurs d'Alice & Bob avant de devenir directeur scientifique du laboratoire Google Quantum AI. John Martinis est quant à lui aujourd'hui conseiller d'Alice & Bob. En réalité, depuis 25 ans, dans toutes les promotions de Prix Nobel dans le domaine du calcul quantique figurait un Français (ie. Serge Haroche en 2012, Alain Aspect en 2022). Ces distinctions ultimes sont avant tout le fruit d'un tissu d'écoles et d'instituts de recherche de premier plan mondial qui perpétuent la tradition française d'excellence en mathématiques et physique fondamentales : Ecoles Normales Supérieures, Ecole Polytechnique, Ecole des Mines, CNRS, INRIA, CEA, Collège de France, etc. Surtout, ces validations confèrent à l'écosystème français une légitimité scientifique de premier rang et illustre comment la recherche fondamentale se traduit en applications industrielles de pointe.

La France est donc un acteur clé, en particulier dans son application à la transition énergétique et à la réduction de l'empreinte du calcul. L'informatique quantique a été définie comme une priorité stratégique avec le lancement du **Plan National Quantique** en 2021, puis dans le cadre plus large du programme **France 2030**. Cet engagement public s'est traduit par un investissement total de 1 milliard d'euros de l'État entre 2021 et 2025, reflétant l'ambition française.

L'écosystème français se distingue par la diversité de ses approches technologiques :

- **Alice & Bob** travaille sur les qubits de chat pour construire un ordinateur quantique universel à correction d'erreurs. La société a levé 100 millions d'euros en janvier 2025, un financement majeur destiné à industrialiser la production et à commercialiser son premier ordinateur quantique d'ici 2030.
- **C12** travaille sur des qubits de spin d'électron dans des nanotubes de carbones.
- **Pasqal** développe un ordinateur basé sur les atomes neutres.
- **Quandela** mise sur la photonique quantique, une technologie fonctionnant à température ambiante et présentant un potentiel pour l'accessibilité des solutions quantiques.
- **Quobly** utilise des qubits de spin d'électron dans du silicium enrichi.

L'attention portée aux problématiques énergétiques est au cœur du projet «Optimisation énergétique des circuits quantiques» (OECQ), conduit par EDF en collaboration avec des

start-ups françaises, ainsi que le CNRS. Ce projet illustre l'engagement de la France à développer des solutions économes en énergie pour répondre aux besoins industriels, tout enrédusant l'empreinte carbone des technologies numériques.

EDF explore, par ailleurs, les applications potentielles en matière de simulation physique, d'optimisation industrielle et de science des matériaux, avec des débouchés dans tout le spectre des technologies décarbonées (du nucléaire aux renouvelables, en passant par les moyens de stockage). Cet écosystème est renforcé par la présence de centres d'excellence comme **QuaTERA** (Quantum Technologies Energy Result Accelerator), qui associe calcul haute performance et informatique quantique. Le programme **HQI** (Hybrid Quantum Initiative), impliquant le CEA, met en place une plateforme hybride combinant calculs classique et quantique et représente un exemple concret de cette synergie entre innovation technologique et durabilité.

3. Les ambitions de la stratégie quantique européenne

La Commission européenne a adopté en juillet 2025 sa **Quantum Europe Strategy** pour positionner l'UE comme leader du quantique d'ici 2030. Cette stratégie s'articule autour de cinq axes: recherche et innovation, infrastructures partagées, écosystème industriel, applications au spatial et à double usage, compétences et formation. Elle reconnaît explicitement le potentiel du quantique pour la décarbonation et constitue la réponse européenne à l'intensification des concurrences américaine et chinoise dans ce domaine.

L'Europe occupe une position scientifique solide dans la course quantique mondiale : **l'UE publie près d'un quart des travaux de recherche quantique, niveau comparable à celui des États-Unis ou de la Chine**, et représente environ un tiers des entreprises actives dans l'informatique quantique à l'échelle mondiale. L'Europe abrite, par ailleurs, l'un des clusters les plus denses d'entreprises quantiques de cœur de métier au niveau mondial, avec un pourcentage d'entreprises spécialisées proche de 40% dans des pays comme le Royaume-Uni, les Pays-Bas et la France – contre seulement 20% aux États-Unis, où les géants technologiques dominent. En matière de brevets, les trois premiers pays européens sont l'Allemagne, le Royaume-Uni et la France, confirmant la diversité géographique de cet écosystème.

Cependant, cette excellence scientifique ne s'est pas encore pleinement traduite en leadership industriel. Les entreprises quantiques européennes ne captent actuellement qu'environ 5% des investissements privés mondiaux dans le secteur – un déficit structurel que la Quantum Europe Strategy entend corriger.

L'UE a certes injecté environ 2 milliards d'euros de fonds publics au niveau communautaire, auxquels s'ajoutent près de 9 milliards d'euros engagés aux échelles nationales, portant l'effort public total à plus de 11 milliards d'euros sur cinq ans. Pour combler le gap en financement privé, la Commission s'appuie notamment sur le Conseil européen de l'innovation (EIC) et le Scaleup Europe Fund, lancé en mai 2025, qui investit directement dans les secteurs stratégiques dont le quantique.

Un réseau de six ordinateurs quantiques a été amorcé dès 2022 à travers l'Europe (Tchéquie, Allemagne, Espagne, France, Italie, Pologne), représentant un investissement initial de 100 millions d'euros. Intégrés aux supercalculateurs existants dans le cadre de l'infrastructure EuroHPC, ces systèmes hybrides incarnent la vision d'une Europe quantique capable de résoudre des défis énergétiques et climatiques majeurs. La stratégie prévoit d'aller plus loin avec le lancement de six lignes pilotes de production de puces quantiques et un centre de conception quantique européen, afin d'acquérir une souveraineté industrielle sur l'ensemble de la chaîne de valeur.

En parallèle, **l'infrastructure de communication quantique sécurisée (EuroQCI)** – dont l'accord a été signé par les 27 États membres dès 2019 – doit aboutir à un réseau d'internet quantique couvrant l'ensemble de l'UE d'ici 2030. Cette initiative, complémentaire du réseau de calcul, ambitionne de sécuriser les flux d'informations critiques – notamment ceux liés aux infrastructures énergétiques – contre les futures capacités de déchiffrement des ordinateurs quantiques eux-mêmes, répondant ainsi à un double enjeu de puissance de calcul et de cybersécurité souveraine.

L'UE prépare actuellement un **Quantum Act**, attendu pour le deuxième trimestre 2026. Cet acte législatif devrait formaliser l'engagement européen envers les technologies quantiques selon deux piliers : un volet régulation (gouvernance, cybersécurité post-quantique, contrôle des accès de pays tiers aux projets sensibles) et un volet innovation (financement, standardisation, transfert technologique).

À cet acte s'adjoindront **deux feuilles de route complémentaires** : une Quantum Chips Industrialisation Roadmap pour structurer la filière industrielle, et une Quantum Standards Roadmap pour garantir l'interopérabilité des systèmes entre États membres. Une évaluation des risques liés aux technologies quantiques (Quantum Technology Risk Assessment) devra également cartographier les dépendances de l'écosystème européen – notamment en termes de matériaux critiques (niobium, hélium-3, or) – et proposer des mesures de résilience de la chaîne d'approvisionnement. Un conseil consultatif de haut niveau, réunissant les meilleurs scientifiques européens du domaine – dont des lauréats du prix Nobel en quantique – des conseils stratégiques indépendants sur la mise en œuvre de la stratégie, une différence

notable par rapport au modèle du Chips Act, critiqué pour son déficit de gouvernance scientifique.

Le Parlement européen a reconnu, dans un briefing de février 2026, qu'une stratégie explicite « *Quantum-for-Decarbonisation* » est indispensable pour que l'UE conserve simultanément son leadership climatique et technologique. La **convergence entre les objectifs du Green Deal et ceux de la Quantum Europe Strategy** dessine ainsi une trajectoire cohérente : faire de la puissance de calcul quantique un levier de la neutralité carbone, en transformant la complexité computationnelle des systèmes énergétiques décarbonés en avantage compétitif européen.

4. Les prochaines étapes vers l'exploitation et l'intégration industrielle

Mais de nombreuses étapes restent à franchir avant que cette technologie puisse être pleinement exploitée. Dans ce contexte d'incertitude technique inhérente au caractère particulièrement innovant du calcul quantique et de ses applications, rappelons l'évidence : **les efforts de frugalité et d'efficacité énergétique sur les technologies existantes doivent encore s'intensifier et aucune perspective ne saurait nous en affranchir.**

La formation d'une main-d'œuvre qualifiée représente l'enjeu crucial. Actuellement, le nombre d'experts capables de travailler à l'intersection de l'informatique quantique et des sciences énergétiques reste largement insuffisant. Des initiatives éducatives ciblées sont indispensables pour combler ce déficit. C'est dans cette optique que la Commission européenne a décidé de créer en 2026 une **Académie Européenne des Compétences Quantiques**, marquant l'importance accordée à la formation de la prochaine génération de chercheurs et d'ingénieurs quantiques. De même, l'établissement de **Quantum Competence Clusters** à travers l'UE facilitera le transfert technologique et la collaboration entre acteurs académiques et industriels.

Enfin, un cadre réglementaire clair et éthique doit être établi pour garantir que les technologies quantiques soient développées et utilisées de manière responsable. Le Quantum Act 2026 devra aborder ces enjeux, notamment en matière de cybersécurité post-quantique, de gouvernance des données et d'impact environnemental global.

Comme l'Europe se trouve en tête avec les États-Unis dans cette course scientifique et technique – loin d'être le cas dans tous les domaines technologiques – et dès lors que l'approche consiste à mettre les promesses du calcul quantique au service du Green Deal,

faire le pari de l'expansion des qubits dans l'UE s'impose comme un impératif environnemental de premier ordre.

Les avancées de 2025 – le Prix Nobel de Physique attribué aux fondateurs de la technologie qubit de chat, la stratégie quantique européenne, la dynamique des levées de fonds – démontrent que l'écosystème est entré dans une phase d'accélération industrielle. Les prochaines années seront décisives pour transformer les promesses technologiques en solutions opérationnelles au service de la décarbonation européenne.

Références :

- Agence Européenne pour l'Environnement. (2026). « *Quantum Technologies and Decarbonisation: Emerging Synergies* ». *Policy Brief*.
- European Commission. (2025). *Quantum Europe Strategy. Digital Directorate*.
- European Commission. (2025). *Quantum Europe Strategy - European Quantum Skills Academy. Implementation roadmap for 2026*.
- European Commission. (2026). *Commission Work Programme 2026. Quantum Act legislative initiative (Q2 2026)*.
- European Parliament. (2026). « *Quantum Technologies: Can They Boost the EU's Decarbonisation?* ». *Briefing, February 19, 2026*.
- France 2030. (2025). *Stratégie Nationale Quantique - Bilan 2025*. Ministère de l'Enseignement Supérieur.
- Institut Quantique, Université de Sherbrooke. (2025). « *Comparative Life-Cycle Environmental Assessment of Quantum vs. Classical Computing* ». *Research Project*.