

Technologies quantiques pour l'énergie

Par Christophe DOMAIN

Avec Cyril BAUDRY, Pascale BENDOTTI, Quentin CHAN WAI NAM,

Étienne DÉCOSSIN, Mohamed HIBTI, Kyrilo KAZYMYRENKO,

Antoine MICHEL & Stéphane DUPRÉ la TOUR

EDF R&D

Le document présente la stratégie d'EDF R&D autour des technologies quantiques appliquées à l'énergie. Face aux limites futures du calcul haute performance (HPC), notamment en complexité, coûts et consommation, le calcul quantique est envisagé à EDF R&D comme une perspective permettant d'aborder des problèmes aujourd'hui inaccessibles. Les cas d'usage couvrent toute la chaîne de valeur du système électrique : optimisation des réseaux et de la production, sûreté nucléaire via les études probabilistes, modélisation physique (équations aux dérivées partielles) et vieillissement des matériaux. L'entreprise s'appuie sur de nombreux partenariats industriels et académiques pour co-développer des algorithmes solutions. Des applications connexes, comme les capteurs quantiques pour la détection de défauts, sont également explorées. En conclusion, le quantique constitue un levier stratégique complémentaire pour anticiper les ruptures technologiques, et renforcer la performance du système électrique.

Introduction : Enjeux du calcul quantique

EDF dispose d'un patrimoine numérique et scientifique considérable, développé depuis des décennies et structuré autour du calcul haute performance (HPC). Celui-ci constitue un levier stratégique pour la sûreté, la performance industrielle, et la résilience et l'optimisation du système électrique.

Les moyens HPC reposent sur des supercalculateurs en interne d'une puissance d'environ 10 Pflops. Leur puissance de calcul permet de réduire les hypothèses simplificatrices, d'explorer davantage de scénarios et de mieux intégrer les incertitudes dans les études.

Néanmoins, des limitations vont apparaître progressivement à moyen terme dans certains cas, telles que la taille et la complexité des problèmes à traiter, les limites des méthodes classiques pour traiter des problèmes complexes, tout comme le coût énergétique important des calculs. Ces constats conduisent EDF à anticiper les ruptures technologiques et à explorer des voies complémentaires, au premier rang desquelles figure le calcul quantique, avec la promesse d'accéder potentiellement à des calculs frontières non accessibles aujourd'hui.

Les cas d'usage du calcul quantique

Les technologies de calcul quantique ouvrent des perspectives nouvelles pour l'ensemble de la chaîne de valeur du système électrique. Les domaines

potentiellement concernés sont la production (e.g. le vieillissement des matériaux, les études probabilistes de sûreté des installations, la mécanique des structures), les réseaux, l'équilibre offre-demande (e.g. la planification des arrêts de tranches nucléaires, la programmation des moyens de production), les clients (e.g. la recharge intelligente des véhicules électriques et les services *vehicle-to-grid*, la prévision par apprentissage), les infrastructures IT internes (e.g. la cryptographie post-quantique, utilisation conjointe des processeurs classiques et quantiques pour les simulations).

Ces cas d'usage (voir la Figure 1) montrent que le calcul quantique apparaît comme une technologie complémentaire aux moyens HPC, intégré dans un écosystème hybride mêlant calcul classique, algorithmes avancés et futures machines de calcul quantique.

Ci-dessous, quatre cas d'usage sont plus particulièrement décrits.

Les problèmes d'optimisation occupent une place centrale pour EDF : le système électrique est un objet extrêmement complexe qu'il faut maîtriser tant d'un point de vue technique qu'économique. L'optimisation est ainsi au cœur de la planification et de l'exploitation du réseau, de l'équilibre offre / demande, de la répartition de la production, ainsi que de la gestion fine des flux de puissance. Certains de ces problèmes sont connus pour être de logique combinatoire, de grande dimension et difficiles, voire impossibles à résoudre à l'échelle industrielle avec les approches classiques.

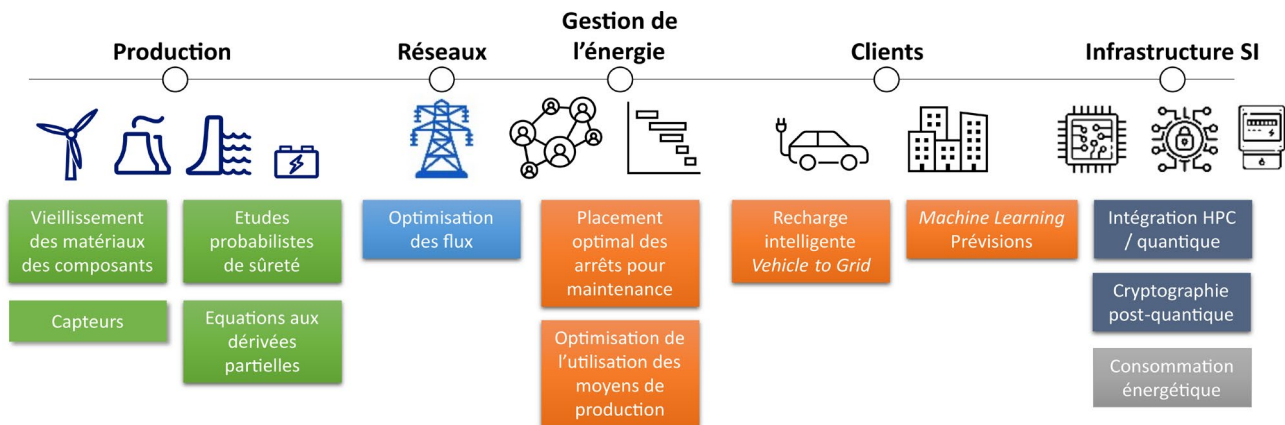


Figure 1 : Illustration des cas d'usage des technologies quantiques à EDF (Crédits : Étienne Décossin – EDF R&D).

Le premier cas d'usage traité par algorithme quantique dès 2019 est celui de la recharge intelligente de véhicules électriques. Le *smart charging* consiste à piloter intelligemment la recharge d'un véhicule électrique, afin qu'il puisse s'insérer dans le réseau tout en préservant l'équilibre offre / demande. L'idée à terme est de s'orienter sur du V2G (*vehicule-to-grid*) en pilotant non seulement la recharge, mais également en utilisant les batteries électriques pour les besoins d'équilibre du réseau. Une variante simplifiée de ce cas d'usage a été testée en émulation, puis utilisée pour la mise au point de la machine Fresnel de Pasqal (100 qubits). Cela illustre, d'une part, la capacité d'EDF à transformer un besoin métier concret en démonstrateur quantique, et, d'autre part, la capacité d'une machine quantique encore émergente à traiter des questions opérationnelles d'optimisation.

Ces dernières années, des travaux sont menés sur le problème de planification de la production d'électricité journalière, qui correspond au *unit commitment problem* (UCP). Le principe est de développer un algorithme hybride classique-quantique s'appuyant sur un algorithme classique de décomposition avec des sous-problèmes quantiques. L'intérêt est double : d'une part, pouvoir adapter la décomposition du problème en fonction des spécificités des algorithmes quantiques, d'autre part, permettre le passage à l'échelle.

Les études probabilistes de sûreté (EPS) sont des méthodes d'évaluation des risques fondées sur une investigation systématique, qualitative mais aussi quantitative, des scénarios accidentels d'un système. Elles sont aujourd'hui utilisées dans presque toutes les phases (design, construction, exploitation et démantèlement) de projets de systèmes industriels complexes, et font maintenant partie de la régulation dans le domaine de la production nucléaire de l'électricité. On les retrouve dans plusieurs domaines industriels tels que la pétrochimie, l'aviation ou l'espace. La modélisation des EPS se traduit par des arbres d'événements représentant tous les scénarios possibles à partir d'un événement initiateur. Trouver l'ensemble des combinaisons est alors complexe du fait de l'explosion combinatoire. Différents algorithmes quantiques sont étudiés et développés, plus particulièrement dans le cadre du *noisy intermediate-scale quantum* (NISQ), afin d'améliorer la précision et l'efficacité des études de sûreté.

La modélisation mathématique des principaux phénomènes physiques à l'œuvre dans les installations de EDF est réalisée par des systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP) : mécanique des structures, électromagnétisme, thermo-hydraulique. Résoudre ces EDP de manière efficace et précise est une tâche essentielle dans des domaines tels que la simulation de réacteurs ou l'analyse de l'intégrité structurelle des barrages, des conduites ou des éoliennes. Cependant, plus on cherche à atteindre une précision élevée, plus la résolution de ces équations devient complexe en raison de la malédiction de la dimensionnalité : l'augmentation de la résolution ou du nombre de variables entraîne une croissance exponentielle du coût de calcul et des besoins en mémoire. Dans ce contexte, le calcul quantique est étudié, avec comme objectif de surmonter à terme les limitations de calcul des méthodes classiques, en particulier pour les systèmes de grande dimension ou complexes. Actuellement, ces travaux sont dans le cadre du *noisy intermediate-scale quantum* (NISQ) en attendant les ordinateurs quantiques tolérant aux fautes (FTQC – *fault-tolerant quantum computer*).

L'anticipation du vieillissement des composants est un enjeu important pour EDF, renforcé dans le cadre de la prolongation de la durée d'exploitation du parc nucléaire. Le vieillissement des matériaux des batteries est également important pour la transition énergétique et le stockage de l'électricité. Le vieillissement des matériaux est étudié par différentes approches, parmi celles-ci, des travaux de modélisation basés sur les mécanismes élémentaires à l'échelle atomique sont menés afin de les caractériser précisément. Les calculs de structure électronique ne décrivent pas facilement correctement certains matériaux et mécanismes complexes, en particulier les matériaux dits fortement corrélés. Les algorithmes quantiques permettent potentiellement de traiter les corrélations électroniques, et sont étudiés par différentes méthodes, en particulier avec le modèle de Hubbard et une hybridation ou couplage entre les calculs de structure électronique « classique » et des calculs quantiques.

Dans ces cas d'usage décrits, les travaux portent à la fois sur les algorithmes et leur convergence, mais également sur l'encodage des données d'entrée sur les qubits de la façon la plus optimale possible.

Les partenariats

Pour l'ensemble des cas d'usage développés, EDF s'est attachée à établir de nombreuses collaborations avec les acteurs français et européens du quantique. La stratégie consiste à leur proposer des cas d'usage correspondant aux métiers de l'entreprise et d'évaluer comment les machines quantiques pourraient les traiter, dans une logique de codéveloppement permettant une mise en œuvre efficace, à terme, des algorithmes à l'échelle industrielle, et de stimuler une offre adaptée dans l'écosystème.

EDF est, par exemple, impliquée actuellement dans des projets collaboratifs en France et en Europe :

- le projet européen Pasquans2, sur la technologie des atomes de Rydberg, avec une contribution sur le développement d'algorithme analogue pour l'optimisation et la simulation des matériaux, avec Pasqal et Bull ;
- le projet BpiFrance i-Démo OECQ, piloté par EDF, sur l'optimisation énergétique des machines quantiques avec des algorithmes pour la simulation des matériaux et les équations aux dérivées partielles comme cas d'usage, avec Quandela, Alice & Bob, et le CNRS (laboratoire LPMCM de Grenoble et le laboratoire Majulab à Singapour), projet en lien avec la QEI (Quantum Energy Initiative) ;
- le projet Île-de-France AQADOC, piloté par Weling sur la parallélisation de calculs quantiques entre différents QPU sur des algorithmes pour l'optimisation, les équations aux dérivées partielles et les études probabilistes de sûreté, avec Pasqal, Quandela, le CNRS et avec Teratec.

Par ailleurs, en dehors du calcul quantique, les apports potentiels des capteurs quantiques sont investigués en complément des méthodes actuelles. L'accent est mis sur la détection de défauts par magnétométrie basée sur la technologie des centres NV, telle que développée par Qwan-tek dans des pièces métalliques dans le cadre des évaluations non destructives.

Conclusion

En conclusion, le quantique ne se substitue pas aux outils existants du calcul haute performance, mais constitue un axe stratégique complémentaire, exploré de manière pragmatique et orientée sur la résolution de cas d'usage. En s'appuyant sur son patrimoine numérique, son expertise scientifique et ses liens étroits entre recherche et métiers, EDF se donne les moyens d'anticiper les ruptures à venir et de transformer ces technologies émergentes en avantages compétitifs durables pour le système électrique.

Bibliographie

- CHMIELEWSKI N. M., AMINI N., JACQUOT P. & MIKAEL J. (2025), Quantum distance calculation for e-graph construction, <https://arxiv.org/abs/2306.04290>
- DONACHIE S., REMOND U., MATHOREL A. & KAZYMYRENKO K. (2025), Solving the 3D heat equation with VQA via remeshing-based warm starts, <https://arxiv.org/abs/2510.15645>
- GRISSET R., LAVDAS I. & JARKOVSKY J. G. (2025), "State-space reduction techniques exploiting specific constraints for quantum search initialization, Application to an outage planning problem" *Journal of Quantum Computing*, 7, 81.
- JULIÀ-FARRÉ S., MICHEL A., DOMAIN C., MIKAEL J., LAFOUCRIERE J.C., VOVROSH J., CHAHLAOUI A., CLAVEAU D., VILLARET G., DE HOND J., HENRIET L., BROWAEYS A., AYRAL T. & DAUPHIN A. (2025), Hybrid quantum-classical analog simulation of two-dimensional Fermi-Hubbard models with neutral atoms, <https://arxiv.org/abs/2510.05897>
- MICHEL A., HENRIET L., DOMAIN C., BROWAEYS A. & AYRAL T. (2024), "Hubbard physics with Rydberg atoms: Using a quantum spin simulator to simulate strong fermionic correlations", *Physical Review B*, 109, 174409.
- LECLERC L., DALYAC C., BENDOTTI P., GRISSET R., MIKAEL J. & HENRIET L. (2025), "Implementing transferable annealing protocols for combinatorial optimization on neutral-atom quantum processors: A case study on smart charging of electric vehicles", *Phys. Rev. A*, 111, 032611.
- REMOND U., EMERIAU P.-E., LYSAGHT L., RUEL J., MIKAEL J. & KAZYMYRENKO K. (2025), Quantum remeshing and efficient encoding for fracture mechanics, <https://arxiv.org/abs/2510.14746>
- SAIDI R., DELEPLANQUE S., CREEMERS S., FERNANDO L., ARMAS P., HIBTI M. & ZOUARI B. (2026), "Quantum annealing approaches for minimal cut set identification in fault trees", *Reliability Engineering & System Safety*, 276, 112907.