

Les enjeux énergétiques du calcul quantique à tolérance aux fautes

Par Olivier EZRATTY

Ingénieur, enseignant et chercheur indépendant dans les technologies quantiques

Marco FELLOUS-ASIANI

Chercheur en théorie de l'information et du calcul quantique chez Inria

& Pierre-Emmanuel EMERIAU

Responsable des algorithmes et des applications quantiques chez Quandela

L'essor de l'IA générative a remis au premier plan une question qui ne peut plus être esquivée : celle de l'empreinte énergétique des nouvelles technologies de calcul. Les ordinateurs quantiques à tolérance aux fautes (FTQC) ne font pas exception. Ces systèmes de demain s'appuieront sur des dizaines de milliers de qubits physiques ou bien plus, des ressources classiques de contrôle et de décodage considérables, de la cryogénie de puissance et du calcul classique. Leur consommation électrique totale pourrait rivaliser avec celle des plus grands supercalculateurs. Pourtant, les choix technologiques qui détermineront cette facture énergétique se font dès maintenant, dans les laboratoires et chez les industriels, malgré une incertitude scientifique encore forte. C'est l'objet d'une discipline émergente qui associe physique quantique, théorie de l'information, ingénierie des systèmes et économie, pour évaluer, optimiser et comparer la consommation énergétique de ces futurs systèmes.

L'avènement de l'IA générative rappelle que l'émergence de nouveaux usages du numérique n'est jamais neutre sur le plan de l'impact environnemental, créant une pression significative sur les infrastructures de production d'énergie électrique (World Bank, 2024). On ne devrait plus lancer de nouvelle technologie sans se soucier de son empreinte énergétique dès ses phases de conception, même lorsque ladite technologie est encore immature. C'est le cas des ordinateurs quantiques à tolérance aux fautes (FTQC, *fault-tolerant quantum computing*). Le FTQC est en effet très différent du calcul quantique actuel bruité (NISQ, *noisy intermediate-scale quantum*), car la correction d'erreurs qui le supporte multiplie par deux à trois ordres de grandeur le nombre de qubits physiques et les ressources classiques les pilotant (Eisert, 2025). Ce passage à l'échelle combine des défis physiques, d'ingénierie et algorithmiques, d'une complexité inédite.

D'où le besoin d'une nouvelle discipline à la croisée des chemins entre la physique quantique, l'ingénierie quantique, la conception de logiciels quantiques et l'économie, pour évaluer, comprendre, optimiser et comparer la consommation énergétique de ces nouveaux systèmes.

Où l'énergie est-elle consommée dans un ordinateur quantique ?

L'énergie des ordinateurs quantiques est consommée à plusieurs endroits, allant du quantique au classique (Ezratty, 2025).

Les qubits qui supportent le calcul quantique sont des objets physiques de très petite taille (atomes, électrons, circuits électroniques supraconducteurs) ou immatériels (photons) qui sont contrôlés ou générés par des signaux électromagnétiques de très faible niveau d'énergie. Il s'agit de signaux électroniques divers comme des pulsations micro-ondes (Van Dijk, 2019), des faisceaux lasers, ou des sources de photons uniques alimentées par des lasers. La différence entre l'énergie nécessaire pour générer ces signaux et ceux qui aboutissent dans les qubits peut atteindre plus de 10 à 15 ordres de grandeur pour de nombreuses raisons pratiques.

Le bruit quantique affecte la durée de vie des qubits et les qualités des opérations modifiant leur état. Il peut être soit réduit en améliorant la conception du support physique des qubits, soit atténué grâce à des mécanismes de correction d'erreurs reposant sur l'assemblage de qubits physiques en qubits logiques.

La correction d'erreurs maintient en état stable un qubit logique pendant une durée compatible avec celle de l'exécution du circuit quantique. Les fonctions dites de tolérance aux fautes visent à permettre l'exécution de portes quantiques logiques sur cette mémoire logique stabilisée (Ezratty, 2026).

De nombreux composants de la plupart des ordinateurs quantiques doivent être réfrigérés à très basse température, allant de 15 mK pour les qubits supraconducteurs (Krinner, 2019) à environ 4 K pour les sources et détecteurs pour les qubits à base de photons, ou pour les chambres utilisées pour les qubits à base d'atomes et ions piégés (Lim, 2026).

Enfin, un processeur quantique est toujours piloté par un ensemble d'ordinateurs classiques. Ceux-ci doivent non seulement réaliser les calculs servant à générer le circuit quantique exécuté par le processeur quantique, une tâche particulièrement lourde pour les applications de chimie quantique (Adjoua, 2026), mais aussi compiler ce circuit pour le transformer en une suite d'instructions qui pilotent l'électronique de contrôle ou la photonique qui exécute les portes et mesures quantiques sur les qubits. Le compilateur doit aussi mettre en œuvre les mécanismes de la correction d'erreurs et de la tolérance aux fautes. Pendant l'exécution du circuit, la correction d'erreurs requiert un mécanisme de calcul classique potentiellement coûteux qui sert à détecter où sont situées les erreurs dans les qubits physiques et comment les corriger. Enfin, il faut aussi réaliser des traitements classiques après l'exécution multiple du circuit quantique pour générer un résultat utile.

De l'énergie est consommée lors de toutes ces étapes, et sa minimisation est un défi, notamment du fait des interactions entre tous les composants mis en œuvre (Fellous-Asiani, 2023). Les optimisations relèvent d'approches réductionnistes ou holistiques. Elles sont réductionnistes si l'on améliore l'efficacité énergétique d'un composant comme un élément de la cryogénie, sans affecter les autres composants, et en particulier sans ajouter de nouvelles sources de bruits au niveau des qubits. Elles sont holistiques lorsqu'une optimisation génère une réaction en chaîne affectant l'efficacité énergétique d'autres composants, voire augmente, ou plus rarement diminue, le bruit qui affecte les qubits, et avec un bilan positif côté énergie consommée. Un exemple est le remplacement de l'électronique de contrôle fonctionnant à température ambiante des qubits supraconducteurs par de l'électronique cryogénique installée dans le cryostat. Cela réduit le besoin en câblage et la dissipation thermique des atténuateurs et filtres dans le cryostat au détriment de la dissipation thermique de cette électronique, et avec un impact potentiel sur la qualité des signaux de pilotage des qubits et la fidélité de leurs opérations (Fellous-Asiani, 2026).

Les particularités énergétiques du calcul quantique tolérant aux fautes

Plus le nombre d'opérations logiques d'un circuit est grand, plus il est coûteux à exécuter au niveau de chaque opération. En effet, la correction d'erreurs qui opère sur les qubits logiques présente un coût

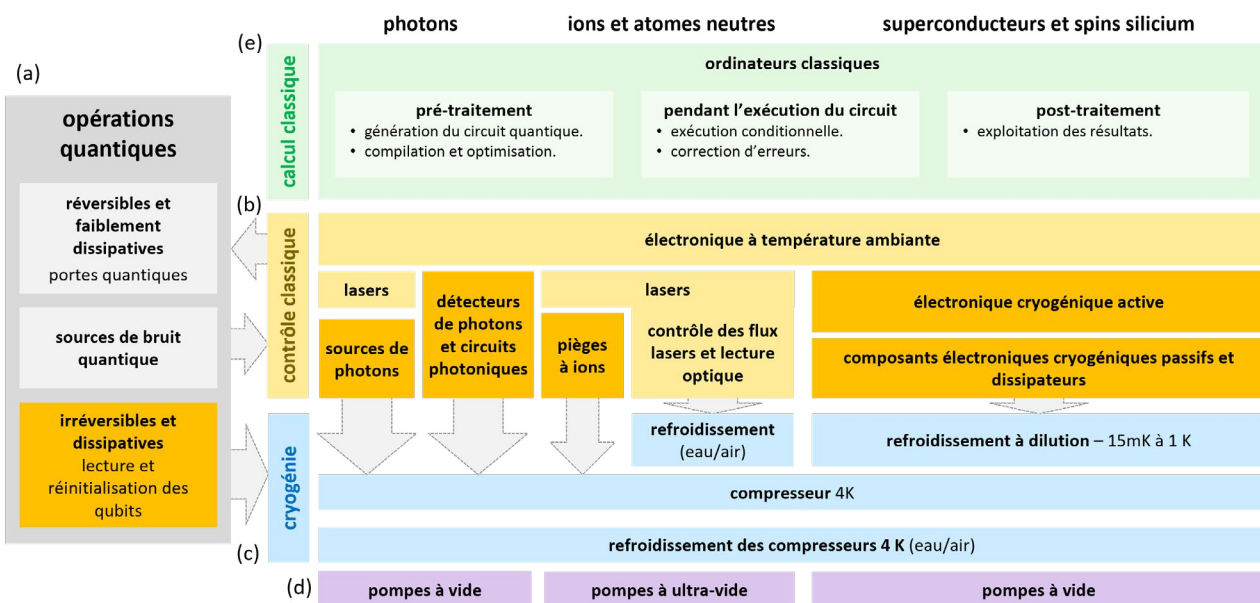


Figure 1 : Décomposition du coût énergétique d'un ordinateur quantique. Les zones en orange foncé indiquent les éléments dissipant de la chaleur et nécessitant un refroidissement cryogénique. Les flèches grises représentent des liens fonctionnels. (a) Niveau quantique : échanges énergétiques au niveau des qubits avec des opérations cohérentes (réversibles), des pertes générant des erreurs, des mesures et réinitialisations irréversibles. (b) Contrôle classique : électronique de génération des signaux de contrôle des qubits. Pour les architectures photoniques, sources, circuits et détecteurs opèrent en régime quantique. (c) Cryogénie : refroidissement des puces de qubits et de certains composants (sources / détecteurs de photons) et évacuation de la chaleur dissipée par l'électronique cryogénique active et passive. (d) Pompes à vide et ultravide pour les atomes froids et ions piégés. (e) Calcul classique avec la génération du circuit quantique, la compilation du code, la correction d'erreurs, l'exécution de code conditionnel et les post-traitements après les exécutions du circuit quantique. Tous ces composants sont interdépendants dans une démarche d'optimisation de la consommation d'énergie (Source : Inspiré de Fellous-Asiani, 2026).

physique, énergétique et temporel qui augmente avec la taille du circuit du fait de l'augmentation du nombre de qubits physiques par qubit logique et de celle des cycles de correction d'erreurs (Académie des Technologies, 2025).

Cela renforce le besoin de limiter le coût de la correction d'erreurs. Cela passe par trois voies principales : la réduction du bruit au niveau des qubits physiques ; la création de codes de correction d'erreurs plus efficaces ; et une meilleure communication quantique entre les qubits distants dans le processeur. Le premier point relève de l'étude de la partie quantique des qubits et de leurs opérations pour limiter leur bruit et optimiser leur efficacité énergétique lors des opérations de mise en superposition, de l'intrication et de la mesure des qubits. C'est un domaine qui est, notamment, couvert par le champ de l'énergie quantique (Auffèves, 2026). Optimiser les opérations à l'échelle quantique peut réduire les coûts classiques du contrôle des qubits.

Quelle consommation d'énergie globale est envisageable ?

Quelle est la consommation à venir des ordinateurs quantiques à tolérance aux fautes sachant que leur avènement va s'étaler selon les perspectives actuelles entre 2030 et 2040 avec des incertitudes liées à une technologie en plein développement, tant sur leur faisabilité que sur les applications qu'ils vont supporter ? On dispose de quelques indicateurs permettant de s'en faire une idée.

Les premières estimations des constructeurs d'ordinateurs quantiques montrent une grande disparité de puissance consommée par les machines en cours de conception. Un bon comparable consiste à prendre comme repère le support d'un minimum d'un millier de qubits logiques et d'au moins un milliard d'opérations dans un circuit.

On peut alors comparer la puissance actuellement consommée par les supercalculateurs, qui font surtout de l'informatique scientifique, et les futurs ordinateurs quantiques FTQC. Selon les premières indications des fournisseurs, les ordinateurs FTQC supportant au moins un millier de qubits logiques vont demander une puissance électrique pouvant aller de quelques centaines de kilowatts à au moins 100 MW. Certains types de qubits pourraient consommer peu d'énergie, comme les ions piégés, les atomes froids, certains types de photons, pour des raisons associant un moindre besoin en cryogénie et une meilleure connectivité entre les qubits.

D'autres, tels que les qubits photons ou supraconducteurs, pourraient consommer une puissance très variable selon la manière dont ils sont mis en œuvre. Cette distribution prospective de la puissance consommée présente un recouvrement avec celle qui est actuellement consommée par les plus grands calculateurs scientifiques. Les 100 premières de ces machines pourraient avoir une consommation qui couvre la plage allant de 1 à 40 MW à pleine charge de ces supercalculateurs (Strohmaier, 2025).

Faisons maintenant quelques hypothèses : tout centre de calcul scientifique s'équipe d'au moins un ordinateur quantique FTQC supportant au moins un millier de qubits physiques ; l'offre commerciale comprend d'ici une dizaine d'années des machines techniquement viables qui consomment entre quelques centaines de kW et 100 MW, avec une distribution voisine à celle des supercalculateurs existants ; les applications supportées relèvent dans un premier temps du calcul scientifique, et l'augmentation naturelle de la puissance des supercalculateurs qui équipent ces centres de calcul supportera la charge classique de pilotage de ces ordinateurs quantiques. On peut estimer alors que la puissance nécessaire sera d'un ordre de grandeur voisin de celle des supercalculateurs pris en référence. Elle correspond à environ 0,5 % de la puissance électrique consommée en 2022 par l'ensemble des technologies de l'information et de la communication dans le monde. On passerait donc de 0,5 à 1 %, *modulo* l'augmentation associée aux usages de l'IA générative. Et surtout, cela doublerait en moyenne la consommation d'énergie de leurs exploitants, qui sont, pour moitié, des centres de calcul académiques du secteur public (TPC 500, 2025).

Dans un autre scénario plus hypothétique, ces calculateurs FTQC serviront aussi à faire tourner des applications relevant des opérations au quotidien de nombreux secteurs d'activité comme les transports, la logistique, les services financiers et diverses autres industries (Babbush, 2025). Dans ce cas-là, les ordinateurs FTQC seraient probablement utilisés plus massivement et *via* des services dans le *cloud*. Cela pourrait ajouter un multiple de la puissance consommée dans le calcul scientifique, ce qui deviendrait non négligeable.

L'enjeu économique

En plus des applications supportées, la taille de marché du calcul FTQC dépendra de la consommation d'énergie et de ce qui en découle : le prix des machines et leur coût d'amortissement et d'exploitation global, ces grandeurs étant habituellement interdépendantes.

Il nous faut aussi intégrer le temps de calcul. En effet, l'énergie consommée pour exécuter un algorithme quantique va dépendre de la puissance électrique alimentant les ordinateurs classiques et processeurs quantiques qui le supportent ainsi que de leur durée d'exécution. Selon le type de qubits, les vitesses de calcul sont très variables. Cependant, lorsque l'on tient compte d'autres caractéristiques comme les fidélités des opérations physiques ainsi que la connectivité physique entre les qubits, et leur impact sur le coût de la correction d'erreurs, les temps de calcul pourraient se rapprocher entre machines supportant des types de qubits très différents (Zhang, 2025).

On doit s'intéresser au triptyque puissance-énergie-temps de calcul. La puissance conditionne le coût des infrastructures qui alimentent le centre de calcul en électricité. L'énergie impacte le coût de résolution d'un problème. Le temps de calcul est contraint par les exigences opérationnelles de l'utilisateur, qui dépendent des applications. Il pourra être particulièrement long pour certaines applications, notamment dans la simulation chimique (Eklund,

2026). Cela peut aboutir à faire de l'optimisation sous contraintes multiples.

Le calcul quantique risque de prendre la forme d'une transformation économique non schumpétérienne. Il va générer de la valeur, mais pas en détruire sur une technologie existante. Il complète et ne remplace pas le calcul classique. Il en renforce d'ailleurs même le besoin. Dans les simulations chimiques, la préparation classique du circuit quantique à exécuter sur le processeur FTQC pourrait coûter très cher (Adjoua, 2026 ; Louvet, 2026).

On sort donc d'un potentiel effet Jevons, selon lequel lorsque l'efficacité énergétique d'un usage d'une ressource augmente, la consommation totale de cette ressource peut augmenter plutôt que diminuer. Ici, la consommation d'énergie du calcul quantique sera toujours incrémentale. Sa justification viendra de la valeur ajoutée économique et sociétale des calculs supportés. Certains constructeurs mettent en avant que la valeur ajoutée de ces applications sera tellement significative que le coût énergétique de ces machines sera un problème secondaire. Il est cependant difficile de souscrire à cette approche solutionniste peu responsable¹.

On pourrait au contraire adopter une vision darwinienne de ce domaine émergent, selon laquelle seuls les plus légers survivront. Donc, ceux des constructeurs d'ordinateurs FTQC qui, à support applicatif équivalent, consommeront le moins d'énergie. Cela peut donner leur chance aux start-ups françaises et européennes dont les choix technologiques sont généralement plus soucieux de la consommation d'énergie, par exemple, avec des qubits à correction partiellement autonome comme chez Alice & Bob, des sources de photons déterministes plus efficaces chez Quandela (Wein, 2025) ou des systèmes plus denses comme les qubits de spin dans le silicium de Quobly.

Une approche interdisciplinaire

Traiter l'impact énergétique du calcul FTQC demande une approche interdisciplinaire, associant physique quantique, ingénierie des systèmes, sciences de l'information et économie. C'est l'ambition de la Quantum Energy Initiative (QEI), créée en 2022 par Alexia Auffèves (CNRS/Majulab), Robert Whitney (CNRS/LPMC), Janine Splettstoesser (Université de Chalmers) (Auffèves, 2022) et Olivier Ezratty. La QEI réunit plusieurs centaines de chercheurs et industriels pour développer méthodes et outils d'évaluation, d'optimisation et de *benchmarking* de la consommation énergétique des systèmes quantiques. Elle est à l'origine du groupe de travail IEEE P3329 dédié à la standardisation de ces mesures et évaluations.

¹Cette remarque porte sur les systèmes qui seront les plus consommateurs d'énergie, comme ceux de PsiQuantum qui vont atteindre 100 MW, soit deux fois et demie plus que le plus gros supercalculateur exaflops installé dans le monde. Ils ne seront pas pour autant plus performants que ceux qui consommeront entre 10 et 100 fois moins d'énergie. Aux endroits où ils sont en train d'être installés aux États-Unis (à Chicago), les besoins en électricité sont tels qu'ils influent à la hausse sur le prix de l'électricité pour les entreprises et foyers avoisinants. Cette électricité additionnelle est aux États-Unis souvent produite à partir d'énergies fossiles.

Le calcul quantique à tolérance aux fautes n'est pas seulement un défi physique et algorithmique : c'est un défi énergétique systémique, dont les contours se dessinent dès aujourd'hui. L'enjeu n'est pas de ralentir le développement du calcul quantique, mais de l'orienter intelligemment. Les choix technologiques faits aujourd'hui dans les laboratoires et chez les industriels (connectivité entre qubits, architecture de pilotage des qubits, méthodes de refroidissement, correction d'erreurs, etc.) entraîneront des conséquences énergétiques et économiques qui s'étaleront sur des décennies. Dans ce contexte, la recherche en énergétique du calcul quantique n'est pas un luxe académique : c'est une condition de viabilité industrielle. Seront acceptables les systèmes qui sauront concilier performance quantique et sobriété énergétique, une équation qui pourrait donner un avantage compétitif aux approches qui n'ont pas encore sacrifié l'efficacité sur l'autel de la puissance brute.

Bibliographie

ACADEMIE DES TECHNOLOGIES (2025), « État de l'art de l'ordinateur quantique tolérant aux fautes ».

ADJOUA O., FENIOU C., PIQUEMAL J-P. *et al.* (2026), "High performance quantum emulation for chemistry applications with hyperion", arXiv.

AUFFÈVES A. (2022), "Quantum technologies need a Quantum Energy Initiative", PRX Quantum.

AUFFÈVES A. & ELOUARD C. (2026), "Quantum energetics: Foundations, applications, in "Roadmap on Quantum Thermodynamics", *Quantum Science and Technology*, pp. 6-8.

BABBUSH R., MCCLEAN J. R., O'BRIEN T., RUBIN N. C. *et al.* (2025), "The Grand Challenge of Quantum Applications", arXiv

EKLUND E. C., TIKKU A., SINNOTT P., HUGGINS W. J., LOW G. H., BERRY D. W. & KASSALI I. (2026), "End-to-end simulation of chemical dynamics on a quantum computer", arXiv.

EISERT J. & PRESKILL J. (2025), "Mind the gaps: The fraught road to quantum advantage", arXiv.

EZRATTY O. (2026), "How to compare logical qubits", *Opinions Libres*.

EZRATTY O. (2025), "Understanding quantum technologies 2025", arXiv, *Opinions Libres* et *Le Lab Quantique*, pp. 298-320.

FELLOUS-ASIANI M., CHAI J. H., THONNART Y., NG H. K., WHITNEY R. S. & AUFFÈVES A. (2023), "Optimizing resource efficiencies for scalable full-stack quantum computers", PRX Quantum.

FELLOUS-ASIANI M., EMERIAU P.E., STEVENS J., PEZZUTTO M., OMAR Y. & EZRATTY O. (2026), "The energetic challenges of fault-tolerant quantum computing". En préparation.

KRINNER S. *et al.* (2019), "Engineering cryogenic setups for 100-qubit scale superconducting circuit systems", EPJ-QT.

LIM D., MAMANN H., PICHARD G., BOURACHOT L., LINDBERG A., HAMOT C., LE BARS H., FASOLA F., TAN S., COURNEZ G., DUTARTRE S., CARTRY T., LEMETTRE S., HOSTEIN R., PARIS J., FERREYROL F., COLLARDEY A., SIGNOLES A., LAHAYE T., MONMEYRAN C. & XIMENEZ B. (2026), "Defect-free arrays at the thousand-atom scale in a 4-K cryogenic environment", arXiv.

LOUVET T., AYRAL T. & WAIN TAL X. (2026), "Feasibility of Performing Quantum Chemistry Calculations on Quantum Computers", *Physical Review B*.

MCCOLLUM D. L., SHARMA N., PAN M., YAO W., BHANJA S., CHEHADE S. & DELGADO A. (2026), "Uncertain quantum computing futures and potential energy and physical resource impacts at scale", *Renewable and Sustainable Energy Transition*.

STROHMAIER E., DONGARRA J., SIMON H. & MEUER M. (2025), "TOP500 Supercomputer Sites".

TPC 500, November 2025.

VAN DIJK J.P.G. *et al.* (2019), "Impact of classical control electronics on qubit fidelity", *Physical Review Applied*.

WEIN S. C., SENELLART P., BOURDONCLE B., MANSFIELD S. *et al.* (2025), "Minimizing resource overhead in fusion-based quantum computation using hybrid spin-photon devices", *PRX Quantum*.

WORLD BANK. (2024), "Measuring the emissions and energy footprint of the ICT sector: Implications for climate action".

ZHANG J., GUO G.-P. *et al.* (2025), "Scalable constant-time logical gates for large-scale quantum computation using window-based correlated decoding", arXiv.