

Vers des technologies quantiques responsables

Alexia Auffèves

Directrice de recherche CNRS
International Research Laboratory,
MajuLab (Singapour)

Olivier Ezratty

Consultant et auteur

Robert Whitney

Chargé de recherche CNRS, LPMMC
(Grenoble)

Les progrès des technologies quantiques laissent entrevoir la réalisation de calculateurs quantiques capables d'outrepasser largement les performances des calculateurs classiques dont la puissance de calcul arrive à saturation. Dans une démarche écologique originale, les auteurs se penchent sur la question cruciale de l'empreinte numérique de ces futurs calculateurs quantiques qui, en plus d'un avantage computationnel avéré, pourraient bénéficier d'un « avantage énergétique quantique ». La « Quantum Energy Initiative » (QEI) se propose de fédérer à l'échelle internationale les équipes de recherche fondamentale et les entreprises du secteur des technologies quantiques préoccupées par les aspects énergétiques de ces futurs développements.

L'empreinte énergétique du numérique

Pour comprendre l'approche que nous préconisons, l'exemple de l'empreinte énergétique du numérique des serveurs est révélateur. L'efficacité énergétique de ces systèmes est le ratio d'une performance sur une consommation énergétique. Celle des serveurs peut s'exprimer ainsi en FLOPS/W, les FLOPS exprimant le nombre d'opérations en virgule flottante par seconde. Depuis la naissance de l'informatique, cette efficacité a doublé tous les 18 mois. C'est la loi de Koomey, avec un record actuel pour les supercalculateurs de 52 GFLOPS/W [1].

Paradoxalement, ces progrès fulgurants n'ont pas empêché l'explosion de la consommation énergétique mondiale pour alimenter les technologies numériques. Celles-ci consomment maintenant 11% de l'électricité dans le monde, les centres de calcul représentant le quart de cette empreinte énergétique. Elle augmente

au gré des usages, notamment liés à l'apprentissage machine. L'augmentation de la consommation affecte aussi les matières premières du fait de l'obsolescence rapide des terminaux, des serveurs et des systèmes de stockage dans les centres de calcul.

Ces phénomènes ne sont qu'une nouvelle manifestation de l'effet rebond, formalisé par William Stanley Jevons en 1865. Les gains en efficacité induisent automatiquement la baisse du coût associée aux ressources. Sans régulation des marchés et des usages, ils provoquent une croissance de la consommation globale (figure 1).

Pour autant, cela ne signifie pas qu'améliorer l'efficacité énergétique des ordinateurs est condamnable en soi. Au contraire, c'est l'unique solution pour maintenir des performances avec des ressources énergétiques et matérielles limitées : c'est l'approche que nous défendons pour les technologies quantiques dans ce qui suit.

Avantages quantiques

Actuellement, les puissances de calcul et les efficacités énergétiques des calculateurs classiques arrivent à saturation. Cet essoufflement motive la communauté du numérique à rechercher des technologies alternatives. Grâce à la cohérence, la superposition et l'intrication quantiques, les ordinateurs quantiques promettent une accélération exponentielle de la vitesse de calcul par rapport à leurs homologues classiques, en fonction de la taille et de la nature des problèmes à résoudre [2].

Cet « avantage computationnel » est prédit pour des processeurs idéaux, sans erreurs. En réalité, les processeurs quantiques sont bruités, avec des taux d'erreurs dépassant actuellement les 0,1 % par opération, une valeur rédhibitoire pour la plupart des algorithmes. Deux voies sont actuellement envisagées. À court terme, on souhaite créer des algorithmes pouvant fonctionner sur de tels processeurs bruités. Ce nouveau para-

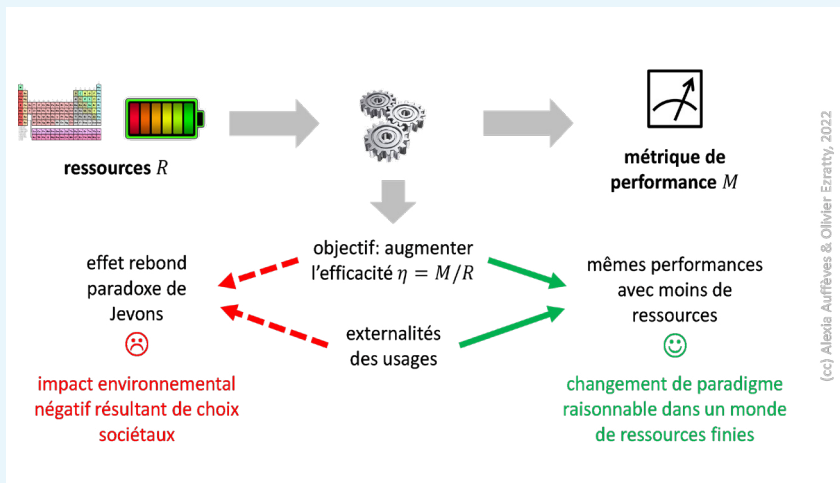


Figure 1 : Efficacité énergétique et effet rebond. Une machine consomme des ressources matérielles et énergétiques pour réaliser une tâche avec une performance M . Son efficacité est définie par le ratio $\eta = \frac{M}{R}$.

●●● digme pour le calcul quantique est appelé NISQ (Noisy Intermediate Scale Quantum). La deuxième voie est la correction d'erreur quantique. Celle-ci repose sur un grand nombre de qubits dits physiques pour créer des qubits corrigés propres au calcul, dits qubits logiques. Ce nombre varie de 30 à 10 000 selon les technologies de qubits employées. Les mécanismes associés de correction d'erreur augmentent considérablement le nombre d'étapes de calcul.

Dans les deux cas, la démonstration d'un avantage computationnel pour des processeurs quantiques réels est une question ouverte et activement explorée, tant expérimentalement que théoriquement. A l'opposé, la question de l'empreinte énergétique du calcul quantique est pour l'instant restée une lettre morte des stratégies de déploiement, qui se focalisent sur les défis scientifiques et technologiques à relever pour créer des ordinateurs quantiques utiles. Pour autant, nous soutenons qu'il est essentiel de s'y intéresser dès maintenant et le plus en amont possible. Le fait que nous opérons dans un monde aux ressources finies est un fait, et cela impacte la façon dont nous devrions déployer toute technologie nouvelle. D'autre part, les ordinateurs quantiques pourraient être moins énergivores que les ordinateurs classiques pour résoudre un même problème (figure 2). Cet avantage quantique énergétique pourrait devenir leur motivation première – mais

le faire émerger requiert des efforts de recherche importants et spécifiques.

Efficacité énergétique

Pour adresser ces questions, la clef est de modéliser et d'optimiser l'efficacité énergétique de calculateurs quantiques réels, en tenant compte des ressources utilisées pour le contrôle et la correction d'erreur. En tant que ratio d'une performance sur une ressource, cette efficacité énergétique est une quantité hybride :

- La performance de calcul émerge au niveau fondamental, et résulte de la capacité à contrôler le processeur quantique bruité pour qu'il effectue un algorithme avec une certaine précision. Comprendre et optimiser ces mécanismes relève du contrôle

quantique, de la thermodynamique quantique, de la correction d'erreur quantique et de l'algorithmique.

- Réciproquement, établir un contrôle satisfaisant au niveau quantique requiert la mise à disposition de ressources au niveau macroscopique, qui fixe la consommation énergétique nécessaire à la réalisation du calcul. C'est le domaine des technologies habilitantes comprenant la cryogénie, l'électronique de contrôle, le câblage, les lasers, les amplificateurs, les détecteurs...

On comprend dès lors la nécessité d'une démarche pluridisciplinaire, les optimisations énergétiques impliquant des paramètres provenant de multiples champs d'expertise. Il est essentiel de mettre en place un modèle de calculateur couplant les différents niveaux de description, ainsi qu'un langage et des concepts communs. Sur cette base, la méthodologie est extrêmement simple :

- une performance visée au niveau microscopique définit une relation implicite entre les différents paramètres du modèle ;
- la consommation énergétique macroscopique est alors minimisée sous cette contrainte.

Premiers résultats

Nous avons appliqué notre méthodologie sur un modèle d'ordinateur quantique supraconducteur, qui a donné lieu

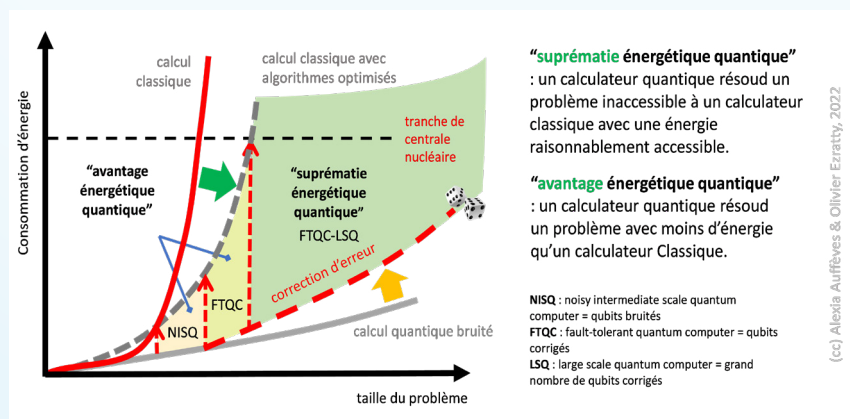


Figure 2 : Différents régimes d'avantage énergétique quantique.

à la première démonstration d'avantage quantique [3]. Nous avons considéré des algorithmes typiques employés pour l'optimisation, les simulations physiques, l'apprentissage machine quantique ainsi qu'en cryptanalyse pour la factorisation de nombres entiers. Nous avons intégré dans la modélisation (voir figure 3) :

- les sources du bruit quantique affectant les qubits ;
- les ressources de contrôle classique des qubits tels que l'électronique qui génère des pulsations micro-ondes et des tensions, les filtres et atténuateurs, la cryogénie, les câbles et les amplificateurs utilisés pour la lecture de l'état des qubits ;
- les sources de dissipation thermique intervenant dans toute la chaîne matérielle et en particulier dans le cryostat ;
- La taille du code utilisé pour corriger les erreurs. Plus précisément, nous avons considéré le code dit de Steane, l'un des plus gourmands en ressources mais aussi l'un des mieux documentés. Les prédictions que nous avons réalisées sont donc pessimistes, et les consommations énergétiques pourront être réduites en considérant d'autres types de codes.

Le modèle permet d'établir une relation entre les paramètres microscopiques du processeur comme la fidélité des qubits, avec les paramètres macroscopiques de contrôle des qubits. Il permet de minimiser la consommation énergétique de l'ordinateur complet, sous contrainte d'atteindre une performance de calcul visée [4].

Naturellement, les résultats dépendent fortement de la fidélité des qubits : un gain d'un facteur 10 entraîne un gain énergétique d'un facteur 100. Nous avons pu adresser des questions impactant fortement la construction de l'ordinateur, telle que la température de l'électronique de contrôle. Pour des technologies de type CMOS avec une hypothèse de consommation de 2 mW par qubit [5], la température ambiante est préférable. Avec des technologies à base d'électronique supraconductrice, placer l'électronique au niveau du processeur semble la meilleure solution. Dans le premier cas, la contrainte technologique se situe dans le câblage qu'il faut trouver le moyen de simplifier, essentiellement par des techniques de multiplexage avancées.

Enfin, nous avons étudié la possibilité d'observer un avantage quantique de nature énergétique. Nous avons calculé la consommation d'énergie minimale

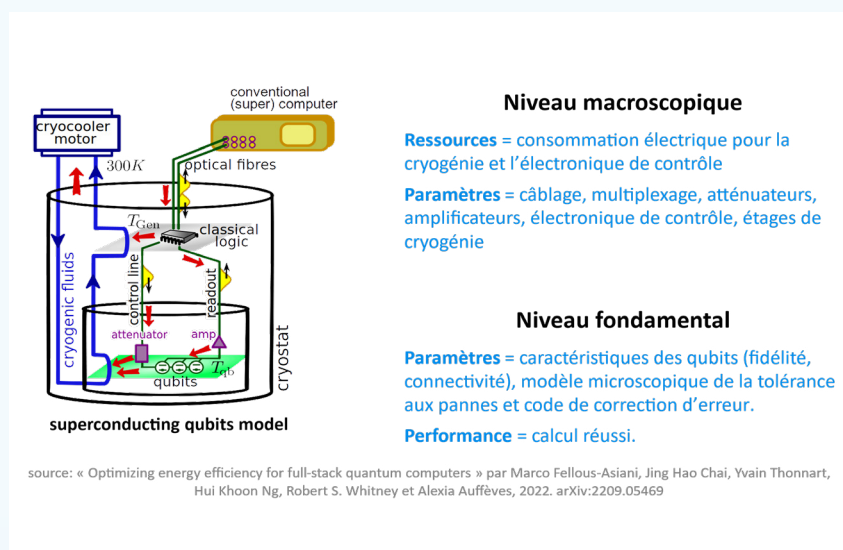


Figure 3 : Modèle « full-stack » d'ordinateur quantique supraconducteur couplant un niveau quantique et un niveau macroscopique de description.

Les auteurs

Alexia Auffèves est directrice de recherche CNRS au MajuLab (Singapour). Elle est spécialisée en thermodynamique quantique et en énergétique des technologies quantiques. Elle a lancé en 2022 la Quantum Energy Initiative. Ancienne élève de l'ENS de Lyon et licenciée en philosophie, elle a effectué sa thèse en physique quantique expérimentale sur les chats de Schrödinger et la frontière classique-quantique dans le groupe de Serge Haroche au LKB de l'ENS.



Olivier Ezratty est consultant et auteur spécialisé dans les technologies quantiques, notamment des ouvrages de référence « Comprendre l'informatique quantique » (septembre 2020) et sa version en anglais « Understanding Quantum Technologies » (septembre 2021 en 2022), diffusés gratuitement en PDF. Il anime deux séries de podcasts (Quantum et Decode Quantum) avec Fanny Bouton. Il est aussi enseignant et formateur sur les technologies quantiques à l'EPITA, au CEA INSTN ainsi que pour Capgemini Institut, expert pour Bpifrance et personnalité qualifiée du plan France 2030.



Robert Whitney est chargé de recherche CNRS au LPMMC (Laboratoire de Physique et Modélisation des Milieux Condensés) du CNRS à Grenoble. C'est un physicien spécialisé dans les questions de thermodynamique intervenant dans les circuits nanométriques et dans la dissipation en mécanique quantique. Il travaille sur l'énergétique du calcul quantique depuis 2019.



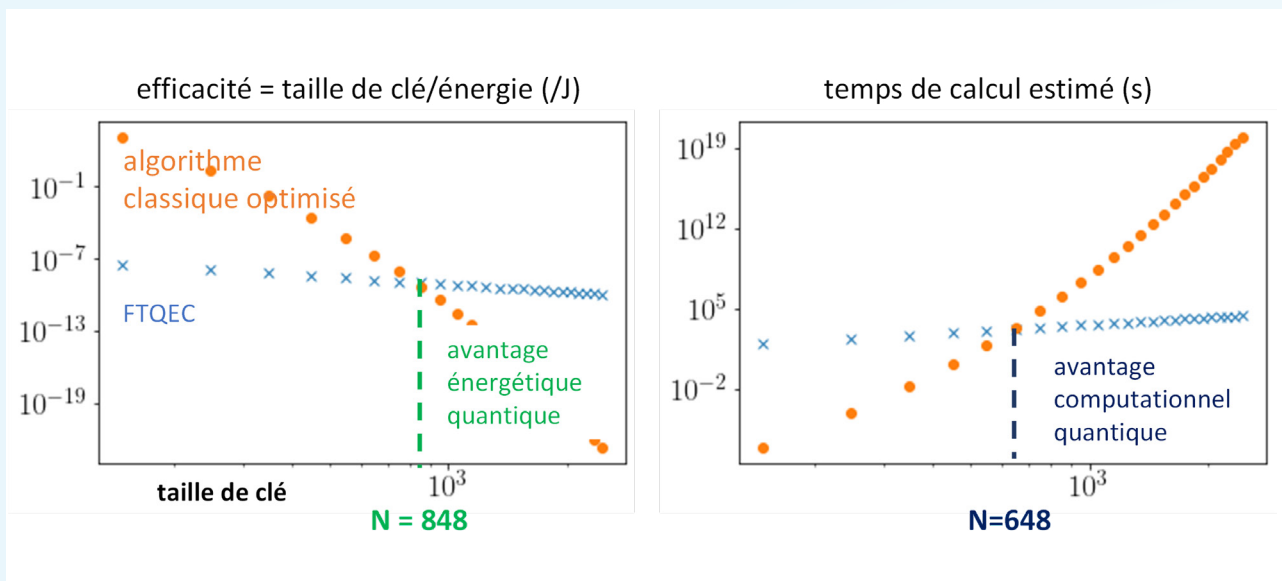


Figure 4 : Premiers résultats d'estimation de l'avantage énergétique quantique. Source : Rob Whitney, Marco Fellous-Asiani et Alexia Auffèves.

●●● d'un ordinateur quantique à tolérance de panne pour factoriser un entier de N bits et l'avons comparée au record de factorisation classique d'une clé RSA. La factorisation classique est connue pour être un problème extrêmement difficile et le record a été établi en 2021 par une équipe Inria sur un supercalculateur basé en Allemagne, pour la factorisation d'une clef de 829 bits [6]. Cela a nécessité la consommation de 965 GJ, soit une puissance de 1,3 MW sur 8,6 jours. Nos modèles montrent qu'un ordinateur quantique opérant avec des qubits 2000 fois plus fidèles que ceux de Google en 2019, associés à un code de Steane, demanderait 2,7 GJ, soit 2,9 MW pendant 16 minutes, qui est la quantité d'énergie contenue dans environ 75 litres de fioul. Ce serait 350 fois moins d'énergie que celle utilisée par le superordinateur. Caser une clé RSA de 2048 bits est inaccessible à un supercalculateur classique. Sur un ordinateur quantique du même type que précédemment, la consommation d'énergie serait de 38 GJ, soit 7 MW pendant 1,5 heure.

Nous avons réalisé nos estimations pour différentes tailles de clef dans le cas classique et dans le cas quantique (figure 4), donnant accès à une efficacité énergétique dans chaque cas. Un avantage quan-

“ La factorisation classique est connue pour être un problème extrêmement difficile et le record a été établi en 2021 par une équipe Inria sur un supercalculateur basé en Allemagne, pour la factorisation d'une clef de 829 bits. ”

tique énergétique est manifeste à partir de $N=848$. Cet avantage énergétique est de nature différente de l'avantage computationnel, qui considère uniquement le temps de calcul. Les deux avantages sont ainsi atteints pour des tailles de clef différentes. Rappelons que le code correcteur envisagé est gourmand en ressources et que le résultat serait bien moindre avec, par exemple, un code de surface.

Quantum Energy Initiative

Les travaux présentés ci-dessus sont une première étape dans le développement d'une approche pluridisciplinaire et systémique de l'empreinte énergétique des technologies quantiques. Cette approche est le cœur de la Quantum Energy Initiative (QEI), dont les grandes lignes sont présentées dans une Perspective publiée par la revue PRX Quantum [7].

La QEI ambitionne d'appliquer la méthodologie présentée ci-dessus à l'ensemble des types de qubits mis au point par les laboratoires de recherche et entreprises dans le monde. Cela comprend notamment les qubits silicium, les qubits à ions piégés, à base d'atomes neutres et enfin, de photons. Les trois principaux paradigmes de calcul quantique devront aussi être évalués, à savoir le calcul programmable à portes quantiques, le recuit quantique et la simulation quantique. Cela permettra d'exploiter la dimension énergétique pour les comparer et les mettre à l'échelle. Ces efforts mettent aussi en jeu l'ensemble de la chaîne logicielle du calcul quantique et en particulier les codes de correction d'erreur, les algorithmes et les compilateurs.

Ces travaux pourront déboucher sur la mise en place d'un système de bench-

marking de type « Q-Green 500 » permettant de comparer les meilleurs ordinateurs quantiques du point de vue de leur efficacité énergétique. Ils constitueront également une base pour la création d'outils et de modèles visant à dimensionner les architectures des ordinateurs quantiques du point de vue énergétique en intégrant l'ensemble de leurs composantes matérielles - quantiques et classiques - et logicielles. Ils fourniront des éléments de feuille de route et

des cahiers des charges aux entreprises du secteur des technologies habilitantes comme par exemple, des repères de référence de la consommation énergétique des systèmes d'électronique de contrôle.

Enfin, la QEI déborde le calcul quantique et a vocation à s'élargir rapidement à l'ensemble des technologies quantiques, à savoir les télécommunications, les capteurs, et la métrologie quantiques. La QEI a été lancée à partir d'une équipe interna-

tionale de chercheurs basée en France et à Singapour. Elle s'étend actuellement à des équipes de recherche et des startups qui mettent au point des qubits dans les principales technologies du marché. Elle s'inscrit dans une démarche d'innovation responsable regroupant toutes les parties prenantes d'un riche écosystème d'acteurs [8]. Par cercles concentriques, elle a vocation à s'étendre à l'échelle européenne puis mondiale pour prendre à bras le corps un sujet incontournable. ■

Références

[1] Top500, Juin 2022, <https://www.top500.org/lists/top500/2022/06/>

[2] Understanding Quantum Technologies, Olivier Ezratty (2022, cinquième édition), dont les chapitres de vulgarisation sur le calcul quantique et sur les technologies habilitantes PDF téléchargeable sur oezratty.net et [arXiv:2111.15352](https://arxiv.org/abs/2111.15352).

[3] Quantum supremacy using a programmable superconducting processor and supplemental materials, F. Arute, et. al, Nature 574, 505 (2019).

[4] Optimizing resource efficiencies for scalable full-stack quantum computers par Marco Fellous-Asiani, Jing Hao Chai, Yvain Thonnart, Hui Khoon Ng, Robert S. Whitney,

Alexia Auffèves (2022) en cours de publication - <https://arxiv.org/abs/2209.05469>

[5] A Scalable Cryo-CMOS 2-to-20GHz Digitally Intensive Controller for 4x32 Frequency Multiplexed Spin Qubits/Transmons in 22nm FinFET Technology for Quantum Computers par Patra, Bishnu; Van Dijk, Jeroen P.G.; Corna, Andrea; Xue, Xiao; Samkharadze, Nodar; Sammak, Amir; Scappucci, Giordano; Veldhorst, Menno; Vandersypen, Lieven M.K.; Babaie, Masoud, 2020 IEEE International Solid-State Circuits Conference, <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:cf53a0cb-6cd0-4244-ac19-eb55765c68f9/datastream/OBJ/download>

[6] The State of the Art in Integer Factoring and Breaking Public-Key Cryptography by Fabrice Boudot, Pierrick Gaudry, Aurore Guillevic, Nadia Heninger, Emmanuel Thomé and Paul Zimmermann, June 2022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03691141>

[7] Quantum technologies need a quantum energy initiative par Alexia Auffèves, PRX Quantum (2022) -<https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/PRXQuantum.3.020101> et <https://quantum-energy-initiative.org/>

[8] Mitigating the quantum hype, Olivier Ezratty (2022) [arXiv : 2202.01925](https://arxiv.org/abs/2202.01925), qui évoque notamment les contours d'une innovation responsable dans les technologies quantiques.

Résumé

Les technologies quantiques promettent de calculer plus vite, de mesurer plus précisément et de communiquer de façon plus sûre que leurs équivalents classiques. De nombreux défis scientifiques et technologiques doivent être relevés pour qu'elles deviennent une réalité. Alors que l'accent s'est porté jusqu'à présent sur les performances brutes, une initiative est lancée pour qu'une approche systémique de leur empreinte énergétique soit développée dès leur conception. La Quantum Energy Initiative vise à mettre en synergie la recherche fondamentale et l'industrie pour maximiser l'efficacité énergétique des technologies quantiques, avec la motivation de faire émerger un avantage quantique de nature énergétique. La volonté est d'engager le plus en amont possible un processus d'innovation responsable partagé par les acteurs de l'écosystème quantique international. ■

Abstract

Quantum technologies promise to compute faster, measure more accurately and communicate more securely than their classical counterparts. Many scientific and technological challenges must be overcome for them to become a reality. While the focus so far has been on raw performance, an initiative is being launched to ensure that a systemic approach to their energy footprint is developed from their design. The Quantum Energy Initiative aims to bring together fundamental research and industry to maximize the energy efficiency of quantum technologies, with the motivation of creating a quantum energy advantage. The aim is to engage as early as possible in a process of responsible innovation shared by the actors of the international quantum ecosystem. ■