



Digital
Engineering

QUANTIQUE

FEUILLE DE
ROUTE 2022

Les barrières technologiques et physiques des supercalculateurs conventionnels se rapprochent inexorablement. L'alternative et le changement de paradigme proposés par le calcul quantique sont prometteurs. Le domaine évolue très vite, les applications et les cas d'utilisation potentiels se multiplient. Définir et suivre les jalons du développement de l'informatique quantique (matériel et logiciel) est un rôle que Systematic, l'écosystème Deep tech Francilien, remplit avec cette nouvelle édition de sa feuille de route « quantique ».

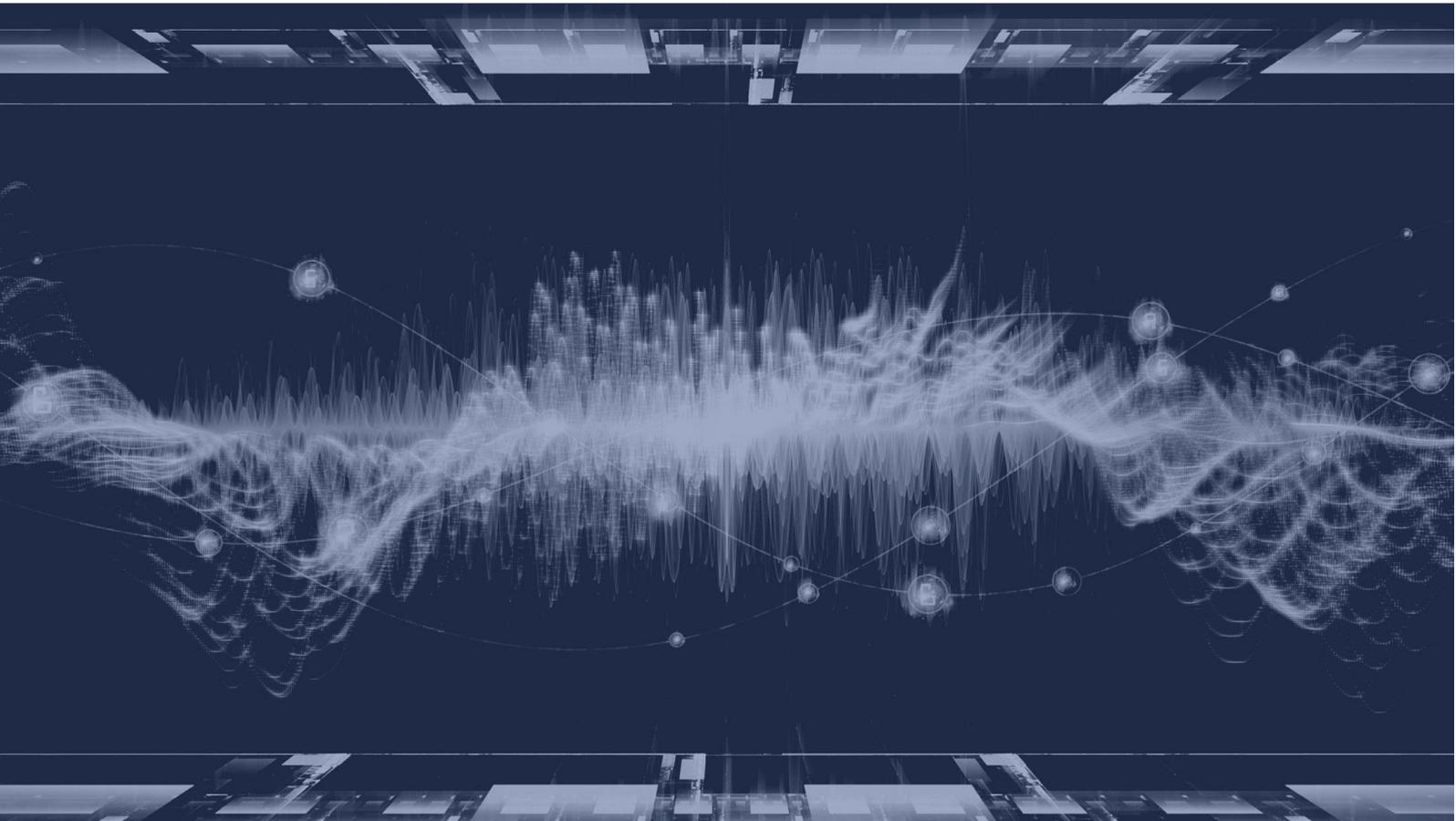


Table des matières

Quantique

Table des matières	1
1. Périmètre technique – Généralités	2
2. Périmètre technique détaillé	4
3. Orientations techniques & stratégiques	12

1. Périmètre technique - Généralités

L'évolution des moyens de calcul haute performance suivait jusqu'à quelques années la loi de Moore. Elle stipulait que la puissance de calcul fournie par les ordinateurs doublait tous les 18 à 24 mois grâce en particulier à l'augmentation de la densité des transistors sur une puce. Or cette puissance n'augmente plus que de 4% par an depuis 2015.

Si les meilleures finesses de gravure des puces sont aujourd'hui inférieures à 7 nm, elles ne pourront pas descendre beaucoup plus bas car limitées par les dimensions atomiques (seul 0,3 nm sépare deux atomes dans le cristal de silicium). Pour débloquent ce verrou, des alternatives sont donc recherchées comme la mise en parallèle de processeurs de plus en plus nombreux. Mais ces supercalculateurs, très énergivores, sont eux-mêmes confrontés à d'autres barrières comme la loi d'Amdahl qui limite l'efficacité de la parallélisation.

On a imaginé assez tôt à partir des années 70 que des machines quantiques pourraient améliorer des algorithmes de calcul grâce aux propriétés de superposition et d'intrication, phénomènes clés de la physique quantique. David Shor a démontré en 1994 la réalité théorique d'accélération véritablement exponentielles avec son algorithme de factorisation. Ce coup de tonnerre a lancé la course au calcul quantique. En 1998, ont suivi les premières expérimentations physiques de qubits (IBM).

Depuis quelques années les premiers processeurs existent et fonctionnent, validant ainsi les concepts de base et permettant d'être confiant pour l'avenir de ces technologies alors qu'ils n'étaient encore que hypothétiques il y a seulement 10 ans. Ces démonstrations restent cependant éloignées de tout usage industriel car les ordinateurs quantiques actuels sont trop limités. La qualité des éléments quantiques (qubits pour quantum bits) n'est pas suffisante pour envisager une exploitation économique.

L'enjeu aujourd'hui, pour tous les acteurs, est de construire le processeur quantique qui permettra d'offrir un gain économique par rapport aux technologies classiques sur un cas d'usage. C'est ce que l'on appelle l'avantage quantique. Cette rupture est envisagée à l'horizon 2023-2024.

Avantage ne veut donc pas dire obligatoirement une accélération exponentielle par rapport à un ordinateur classique, une accélération polynomiale est aussi bonne à prendre. Même à accélération nulle un gain financier et écologique est attendu en raison du gain important en consommation électrique (>20 MW/h pour une machine exaflopique classique).

a. On distingue 3 volets matériels, comme pour le HPC traditionnel :

- **Réseau** : essentiellement fondé sur les propriétés quantiques des photons, ce volet est traité dans le hub Optique.
- **Stockage** : un système de n qubits peut en théorie séparer et stocker 2^n éléments d'information, ce qui constitue une forme d'accélération, mais qui repose sur le concept de QRAM, qui n'a pas été expérimenté à ce jour dû à la propriété / difficulté du non clonage de l'information quantique. Encore plus que le calcul, la QRAM souffre des problèmes de stabilité inhérents aux superpositions et intrications forte quantiques. Ce verrou technologique est intégré dans le Hub "Digital Engineering" en veille technologique.
- **Calcul** : au cœur du Hub "Digital Engineering", la partie optique du calcul quantique est traitée conjointement avec le hub "Optics & Photonics".

b. On distingue aussi 2 volets logiciels :

- **Couche logiciel**, du bas niveau au middleware
- **Applicatif** : parmi ceux-ci, on peut distinguer une catégorie particulièrement importante, les outils d'émulation, par exemple de type QLM d'Atos (émulateur matériel-agnostique et permettant de tester la robustesse des algorithmes au bruit) ou Perceval de Quandela.

c. Les différentes architectures d'accélération quantique en visibilité aujourd'hui sont les suivantes :

- **Calcul quantique adiabatique**
- **NISQ** (Noisy Intermediate Scale Quantum computing), à qubits physiques
 - circuits à portes quantiques
 - simulation analogique
- **LSQ** (Large Scale Quantum Computing), à qubits logiques

d. Ces architectures peuvent être émulées par des logiciels classiques ce qui permet de développer des algorithmes quantiques sans disposer encore de QPU :

- **QLM** (émulateur matériel-agnostique) et myQLM
- **Emulateurs propriétaires** des fournisseurs de QPU (Perceval, émulateur Pasqal,...)
- **Emulateurs Open Source**

Les bases matérielles sont défrichées. Les progrès nécessaires (en termes de passage à l'échelle et de stabilité) font l'objet de recherche par le secteur académique grâce aux financements étatiques (PEPR quantique, plateforme nationale de calcul quantique hybride...) ou européens (Quantum Flagship), mais aussi par le secteur privé (Grands groupes américains et européens, écosystème dynamique de Start Ups, notamment françaises). C'est un domaine en pleine ébullition, les créations de start ups se multiplient ainsi que les levées de fonds. Nous assistons aussi à une structuration des efforts au travers des plans quantiques nationaux (Français, Allemand, Finlandais, Hollandais, etc.) et européens (JU EuroHPC, FPA, Horizon Europe, Digital Europe, etc.)

De plus en plus de groupes industriels s'intéressent à l'usage potentiel du calcul quantique, ceci nous amène à des concepts de plateformes de calcul hybrides, étape naturelle de la prise en compte du calcul quantique dans la chaîne de calcul. Les enjeux industriels s'expriment maintenant également en termes d'applications et de développement de logiciels, ce qui inclut les questions de simulation/émulation et contrôle de systèmes quantiques (cf. QLM d'Atos, Perceval de Quandela et Pulser de Pasqal).

Le développement de ces couches logicielles est indispensable à l'exploitation de ces différentes architectures et à la mutualisation d'outils de développement pour ces architectures notamment au travers d'émulateurs capables de fournir une couche agnostique au back-end physique.

2. Périmètre technique détaillé

1- Calcul quantique adiabatique

Contexte et enjeux

Le calcul quantique adiabatique a été théorisé par Edward Farhi (MIT) en janvier 2000. Il est comparable au recuit simulé en métallurgie. Un système est dans un état propre de départ connu, on fait varier lentement certains paramètres physiques (comme la température en métallurgie) de son hamiltonien (opérateur énergie) et l'on arrive au final à l'hamiltonien cible dans un état propre correspondant au minimum d'une fonction.

La société canadienne D-Wave a démarré son activité en 1999 et a été la première à commercialiser des machines de calcul quantique, reposant sur cette technique, et ce dès 2007. Elle est réputée résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire du type voyageur de commerce, qui s'implémentent facilement sous forme de minimisation d'opérateurs d'énergie. Cette approche technologique fait débat dans la communauté académique, même si elle suscite toujours un grand intérêt.

Actuellement la société D-Wave commercialise des systèmes Advantage de calcul quantique adiabatique, dont un exemplaire a été installé au sein du centre de calcul allemand de Jülich.



Problématique et défis techniques

- L'accélération et les avantages quantiques restent à démontrer et à calibrer.
- Passage à l'échelle délicat.
- Existence d'alternatives relevant de matériel inspiré du quantique (type puce Fujitsu).
- Programmation non universelle et pas de code de correction d'erreurs.

2 - Architecture de calcul à qubits physiques (NISQ)

Contexte et enjeux

John Preskill du CalTech a introduit lors de la conférence Q2B 2017 la notion de NISQ (Noisy Intermediate Scale Quantum computing) reprise par toute la communauté. Elle s'oppose aux systèmes quantiques universels, encore lointains voire incertains, sous la forme de systèmes quantiques de quelques centaines de qubits physiques, sans correction d'erreur.

Il considère :

- Que ces systèmes sont suffisamment mûrs technologiquement pour entrer dans l'ère du NISQ dans les prochaines années
- Qu'ils apporteront un avantage face aux calculateurs classiques grâce à l'existence d'algorithmes qui permettent d'en tirer parti, dans différents domaines : chimie quantique, physique nucléaire, science des matériaux, optimisation etc. Se développent par ailleurs des algorithmes hybrides (tels VQE ou QAOA) sur des accélérateurs NISQ imposés par la faible profondeur actuelle de la partie quantique.

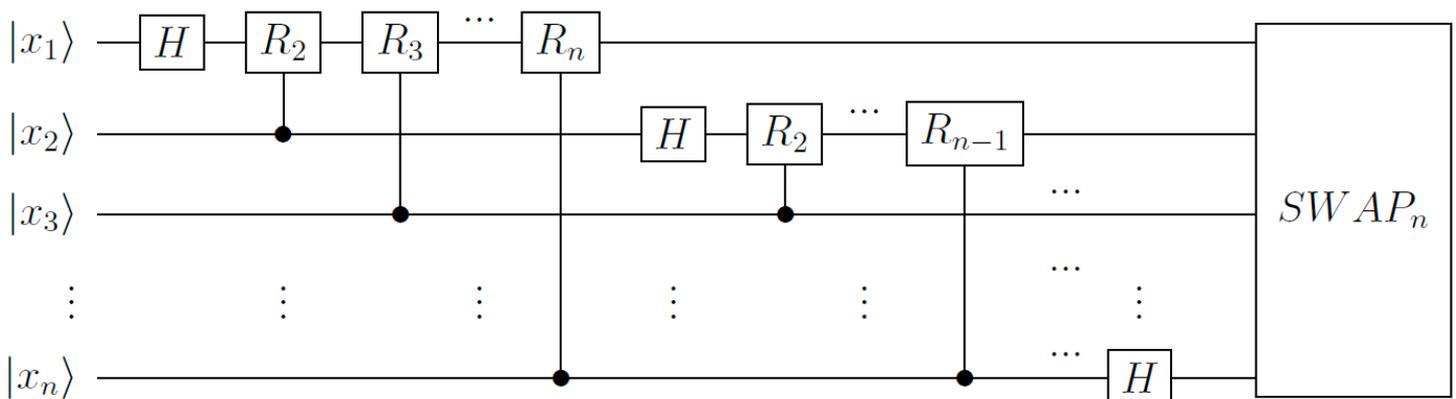
S'agissant du nombre de qubits physiques nécessaire pour donner un avantage quantique, on peut estimer qu'il devra, selon les technologies, nettement se rapprocher de 100, voire plusieurs centaines.

Le NISQ est le plus souvent intégré dans les plans nationaux de chaque pays, comme par exemple dans le Plan National Quantique Français. C'est un domaine en progrès constant, notamment sur les potentielles applications. Deux technologies sont utilisées pour le NISQ, une approche à portes quantiques et une approche analogique. Ces approches ne sont pas exclusives et cherchent à développer des algorithmes robustes aux erreurs en exploitant au mieux les avantages (et les contraintes) du matériel.

Circuits à portes quantiques

C'est un paradigme de programmation similaire à l'informatique classique où les opérations de plus haut niveau sont décomposées en opérations logiques unitaires que l'on appelle « portes ». C'est comparable à l'algèbre de Boole avec ses fonctions ET, OU, OU EXCLUSIF. Ce fonctionnement peut être reproduit sur un ordinateur quantique, où les interactions quantiques sont en quelque sorte « binarisées ». Du reste ces circuits à portes quantiques NISQ constituent la première étape nécessaire vers le LSQ.

Les applications attendues sont larges, avec les premiers cas d'usage en chimie quantique et en optimisation (notamment, l'optimisation combinatoire de graphes denses).



Calcul analogique

Ce paradigme est le pendant de la programmation à portes ; de la même façon qu'il existe une dualité électronique digitale et électronique analogique.

En programmation analogique, les interactions quantiques ne sont pas digitalisées. Elles sont en revanche soigneusement contrôlées et conçues de manière à représenter une fonction de coût qu'il est possible d'optimiser. C'est le métier des programmeurs quantiques. Ce mode opératoire est beaucoup plus proche des ressources du processeur ce qui permet d'en extraire toute la quintessence. L'obstacle des imperfections est contourné, abaissant ainsi le seuil pour atteindre l'avantage quantique.

Par définition cette programmation n'est pas universelle car elle s'appuie sur des modes opératoires propres à chaque processeur. C'est cependant comme cela que s'est développée l'informatique classique en son temps, et qui a mis 50 ans pour atteindre une universalité, qui est parfois abandonnée pour gagner en performance (GPU, ASIC, FPGA).

Aujourd'hui on sait résoudre des problèmes d'optimisation et de machine learning grâce à la programmation analogique. De nouveaux outils sont attendus prochainement, qui embrassent déjà de nombreux cas d'usage (finance, chimie, énergie).

Problématique et défis techniques

- Amélioration de la qualité du bit quantique physique (bruit, connectivité, fidélité des opérations de porte), et passage à l'échelle intra et inter QPU (réseau de QPU).
- Peu d'applications disponibles pour le NISQ mais cela va évoluer avec l'apparition des premières machines NISQ à plus de 100 qubits qui commencent à démontrer leur potentiel.
- Peu d'algorithmes hybrides (QAOA, VQE, VQA), mais des domaines d'intérêt émergent, en particulier l'optimisation combinatoire.
- Pas encore de démonstration avérée d'un avantage quantique sur des cas d'applications pratiques ; malgré quelques annonces récentes qui relèvent du domaine théorique.
- Problèmes d'industrialisation pour sortir des laboratoires.

3 - Architecture Large Scale Quantum Computing (LSQ)

Contexte et enjeux

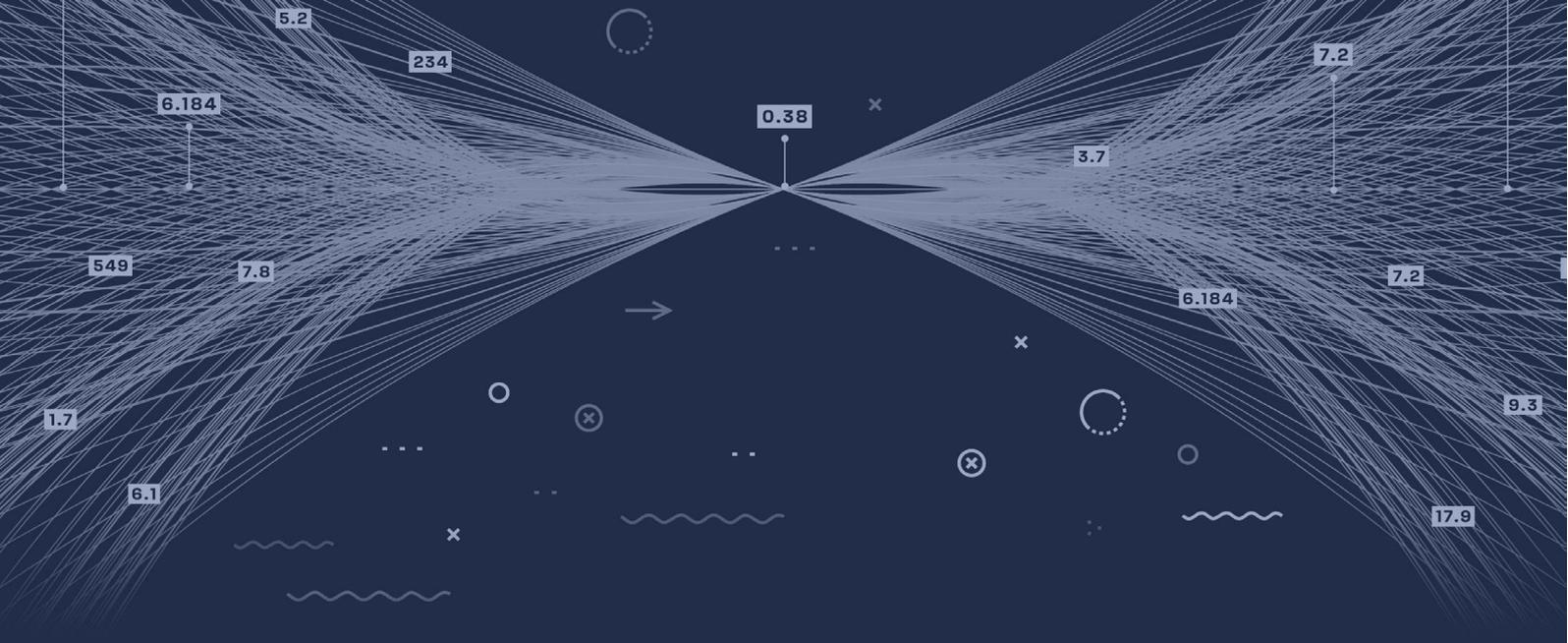
Cette architecture s'apparente aux calculateurs classiques. Un registre de qubits subit un certain nombre d'opérations physiques assimilables à des portes à une ou deux entrées (ces deux types de portes quantiques suffisent pour tous types de calcul comme en algèbre booléenne). Les technologies sous-jacentes permettent d'assurer les niveaux de superposition et d'intrication nécessaires à la réalisation de portes utilisables. Ces qubits physiques sont sujet à des erreurs (bruit quantique, décohérence). Ils sont corrigés pour devenir (par agrégation d'un grand nombre d'entre eux) des qubits logiques et garantir des opérations justes (reproductibles). Différentes technologies matérielles sont à l'étude pour ces nouveaux qubits, logiques ou physiques : supraconducteurs, ions piégés, semiconducteurs, photoniques, topologiques, impuretés dans le diamant, etc.

La plupart des cas d'usage identifiés, susceptibles de démontrer une réelle accélération quantique, nécessitent ce type d'architecture, et ce avec un grand nombre de qubits logiques : par exemple décrypter le RSA standard par l'algorithme quantique de Shor nécessite plusieurs milliers de qubits logiques en intrication forte.

Le domaine de la détection et de la correction d'erreurs est un domaine de recherche très actif avec l'émergence d'alternatives à des approches très coûteuses en qubits.

Problématique et défis techniques

- Détection et correction d'erreur très coûteuses en qubits physiques.
- Un niveau minimal de qualité de qubits à atteindre pour autoriser la correction d'erreurs.
- Besoin d'un grand nombre de qubits pour atteindre les dimensions requises par les applications visées.
- Horizon incertain (10 ans ou jamais, ce qui nécessite des ruptures technologiques).



Technologies habilitantes

La mise en oeuvre de machines quantiques NISQ ou LSQ possédant des centaines de milliers ou millions de qubits physiques nécessitera de s'assurer de la scalabilité des outils électroniques de contrôle, et d'une façon plus générale de ce que l'on appelle les technologies habilitantes ou capacitantes (cryostats pour certaines technologies de qubits, lasers, guide d'ondes et câbles RF,...) .

Les technologies habilitantes sont des technologies permettant aux concepteurs de puces quantiques de réaliser leur ordinateur quantique, elles ne sont pas directement concernées par le calcul quantique mais elles créent les conditions requises pour lancer et entretenir le calcul quantique. Un des objectifs clés dans le cadre de la stratégie nationale quantique est de « maîtriser les filières industrielles critiques dans le domaine des technologies quantiques, incluant les technologies habilitantes.» (rapport Forteza)

Il y a aujourd'hui une forte concurrence entre les technologies de qubits qui impliquent plusieurs types de technologies habilitantes, certaines pouvant être communes mais pour la plupart inhérentes à la technologie de qubits.

Dans les technologies habilitantes, il y a à la fois un volet matériel et logiciel. Pour le logiciel, on parle de logiciel d'instrumentation quantique et les logiciels de type « compilateur ».

Il est aussi possible de distinguer les technologies permettant de créer l'environnement propice à la création stable des qubits (cryogénie...) et celles qui sont en interaction directe avec les puces quantiques.

Qubits supraconducteurs

Technologies principalement développées par IQM, IBM, Rigetti, Alice&Bob, QCI, Google :

- Création de signaux et séquenceur de signaux (AWG)
- Quantum Machine, instrumentiers RF (R&S, Keysight, Anritsu...)
- Routage micro-onde
- Cryoélectronique
 - AO à plus large bande de fréquence possible + le moins de bruit possible & saturation la plus haute possible :
 - 120dbm en bas de la puce et donc amplifier beaucoup et donc ampli avec le moins de bruit possible
 - AO paramétrique à 20dB
 - AO avec un bruit suffisamment bas pour que le bruit quantique domine par rapport au bruit de l'AO
 - LNF (Suède)
- Fonderie nanofabrication
- Sw instrumentation quantique
- Cryogénie à <20mK

Qubits de spin (C12, CNRS/LETI...)

- Création de signaux et séquenceur de signaux (AWG)
 - Quantum Machine, instrumentiers RF (R&S, Keysight, Anritsu...)
- Routage microonde à proposer plus de lignes, plus de débit par ligne tout en réduisant les charges thermiques
 - Atem, Radiall
- Packaging à très grande propreté des modes électromagnétiques, herméticité
 - Egide, micronor
- Calibration des doubles points quantiques (quantum dot)
- Cryoélectronique
- Cryogénie à <20mK

Qubits à ions piégés ou à atomes froids

Technologies principalement développées par IonQ, AQT / Pasqal, ColdQuanta, QuEra :

- Lasers
- Pinces optiques
- ultra-vide

Qubits photoniques

Technologies principalement développées par Quandela, QuiX, PsiQuantum :

- Source de photons uniques
- Compteur de photons, caractérisation des sources de photons à Auréa Technologies
- Multiplexage optique à Cailabs
- Matrice de calcul

4. Environnement logiciel

Il n'y aura pas de développement industriel du calcul quantique sans avancée sur le logiciel. L'accès aux capacités physiques de calcul quantique est et restera très complexe, mais cette complexité doit être effacée pour les utilisateurs, c'est le rôle du logiciel. Certains programmeurs exigeants voudront pouvoir accéder au moindre paramètre sous-jacent ("assembleur quantique", "pilotage physique") alors que d'autres au contraire ne voudront utiliser que des bibliothèques métier élaborées.

Le logiciel de programmation peut être généraliste (en distinguant toutefois les grandes familles des systèmes à portes, des systèmes analogiques et des systèmes adiabatiques) ou dédié à une technologie particulière.

Il peut être offert en mode "as a service" dans le Cloud (offres AWS, Microsoft et Google) ou "on-prem" ie. sur site. Il se conçoit de plus en plus, dans le contexte NISQ, en format hybride classique/quantique, où le co-processeur quantique se comporte comme un accélérateur attaché à des noeuds classiques, que ce soit en architecture Distributed Memory Processing (HPC) ou en architecture cloud (PaaS). C'est alors aux couches logicielles d'orchestration de veiller à la bonne distribution des jobs élémentaires de calcul et de récupérer les résultats intermédiaires et finaux.

Un élément logiciel clé est le compilateur qui transforme les programmes écrit en langage de haut niveau (comme pyAQASM d'Atos) en éléments compréhensibles par l'orchestrateur qui doit prendre en compte les spécificités physiques du processeur quantique comme les connections entre qubits (parfois limitées) ainsi que le jeu de portes quantiques accessible. Pour réduire la taille des circuits et le nombre de portes intriquées, il est important d'utiliser des optimiseurs logiciels notamment topologiques, qui sont des opérations d'une grande complexité combinatoire.

5. Volet algorithmes et applications

Cryptographie

Les télécommunications cryptées sont dès aujourd'hui sous la menace d'un futur ordinateur quantique universel qui, par sa puissance de calcul exponentielle, pourrait compromettre les méthodes de cryptographie tel que le cryptage RSA largement utilisé sur internet (algorithme de Shor). De nouveaux protocoles algorithmiques mettant en œuvre soit des nouveaux modèles mathématiques supposés inviolables, soit des principes de physique quantique, remplaceront les modèles mathématiques utilisés dans les protocoles RSA pour sécuriser l'échange de clés.



Problèmes d'optimisation

Dans cette catégorie on va trouver les problèmes de recherche opérationnelle, qui seront traitables sur les premiers NISQ ou les ordinateurs à recuit quantique (annealer). La liste est non-exhaustive tant les applications sont nombreuses. On peut citer :

- Gestion de la production et de la distribution d'énergie
- Gestion des chaînes d'approvisionnement (supply chain)
- Gestion d'une flotte de véhicules
- Gestion du trafic routier, aérien et spatial
- Management du risque financier pour les banques.

Ces problèmes sont particulièrement intéressants car ils s'adaptent très bien aux NISQ et aux quantum annealers (ordinateurs à recuit quantique). En effet l'utilisateur final n'est pas à la recherche de la solution optimale absolue. Une solution plus optimale que celle qu'il a déjà obtenue plus rapidement et sur un plus grand espace de paramètres peut générer des gains d'échelle très importants. De plus, si l'optimisation est une tâche complexe, le problème inverse de sa vérification l'est beaucoup moins. L'utilisateur sait donc rapidement si la solution trouvée est intéressante ou pas, sans avoir à passer par une phase de mise en œuvre, parfois coûteuse, sur le terrain.

C'est une méthode efficace pour tirer profit d'un calcul imparfait car non corrigé des erreurs mais qui explore un grand espace de paramètres.

Les annealers ont certainement aujourd'hui le TRL le plus élevé et sont utilisables sur certaines problématiques d'optimisation.

Machine learning

Les algorithmes d'apprentissage-machine font souvent appel à des routines d'algèbre linéaire standard telles que l'inversion de matrice ou la décomposition des valeurs propres. Le formalisme mathématique utilisé dans le traitement de l'information quantique fait largement appel aux mêmes outils d'algèbre linéaire. Ces boîtes à outil mathématiques communes justifient l'idée d'utiliser l'informatique quantique pour améliorer les performances des algorithmes de machine learning. L'utilisation d'ordinateur NISQ est ici un sujet de recherche active.

Modélisation et simulation (NISQ)

L'utilisation d'ordinateurs NISQ et d'algorithmes adaptés est pressentie comme pouvant délivrer des résultats dans les années à venir dans le domaine de la chimie (calcul des structures moléculaires) et des sciences des matériaux (simulation) et à terme en science de la vie (biologie, pharmaceutique).

Applications aux systèmes linéaires de (très) grande taille (pour les LSQ)

Les ressources actuelles en calcul haute performance sont majoritairement utilisées dans la résolution des problèmes aux équations aux dérivées partielles. Ces problèmes aboutissent au final à la résolution de systèmes linéaires. La capacité possible du calcul quantique à traiter ces problèmes est donc un enjeu de taille.

- Dynamique des fluides numériques (Computational Fluid Dynamics - CFD).
- Modélisation du climat, prévision météorologique.
- Modélisation de structures mécanique et architectural (par exemple barrage hydroélectrique).
- Imagerie sismique.

Famille d'algorithme	Principe	Usage	Secteurs	Exemple	Challenge
Simulation chimique	Le calcul quantique est bien adapté à cet usage car par essence la mécanique quantique décrit comment la nature fonctionne aux niveaux les plus fondamentaux (atomiques et subatomiques)	Design de molécules	Industrie chimique, manufacturinig (Matériaux, Batteries électriques), santé (Pharma), science de la vie	VQE : algorithme hybride quantique/classique qui cible les problèmes d'optimisation ou de simulation en utilisant les niveaux d'énergies possibles des systèmes quantiques QML	Nombre de qubits nécessaires et/ou réduction de leur bruit
Simulation statistique	Le calcul quantique peut être utilisé pour construire une représentation d'un problème et d'en calculer des solutions potentielles en calculant des valeurs numériques approchées par l'utilisation de techniques probabilistes.	Etude de risque (Value at Risk), Pricing d'instruments financiers	Logistique, finance, santé	QAE (Monte Carlo)	Réduction de la profondeur des circuits ou du nombre de qubits nécessaires
Optimisation	Rechercher les variables qui selon le contexte, maximisent ou minimisent une fonction formalisant un problème particulier	Trajet de véhicules, supply-chain, portefeuille d'actifs financiers	Finance, logistique, Industrie chimique, manufacturinig, santé, science de la vie	VQE, QAOA, QAE, QML	Nombre de qubits nécessaires, types de problème d'optimisation possible
Intelligence Artificielle, Machine Learning	Mise en œuvre de nouvelles relations au sein de données, de façon plus précise ou rapide que l'IA traditionnelle	Détection de fraude, Crédit scoring, Classification images	Finance, logistique, Industrie chimique, manufacturinig, santé, science de la vie, espace, sismique	QML, QAE, QSVM, HHL	Chargement des données, temps de calcul
Equations Différentielles Partielles	Résolution d'équations aux dérivées partielles omniprésentes dans de nombreux secteurs industriels et scientifique	Dynamique des fluides (CFD) Mécanique des structures	Automobile, aéronautique, espace, météo	HHL, QCFD DQC (pour du NISQ)	Problèmes de non-linéarité, conditions aux limites

Notons que dans de nombreuses circonstances les algorithmes mentionnés peuvent bénéficier d'améliorations dites "inspirées du quantique" (en utilisant par exemple le formalisme des réseaux de tenseurs utilisés depuis des décennies en physique et en chimie quantique).

Quantum Inspired

Suivant le contexte, logiciel ou matériel, les méthodes dites inspirées du quantiques (Quantum Inspired) désignent soit la mise en œuvre de méthodologies inspirées de la physique ou chimie quantique permettant d'accélérer l'exécution d'algorithmes (ex. optimisation, machine learning) sur des machines conventionnelles, ou NISQ actuelles, soit la construction d'un processeur classique répliquant certaines propriétés quantiques (ex. effet tunnel pour le Digital Annealer de Fujitsu).

Logiciels applicatifs

La technologie quantique sera intégrée dans les grands logiciels applicatifs qui couvrent les calculs de structure, mécanique des fluides, électromagnétisme, ... et qui intègrent à côté des secteurs traditionnels, les nouveaux secteurs: santé, biologie, agriculture et agro-alimentaire, environnement et gestion des ressources naturelles, sciences humaines et sociales (SHS), ...

L'intégration de la technologie quantique dans ces logiciels nécessitera la réécriture des algorithmes classiques en algorithmes quantiques, et l'écriture d'une couche de soumission de jobs quantiques qui facilitera la tâche pour les utilisateurs finaux autant que possible.

Le fait que les algorithmes d'algèbre linéaire se transposent facilement sur le matériel quantique est une des caractéristiques à exploiter. Une des options de réécriture est de réécrire un algorithme classique en algorithme d'algèbre linéaire, et après de le convertir en algorithme quantique.

3. Orientations techniques & stratégiques

Vision stratégique

A inscrire plus dans la vision du Plan National Quantique et dans la vision européenne :

- Priorité à l'hybridation Quantique HPC, puis à des systèmes quantiques autonomes, avec capitalisation de structures existantes (datacenter HPC et HPDA et équipes existantes).
- Existence en France et en Europe d'un écosystème riche (hardware, software, application avec des industries prêts à l'évaluer (chimie, finance, santé, ML, combustion, etc.).
- Protection de l'écosystème des entreprises de logiciels quantiques et inspirés du quantique, au final peu nombreuses en Europe.

Aujourd'hui, il y a une vraie dynamique en France, la plupart des pays font le pari de l'arrivée de cette nouvelle industrie de l'informatique quantique.

Les coprocesseurs quantiques arrivent à maturité, c'est maintenant une question de quelques années avant d'avoir des livraisons opérationnelles chez les clients utilisateurs. Ce doit être une priorité que d'anticiper et d'accompagner ce mouvement et d'y préparer l'écosystème du Hub "Digital Engineering". On attend par exemple la première livraison d'un coprocesseur quantique en 2023 dans le cadre du projet HPCQS qui fait partie du plan national HQI (HPC Quantum Infrastructure) qui sera couplé au supercalculateur Joliot Curie de Calcul Quantique Hybride GENCI au TGCC (CEA).

Les ordinateurs LSQ se heurtent à des difficultés technologiques majeures en ce qui concerne la scalabilité, la stabilité temporelle et la correction d'erreurs. On ne les voit pas arriver avant 20 à 30 ans. ces améliorations dépendent de ruptures technologiques majeures. Toutefois, il importe à ce stade de rester inscrit dans cette dynamique, compte tenu de l'énorme potentiel prévisible (sécurité, finances, énergie, etc.) pour des technologies encore à bas TRL au niveau recherche et innovation. Les ruptures espérées peuvent provenir de l'écosystème Systematic.

Priorités stratégiques

L'écosystème Systematic s'inscrit pleinement dans la mise en œuvre du Plan National Quantique (PNQ) annoncé en 2021, en particulier il est en capacité de faciliter et de participer à la constitution de consortia pour répondre aux actions lancées (grands défis, PSPC, AMI, HQI, etc.). De la même façon, il suit le déroulé du flagship européen, et de son successeur.

Verrous technologiques

Les verrous technologiques sont :

- Mémoire, QRAM.
- Benchmark quantique, comment comparer différentes technologies.
- Travaux algorithmiques (non-linéarité).
- Ingénierie pour le passage à l'échelle et l'industrialisation.
- Qualité des Qubits.
- Réseaux d'interconnexion des QPUs (Scale-out pour faire du Distributed quantum computing et palier aux effets d'échelle).

Formation initiale et continue

Le calcul quantique étant un domaine nouveau, il ne peut s'appuyer sur un socle existant de compétences, la formation est donc un enjeu stratégique. La demande en spécialiste du domaine va largement dépasser ce que les formations initiales (universités, écoles d'ingénieurs) seront en mesure de produire, de ce fait la formation continue est une nécessité.

On parle de plus de 10 000 emplois dans le quantique à l'horizon 2030

<https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/strategie-nationale-sur-les-technologies-quantiques-faire-de-la-france-un-acteur-majeur-de-ces-49233>

Les formations évolueront dans le temps. On peut citer, à titre d'exemple autour de l'UPSaclay, la formation "ARTEQ", initiée en 2020, qui est à cheval M1/M2. En Master dans le parcours MPRI (en M1) du master informatique, un cours plutôt orienté fondamental et dans le parcours PDCS (en M2) du master informatique, un cours plutôt orienté programmation et algorithmique quantique. Citons aussi un cours optionnel de quantique dans la mention Science du Logiciel à CentraleSupélec. Pour la formation continue, on peut se rapprocher des formations données par l'ENSTA.

Notons que l'acculturation au calcul quantique est facilitée aujourd'hui sur internet par la mise à disposition d'un ensemble de cours/tutoriaux/séminaires (ex : les cours du CERN).

Priorités à l'élargissement de l'écosystème

Certains partenaires essentiels, au-delà des membres actuels du pôle Systematic, ont d'ores-et-déjà été identifiés. On peut citer le QuanTIP, TERATEC (initiative TQCI avec le CCRT), GENCI et le Lab Quantique (Pack Quantique avec la région Ile de France).

Un nombre grandissant de startups et de labos académiques investissent dans le domaine, y compris en Ile de France (représente environ 80% de la R&D française en quantique). Une action particulière de cartographie francilienne, puis le cas échéant d'actions spécifiques de recrutement dans le hub DE devront être menées.

Les acteurs en Ile de France

Au niveau académique, les réseaux SIRTEQ, TERATEC et GENCI donnent une excellente vision de l'écosystème.

LE **QUANTIQUE**
CHEZ LES MEMBRES
DE **SYSTEMATIC**

De l'émission de photon à l'internet quantique,
les membres de Systematic vous proposent **briques technologiques**
& **cas d'usages** pour cette nouvelle révolution Deep Tech !



Février 2022

Sources	<p>Sources de qubits photoniques</p> 	<p>R&D quantique</p> 	
Transmission	<p>Transmission optique</p> 	<p>Internet quantique</p> 	
Capteurs	<p>Capteurs quantiques / Métrologie</p> 		
Traitement	<p>Générateur de nombres aléatoires</p> 	<p>Circuits photoniques intégrés / Wafers</p> 	<p>Semiconducteur</p> 
Informatique quantique	<p>Calcul quantique</p> 		
Transverse	<p>Simulation</p> 		<p>Utilisateurs (calculs intensifs)</p> 
	<p>Associations</p> 		
	<p>Sécurité et cryptographie</p> 	<p>Test</p> 	
	<p>Infrastructures / Outils / cryogénie et atomes froids</p> 		



Digital Engineering

Rédacteurs

Pierre Desjardins - C12

Philippe Duluc - Atos

Gregory Golf - Atem

Laurent Guiraud - Colibrird

Michel Kurek - Multiverse Computing

Théo Peronnin - Alice & Bob

Alain Refloch - Onera

Georges-Olivier Reymond - Pasqal

Christian Saguez - Teratec

Philippe Segers - GENCI

Matthijs van Waveren - CS GROUP

Esther Slamitz - Systematic Paris Region

Juillet 2022