L'informatique quantique, une révolution

Juillet 2021

Livre Blanc sous la direction de Nicolas Gaudemet

onepoint.
beyond the obvious

Sommaire

INTRODUCTION 6

1. L’INFORMATIQUE QUANTIQUE : PRINCIPES ET ÉTAT DE L'ART 8

2. LES ENJEUX ÉCONOMIQUES DE L’INFORMATIQUE QUANTIQUE 11

3. L’INFORMATIQUE QUANTIQUE : ENJEUX DE SOUVERAINETÉ ET COMPÉTITION INTERNATIONALE 16

CONCLUSION 20

L’informatique quantique, innovation de rupture

INTRO

INTRODUCTION

« Quiconque n'est pas choqué par la théorie quantique ne la comprend pas. »*

Niels Bohr

L'informatique quantique est au cœur des débats technologiques actuels. Elle entraînera vraisemblablement une innovation de rupture, révolutionnant nos outils dans des domaines aussi variés que la cybersécurité ou la modélisation de nouvelles molécules…

Face à ce constat, acteurs privés et gouvernements se lancent dans des politiques d'investissement ambitieuses. En témoignent l'annonce en janvier 2021 par le Président de la République d'un « Plan quantique » d'1,8 milliard d'euros sur 5 ans1 et la course au leadership quantique dans laquelle sont engagés la Chine et les États-Unis, suivis par l'Europe.

Pour les non-initiés, l'informatique quantique demeure une notion nébuleuse. Difficile à comprendre, car elle repose sur les principes contre-intuitifs de la mécanique quantique, branche de la physique qui s'intéresse à l'infiniment petit. En appliquant ces principes, il est possible de dépasser les limites de l'informatique classique et concevoir des processeurs d'un nouveau genre permettant, pour certains types de calculs, des performances exponentiellement plus rapides.

Mais l'informatique quantique n'en est qu'à ses débuts et les défis restent immenses.

Appréhender les bénéfices et les risques de cette technologie est essentiel pour comprendre ses impacts futurs, et donc opter pour les bons choix aujourd'hui. D'où la nécessité de s'intéresser aux principes, aux applications industrielles et aux enjeux de puissance et de souveraineté de l'informatique quantique.

* Citation rapportée par Heisenberg dans *Physics and Beyond, Encounters and Conversations*, 1971

L’informatique quantique : principes et état de l'art

1

A. Trois principes au cœur de l'informatique quantique

L'informatique quantique repose sur les théories complexes de la mécanique quantique. Apparue au tournant du vingtième siècle et portée notamment par les physiciens Planck, Einstein et Bohr, la mécanique quantique s'intéresse à l'infiniment petit. Elle a eu et continue d'avoir des implications scientifiques et technologiques majeures**. Trois principes fondamentaux** sur lesquels se fonde l'informatique quantique sont :

LA SUPERPOSITION D'ÉTATS

- Les particules quantiques peuvent **être dans plusieurs états simultanément**. Un calcul peut donc être effectué sur tous les états en même temps, **multipliant ainsi les capacités de calcul**.
- À notre échelle, une lampe peut être allumée OU éteinte. **A l'échelle quantique, une particule peut être allumée ET éteinte à la fois,** mais aussi **contenir n'importe quelle proportion de ces deux états** (80% allumée et 20% éteinte par exemple). **Une troisième notion (le spin) permet d'ajouter une composante à ces combinaisons d'états possibles**. C'est uniquement lors de l'observation (la mesure) que l'état quantique s'effondre et que la particule se fige dans l'un ou l'autre état.

L'INTRICATION DES PARTICULES

- **Deux particules peuvent être associées de façon à former un système quantique unique**, quelle que soit la localisation de l'une ou de l'autre. **Lorsqu'on les mesure, leurs états sont liés.**
- Bien que l'intrication soit très fragile, tant que des particules sont intriquées, **une opération effectuée sur l'une modifie ainsi simultanément à l'autre**.
- Des opérations peuvent donc être menées simultanément sur plusieurs particules intriquées, elles-mêmes dans des états superposés, **ce qui permet des calculs massivement parallèles.**

LA DUALITÉ ONDE / PARTICULE

- Toute particule se comporte comme une onde, tant que son état quantique ne s'effondre pas (comme lors d'une mesure).
- **La longueur d'onde est une fonction décroissante de la masse et de la température** : les propriétés quantiques s'observent seulement pour des masses faibles et des températures proches du zéro absolu, **sauf à très fortes pressions** où les particules peuvent se synchroniser, amplifiant ainsi leurs propriétés d'ondes.

B. L'informatique quantique : une révolution théorique mais des verrous technologiques

DES BITS AUX QUBITS

La particularité de l'informatique quantique réside dans l'unité de base sur laquelle elle s'appuie, qui permet d'accéder à des performances exponentiellement plus rapides pour des calculs spécifiques.

En effet, alors que nos ordinateurs habituels effectuent leurs calculs à partir de bits (**bi**nary digi**ts**), qui valent **0 OU 1**, et dont la valeur est précisément connue, les ordinateurs quantiques manipulent des qubits (quantum bits), qui peuvent valoir **0 ET 1** (cf. superposition d'états), de manière probabiliste.

Or, N qubits représentent 2^N états superposés, avec un coefficient de probabilité pour chacun. **Cette superposition permet d'effectuer 2^N calculs en parallèle,** alors qu'avec des Bits classiques il faudrait les effectuer les uns après les autres.

Ainsi, en théorie, un ordinateur quantique est donc capable pour certaines typologies de calculs d'être 2^N fois plus performant qu'un ordinateur classique.

Ces calculs étant très spécifiques, **on peut parler de QPU** (Quantum Processing Unit), **comme extension du CPU d'un ordinateur classique**, à l'instar d'un GPU (Graphic Processing Unit). Ces QPU se programment avec des algorithmes spécifiques.

Mais peu de ces algorithmes existent encore à ce jour*. Par ailleurs, les défis pour obtenir ces performances restent immenses du fait d'importants verrous technologiques.

DES VERROUS TECHNOLOGIQUES

Créer des qubits et maintenir les propriétés quantiques de superposition et d'intrication suppose de travailler à des **pressions très fortes et des températures très froides**.

Produire de grands volumes de qubits est donc complexe. Or, les qubits étant sujets à des erreurs et à l'aléatoire, il faut les dupliquer jusqu'à atteindre un ordre de grandeur de 1000 qubits ou plus pour en assurer la fiabilité.

Des processeurs quantiques avec un grand nombre de qubits, eux-mêmes dupliqués, ne sont pas attendus avant la fin de la décennie. En revanche, des émulateurs et des processeurs intermédiaires "bruités" sont déjà disponibles. Certains acteurs étatiques peuvent par ailleurs avancer sans publicité pour des raisons de souveraineté.

UNE SUPRÉMATIE QUANTIQUE SANS APPLICATION CONCRÈTE AUJOURD'HUI

La **suprématie quantique**, c'est-à-dire la **résolution par un ordinateur quantique d'un problème inaccessible à un ordinateur classique**, a été annoncée par Google en 2019 puis par la Chine en 2021. Ce sont certes **des étapes importantes, mais les problèmes résolus sont sans application concrète**.

* On peut citer l'algorithme de Shor de factorisation d'un entier en nombres premiers, ou l'algorithme de Grover de recherche dans une base de données non structurée.

Nous entrons dans l'ère des processeurs quantiques intermédiaires « bruités » mais il faudra attendre plusieurs années avant que les applications concrètes n'émergent à grande échelle. Cependant, certains États peuvent rester discrets sur leurs avancées.

Les enjeux économiques de l’informatique quantique

2

A. L'informatique quantique au cœur de la cybersécurité de demain

En 1994, Peter Shor a élaboré un algorithme quantique permettant de factoriser n'importe quel entier en nombres premiers, problème qui demande pour de grands nombres des temps de calcul inaccessibles aux ordinateurs classiques.

LA SECURITE DES COMMUNICATIONS ACTUELLES REMISE EN QUESTION

Grâce à l'algorithme de Shor, l'informatique quantique permettra de **casser les chiffrements dits « RSA »**, qui s'appuient sur la difficulté à factoriser en nombres premiers dans un temps raisonnable, **utilisés aujourd'hui en masse pour protéger les communications**.

Cela constitue **un risque majeur pour les communications, les transactions financières, la sécurité des entreprises, la souveraineté des États.**

À noter néanmoins que la recherche en cryptographie évolue et qu'**il existe des algorithmes de chiffrement non fondés sur les factorisations de nombres premiers**, robustes aux attaques d'ordinateurs quantiques.

Ce champ de recherche est dénommé **cryptographie post-quantique**.

MAIS UNE SECURISATION TOTALE DES COMMUNICATIONS FUTURES

Les technologies quantiques pourraient amener des **solutions pour une sécurisation parfaite des communications.**

La sensibilité des particules à toute observation permet en effet de **détecter avec certitude si une information a été interceptée sur le chemin entre son émetteur et son récepteur.**

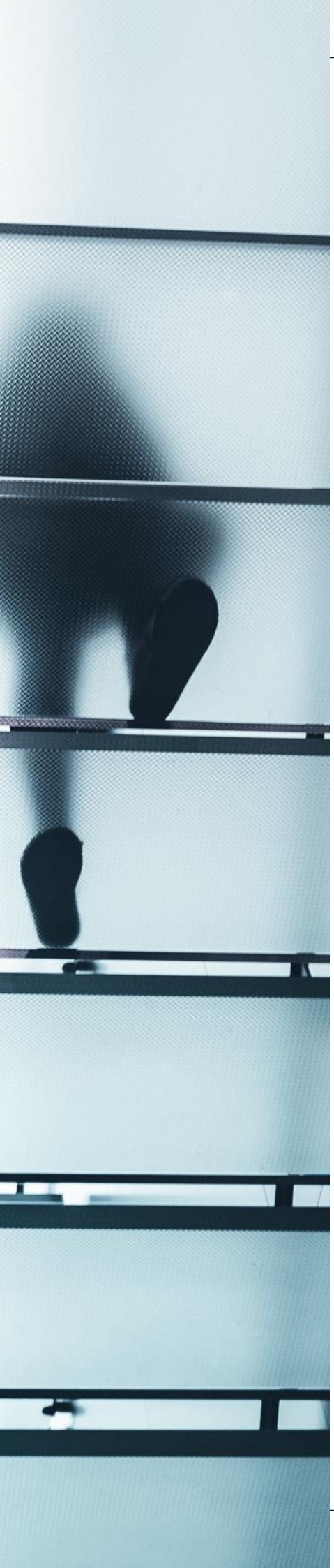
Ce champ de recherche est dénommé **cryptographie quantique**.

CRYPTOGRAPHIE QUANTIQUE VS CRYPTOGRAPHIE POST-QUANTIQUE

Les deux notions peuvent prêter à confusion mais sont très différentes.

- **La cryptographie quantique consiste à utiliser la technologie quantique pour créer des systèmes de chiffrement inviolables : grâce à l'intrication, il sera possible de savoir instantanément si un message est intercepté.**
- **La cryptographie post-quantique consiste à développer des algorithmes résistants aux attaques d'ordinateurs quantiques, mais utilisables sur des ordinateurs classiques**.

L'apport de l'informatique quantique à la cryptographie est donc paradoxal : à la fois risque majeur et solution pérenne pour la sécurité des communications.



B. Les bouleversements de l'informatique quantique pour la science des données

Grâce à ses capacités de calculs parallélisés, l'informatique quantique permettra de simuler ou d'optimiser **de systèmes complexes faisant interagir des milliers voire des millions de paramètres.** Elle sera aussi particulièrement indiquée pour **modéliser des phénomènes quantiques à l'échelle des atomes ou des molécules**.

Les applications concrètes de l'informatique quantique

MODÉLISATION DE MOLÉCULES

- **Réduction du temps de développement des médicaments** : le développement des médicaments est aujourd'hui long et coûteux entre autres du fait des difficultés liées à la simulation des molécules. L'informatique quantique pourrait simplifier ces simulations.

SIMULATION DE SYSTÈMES COMPLEXES

- **Simulation de moteurs dans l'aéronautique, de réactions nucléaires** : la mise au point, la validation industrielle et la construction de réacteurs ou de moteurs exigent toujours plus de capacités de calcul, que l'informatique quantique pourrait grandement accélérer. La simulation de réactions nucléaires, elles-mêmes quantiques, sera par ailleurs plus facilement modélisable avec des processeurs quantiques.

LOGISTIQUE

- **Optimisation de la supply chain** : les logisticiens et acteurs du transport doivent optimiser de nombreux paramètres sans pouvoir calculer toutes les possibilités en un temps acceptable — planification de tournées, gestion de flotte, agencement de containers dans les ports ou sur les bateaux, optimisation des chaînes d'approvisionnement, gestion des réseaux de distribution (d'eau, d'énergie, etc.), etc. **L'informatique quantique devrait permettre d'améliorer ces optimisations**.

MATHÉMATIQUES FINANCIÈRES

- **Optimisation de portefeuilles** : en réduisant drastiquement les temps de calcul des niveaux de risque, l'informatique quantique devrait permettre d'améliorer la performance des algorithmes à l'origine d'une partie croissante des transactions.

MARKETING PRÉDICTIF

- **Amélioration du marketing client** : optimisation de segmentations, de mix marketing, de ciblage.
- **Application à l'univers des médias** : l'informatique quantique pourrait permettre de rendre plus efficiente la publicité ciblée, qui demande une analyse fine d'un grand nombre de données pour associer au mieux inventaires, messages et utilisateurs en temps réel.

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

L'IA est gourmande en calculs complexes et s'appuie sur des problèmes d'optimisation de paramètres. **L'informatique quantique devrait donc permettre de réduire les temps d'apprentissage et les délais de traitement de nombreuses applications de l'IA.**

Divers algorithmes d'intelligence artificielle s'appuyant sur l'informatique quantique ont été créés ces dernières décennies.

QUELQUES ALGORITHMES D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ADAPTÉS À L'INFORMATIQUE QUANTIQUE

- **Variational Quantum Classifiers** : algorithmes de classification, utilisés par exemple pour la reconnaissance d'objets
- **Variational Quantum Eigensolvers** : algorithmes de calcul de valeurs et vecteurs propres, utilisés notamment pour l'exploration de données et la prédiction.
- **Quantum Generative Adversarial Networks** : algorithmes permettant de générer des objets complexes, comme des images, des vidéos, ou de nouvelles molécules.
- **Quantum Neural Networks** : réseaux de neurones quantiques, aux multiples cas d'usage.

Exemple d' applications en intelligence artificielle

- **AUTOMOBILE - MOBILITÉ**

Voiture autonome : l'informatique pourrait permettre d'accélérer le développement de véhicules totalement autonomes, ainsi que l'automatisation et l'optimisation de la régulation du trafic de façon à réduire drastiquement les embouteillages.

- **FINANCE**

Détection des fraudes : l'informatique quantique devrait faciliter la détection de fraudes, la détection de « comportements anormaux » étant un des domaines clefs d'application de l'intelligence artificielle.

C. Autres enjeux : capteurs, communications quantiques, technologies habilitantes

CAPTEURS QUANTIQUES

Les capteurs quantiques utilisent l'extrême sensibilité des particules élémentaires pour des mesures d'une précision exceptionnelle (distances, temps, gravité, magnétisme…).

Les applications métrologiques sont les plus mûres avec **des impacts dans l'imagerie médicale, l'énergie, le génie civil, la réception des télécommunications**…

COMMUNICATIONS QUANTIQUES

Outre l'impact sur la cryptographie vu plus haut, **les communications quantiques pourraient faciliter le développement de l'informatique quantique en réseau** (calculs distribués et intriqués sur plusieurs processeurs quantiques distants**)**, voire d'**un internet quantique, sécurisé à grande échelle**.

TECHNOLOGIES HABILITANTES

La fabrication de qubits et de capteurs quantiques nécessite une **maîtrise de technologies dites « habilitantes »** : notamment **des lasers, de la cryogénie, de la photonique, des fortes pressions…**

SYNTHÈSE

- L'informatique quantique, grâce à sa puissance calculatoire exponentielle devrait avoir des répercussions dans des domaines variés : cybersécurité, intelligence artificielle, optimisation de systèmes complexes...
- Si les processeurs quantiques sont au cœur de toutes les attentes, les capteurs quantiques sont tout aussi prometteurs pour un grand nombre d'activités.
- Néanmoins, l'informatique quantique n'en est qu'à ses débuts et des verrous technologiques en freinent le développement.
- La révolution de l'informatique quantique sera telle que les entreprises ont tout intérêt à réfléchir dès à présent aux cas d'usage qui concerneront leur activité.

L’informatique quantique : enjeux de souveraineté et compétition internationale

3

A. La course au quantique des superpuissances

Les technologies quantiques sont devenues des enjeux stratégiques de souveraineté et de sécurité. De nombreux États, États-Unis et Chine en tête se sont lancés dans une course pour obtenir une position de **leader tant en ce qui concerne les communications et la cryptographie que les processeurs et le calcul quantique**.

LES ÉTATS-UNIS, à la pointe dans le domaine de l'informatique quantique

- **Lancement du National Quantum Initiative Act en 2019 : d'un montant d'1,3 milliards de dollars sur 5 ans[2].** Ce programme vise à encourager la recherche et le développement, ainsi que l'éducation en matière de technologie quantique. Augmentation de 800 millions d'euros de ce budget en 2020.
- **Un écosystème déjà structuré autour de 40 startups, 50 fonds de capital-risque, et plusieurs géants du numérique à l'avant-garde, dont :**
  - **Google**, qui s'est lancé depuis 2014 dans la confection de son propre ordinateur quantique via son Quantum Artificial Intelligence Lab (QuAIL), hébergé par la NASA.
  - **Microsoft**, qui s'est lancé dès 2005 en finançant le programme de recherche Station Q à l'Université de Californie - Santa Barbara.
  - **IBM**, qui a développé en interne son groupe de recherche pour construire de bout-en-bout son propre ordinateur quantique, concrétisé par l'annonce d'un système à 53 qubits disponible dans le Cloud en octobre 2019. IBM a également développé le framework de programmation Qiskit permettant d'émuler un processeur quantique.

LA CHINE, le plus gros investisseur dans les communications et la cryptographie quantique

- **Construction en 2017 du National Laboratory for Quantum Innovation** pour un montant estimé de **10 milliards de dollars**.
- **Des investissements publics chinois de près de 2 milliards d'euros** depuis 2006 (en dehors de la construction du laboratoire).
- **Record de vitesse de calcul quantique** revendiqué par L'Université des sciences et technologies de Chine en décembre 2020.
- **Des géants numériques dynamiques :**
  - **Alibaba** a créé en 2015 le Alibaba Quantum Computing Laboratory. Son équipe travaille sur différents projets quantiques, dont un processeur de 11 qubits lancé en mars 2018, l'émulation d'un ordinateur quantique dans le Cloud, et le développement d'algorithmes.
  - **Baidu** a créé en 2018 un institut dédié à l'informatique quantique.

L'UNION EUROPÉENNE dans la course au leadership quantique

- **Signature d'un « Quantum Manifesto » en mai 2016** par plus de 3 400 acteurs de l'académie et l'industrie

- **Lancement en 2018 du Quantum Flagship**, projet de la commission européenne sur dix ans, doté d'un milliard d'euros (20 projets ont été soutenus dans sa première phase, pour 135 M€) et mobilisant une communauté académique de plus de 5 000 chercheurs.

- Publication en **mars 2021 d'une feuille de route** établissant comme objectif la **création d'un premier ordinateur quantique à l'horizon 2025, pour être « à la pointe des capacités quantiques » en 2030.**

- **Le Royaume Uni était le premier pays européen à lancer son programme national quantique, en 2013 avec un investissement de 370 millions d'euros sur 5 ans.** L'Allemagne dispose d'un **programme national sur 5 ans doté d'un budget de 650M€**.

- Au niveau européen, **l'écosystème de startups dans le domaine de l'informatique quantique compte environ 90 membres**. Avec 20 startups, le Royaume-Uni se classe en 1ère position, suivi de la France avec 16 et l'Allemagne avec 14.

- **Des industriels européens lancés dans l'informatique quantique :**

  Le projet PASQuanS, qui vise à développer un simulateur quantique (hardware et software), et qui fait partie des projets soutenus par le Quantum Flagship européen, s'assure de l'application concrète de la technologie développée par l'intermédiaire d'un « comité de l'utilisateur final » où siègent Airbus, Bosch, EDF, Siemens et Total.

B. Focus sur l'informatique quantique en France : des ambitions et des atouts

UNE STRATÉGIE PUBLIQUE AMBITIEUSE

La France ambitionne elle-aussi de devenir un acteur incontournable de la révolution de l'informatique quantique.

Ainsi, à la demande du gouvernement, **le rapport « Quantique : le virage technologique que la France ne ratera pas », dirigée par la députée Paula Forteza, a été publié à la mi-janvier 2020**.

Le Président de la République a ensuite annoncé en janvier 2021 un « Plan Quantique » d'1,8 milliard d'euros sur 5 ans[1] qui fait de la France un des pays à la pointe en Europe aux côtés de l'Allemagne et du Royaume-Uni.

En mai 2021 a enfin été nommé un **Coordinateur National de « la stratégie d'accélération pour les technologies quantiques »,** chargé « d'asseoir durablement la France dans le premier cercle des pays qui maîtrisent ces technologies. »

Répartition par axe technologique du « Plan quantique » :

- **Environ 780 millions d'euros dédiés au calcul quantique** avec le développement de d'émulateurs de processeurs quantiques et à plus long terme la construction d'un véritable ordinateur quantique
- **250 millions d'euros consacrés aux capteurs quantiques**, dont Thalès est l'un des leaders mondiaux
- **150 millions d'euros pour le développement de la cryptographie post-quantique**
- **325 millions d'euros alloués aux communications quantiques**
- **290 millions d'euros pour les technologies habilitantes**, de quoi conforter un écosystème s'appuyant notamment sur Air Liquide, qui a racheté le spécialiste français des cryostats Cryoconcept en septembre 2020

UN ENVIRONNEMENT ACADÉMIQUE, INDUSTRIEL ET FINANCIER PROPICE

Centres de recherche, grandes entreprises, start-up : la France possède un tissu technologique prometteur qui fait d'elle un acteur sur lequel compter dans la ruée sur le quantique.

Des acteurs français de pointe dans le quantique

- **Des organismes de recherche publique actifs : CNRS, CEA, INRIA.** Ces organismes sont engagés sur tous les domaines : informatique, capteurs, technologies habilitantes.
- **THALES : acteur majeur de l'écosystème de Saclay et possédant le 1er laboratoire industriel en physique d'Europe**, Thales poursuit ses collaborations avec le milieu académique, industriel et les startups pour accélérer le développement de technologies quantiques souveraines.
- **ATOS est l'acteur français de pointe sur le développement de l'informatique quantique**. Lancé en 2016, le programme Atos Quantum est le plus important programme industriel européen. En juillet 2018, la compagnie a rendu public l'émulateur Atos Quantum Learning Machine (QLM), premier système industrialisé et prêt à l'emploi capable d'émuler jusqu'à 41 qubits sur des processeurs Intel classiques.

Des groupes industriels qui s'intéressent au quantique pour sa puissance de calcul

- **AIRBUS**, en 2015, a missionné une équipe dédiée au sein de la Airbus Defense & Space Unit. L'objectif est d'utiliser l'informatique quantique pour de l'optimisation, et la simulation quantique pour créer des matériaux ultra-durables.
- **TOTAL** collabore avec Atos afin, entre autres, de simuler et comprendre le comportement de particules, mais aussi d'optimiser la logistique des outils industriels.
- **AIR LIQUIDE** a pris une participation majoritaire dans la société **Cryoconcept**, spécialisée dans la **cryogénie extrême,** une technologie permettant d'atteindre des températures extrêmement basses, condition nécessaire au développement de qubits.

Des investisseurs publics et privés

- **BPIFRANCE** finance activement les start-up spécialisées dans le quantique à travers **son plan Deeptech** (2 milliards d'euros d'ici 2023). Elle opère aussi le **Fonds Innovation Défense**, financé par le ministère des Armées, dont la première participation est la start-up Pasqal (cf. ci-dessous).
- **QUANTONATION**, fonds d'investissement français entièrement **consacré aux start-ups des technologies quantiques** avec **12 participations** actuellement en portefeuille.

Des start-up dynamiques

De nombreuses start-up françaises sont spécialisées dans le quantique. Tour d'horizon non exhaustif :

- **PASQAL**, start-up lancée en mars 2019 qui **développe des processeurs quantiques** et collabore par exemple avec EDF pour optimiser la recharge d'une flotte de véhicules électriques.
- **QUANDELA**, start-up spécialisée dans la **fabrication de sources de photons uniques**.
- **ALICE & BOB** qui a développé une technologie novatrice de **correction d'erreur autonome de qubits.**
- **C12** qui crée des **processeurs quantiques fiables** pour accélérer des calculs très complexes.
- **MUQUANS** développe un **gravimètre quantique** qui sert à la détection de cavités pour le BTP, la prospection pétrolière…
- **PREVISION.IO** travaille sur l'**adaptation au quantique d'algorithmes d'intelligence artificielle**.

Conclusion

« ***Personne ne comprend vraiment la mécanique quantique. »****

Richard Feynmann

Après l'intelligence artificielle, **l'informatique quantique sera une nouvelle innovation de rupture.**

Défense, communication, santé, énergie, logistique, finance : autant de domaines qui pourraient être bouleversés.

La révolution quantique est en marche.

Certes, il s'agit d'une révolution au long cours. Les technologies quantiques sont encore dans l'enfance.

Les premiers ordinateurs quantiques ayant de réelles applications industrielles ne sont attendus que d'ici 2025 à 2035.

Toutefois, les impacts sont tels qu'il faut s'y préparer.

Les gouvernements et les géants du numérique l'ont bien compris : les rivalités pour **maîtriser l'informatique ne devraient que s'accentuer.**

Tous les secteurs sont concernés. La question de la cybersécurité par exemple est transverse à tous.

L'enjeu pour les entreprises est donc de se préparer à l'informatique quantique **en réfléchissant dès à présent aux cas d'usage qui pourraient s'appliquer à leur activité.**

Fort de son expertise technologique et ses liens avec la recherche, onepoint est l'acteur tout indiqué pour vous accompagner.

* *Probability and Uncertainty: The Quantum-Mechanical View of Nature*, conférence de 1964

Références

- **Rapport du CIGREF de 2020 sur le quantique :** https://www.cigref.fr/wp/wp-content/uploads/2020/02/Cigref-Informatique-quantique-Comprendre-Quantum-computing-pour-se-preparer-a-l-inattendu-Fevrier-2020.pdf
- **Article de BpiFrance sur l'avenir du quantique :** https://lehub.bpifrance.fr/informatique-quantique-marche-prometteur-aujourdhui/
- **Rapport du CNRS de 2019 :** https://lejournal.cnrs.fr/articles/ordinateur-les-promesses-de-laube-quantique
- **Rapport « Quantique : le virage technologique que la France ne ratera pas » de janvier 2020** par Paula Forteza, Jean-Paul Herteman et Iordanis Kerenidis : https://forteza.fr/wp-content/uploads/2020/01/A5_Rapport-quantique-public-BD.pdf
- **Annonce du « Plan Quantique » et de ses modalités** : https://www.gouvernement.fr/18-m-eu-en-faveur-des-technologies-quantiques
- **Comprendre l'informatique quantique**, Olivier Ezratty, https://www.oezratty.net/wordpress/
- **Site internet d'IBM Quantum,** entité spécialisée du groupe IBM : https://www.ibm.com/quantum-computing/what-is-quantum-computing/

Remerciements

Pour leur contributions majeures Samuel Poncet et Vincent Rémon, et pour leurs relectures attentives Philippe Harel, Pirmin Lemberger, Gontran Peubez, Flavien Raviola, Mohamed Zergaoui

onepoint.
beyond the obvious

onepoint.
beyond the obvious

Onepoint est l'architecte des grandes transformations des entreprises et des acteurs publics. Elle accompagne ses clients de la stratégie à la mise en œuvre technologique, en s'attachant toujours à penser au-delà des évidences et à s'inscrire dans des logiques de croissance verte, pour créer de nouvelles façons de travailler, de nouveaux modèles économiques et de nouveaux lieux.

2500 **collaborateurs**

33 ans de **moyenne d'âge**

15 **Implantations** dans le monde

300 **millions d'euros** de chiffre d'affaires

Paris, Bordeaux, Toulouse, Nantes, Lyon, Amsterdam, New-York, Bruxelles, Luxembourg, Melbourne, Montréal, Tunis, Zele, Sydney, Singapour.

www.groupeonepoint.com