

# L'INFORMATIQUE QUANTIQUE : PRÊTS POUR LE GRAND SAUT ?



[www.francedigitale.org](http://www.francedigitale.org)

Fondée en 2012, France Digitale est la plus grande association de startups en Europe. France Digitale rassemble les champions de l'entrepreneuriat numérique : elle rassemble 1 400 startups numériques avec des plans de croissance forts et plus de 100 investisseurs (venture capital et business angels).

L'association (organisation non gouvernementale) a un ADN spécifique, elle associe des entrepreneurs et des investisseurs pour rendre l'écosystème plus propice à l'émergence de nouveaux champions.

The Positive Way

**WAVESTONE**

[www.wavestone.com](http://www.wavestone.com)

Dans un monde où savoir se transformer est la clé du succès, Wavestone s'est donné pour mission d'éclairer et guider les grandes entreprises et organisations dans leurs transformations les plus critiques avec l'ambition de les rendre positives pour toutes les parties prenantes. C'est ce que nous appelons « The Positive Way ».

Wavestone rassemble plus de 3 000 collaborateurs dans 8 pays. Il figure parmi les leaders indépendants du conseil en Europe, et constitue le 1<sup>er</sup> cabinet de conseil indépendant en France.

Wavestone est coté sur Euronext à Paris et labellisé Great Place To Work®.

## Quantique : le nouveau défi des startups ?

Quel sera le prochain « buzzword » à traverser notre écosystème Tech ? 2015 avait vu le « Big data », 2016 était submergée par « l'Intelligence artificielle », 2017 n'avait pu échapper à la « Blockchain ». Chacune de ces déferlantes médiatiques avait un mérite : attirer l'attention du grand public et des investisseurs institutionnels sur des vagues technologiques d'ampleur.

De toutes les vagues technologiques, l'informatique quantique pourrait bien se révéler la plus puissante. Cette technologie de rupture reste à ce jour méconnue, concentrée dans les mains de quelques « Big Tech » alors même que ses potentialités d'application paraissent massives.

En augmentant et en accélérant la capacité de calcul, l'ordinateur quantique pourra, demain, transformer de nombreux pans de nos économies : banques, laboratoires pharmaceutiques et transports seront les premiers touchés. La cryptographie, l'intelligence artificielle ou encore la modélisation du vivant connaîtront une accélération technologique.

Face aux géants américains et chinois, l'Europe doit se doter d'une véritable « stratégie quantique » pour mobiliser les laboratoires de recherche, les *scale-up*, les grands groupes, les investisseurs et les pouvoirs publics.

L'informatique quantique est un sujet trop important pour être laissé aux seuls ingénieurs. Il est temps que les forces vives de l'écosystème numérique s'en saisissent. C'est la mission principale de France Digitale, première association de startups en Europe. Puisse cette étude apporter une première pierre à la construction d'un édifice commun.



Nicolas BRIEN  
CEO France Digitale

## 03 | Avant-propos

## 06 | Nos convictions sur le quantique

## 08 | Quel impact sur les secteurs ?

L'informatique quantique : prêts pour le grand saut ?  
L'ordinateur quantique n'est pas un simple ordinateur classique plus puissant !  
La simulation de systèmes complexes  
L'optimisation de grands systèmes  
La cybersécurité  
Intelligence artificielle et informatique quantique : un mariage heureux ?  
En bref : l'informatique quantique va impacter quasiment tous les secteurs

## 18 | Les fondamentaux de l'informatique quantique

Une brève histoire de l'informatique quantique  
Les principes fondamentaux : qubit et superposition  
Mesurer la puissance d'un ordinateur quantique  
Le problème des standards technologiques  
L'informatique quantique vient-elle remplacer l'informatique classique ?

## 24 | Un écosystème riche mais encore jeune

Les laboratoires de recherche, des partenaires clés  
Les géants du numérique, à l'avant-garde  
Les industriels, de précieux catalyseurs  
Les fonds d'investissement, des alliés incontournables  
Les États stratégiques et leurs programmes de financement  
L'écosystème en France et en Europe : beaucoup de projets, encore peu de startups

## 34 | Se préparer à l'informatique quantique

Pour les décideurs publics  
Pour le secteur privé

## 38 | Conclusion



# Nos convictions sur le quantique

1

L'informatique quantique va être source de progrès dans tous les secteurs : la finance et les industries, puis elle sera un catalyseur de découvertes pour la recherche.

2

Elle fait peser un risque majeur sur la cybersécurité, en menaçant de rendre inopérants les systèmes de chiffrement actuels. Elle est également source de solutions pour la sécurisation de nos communications.



3

L'Europe a tout intérêt à maîtriser la technologie quantique pour rester dans la course, garder sa souveraineté et ainsi se préserver de certains risques (transfert des activités de R&D vers les USA ou la Chine, perte de productivité, incapacité à protéger ses communications sensibles telles que le renseignement ou l'intelligence économique...).

4

L'Europe a besoin d'une impulsion majeure de la part des États pour devenir un acteur de premier plan à l'échelle mondiale : il est nécessaire de déclencher un plan massif pour stimuler les investissements, poursuivre les efforts de formation, en coordonnant encore mieux l'ensemble des parties prenantes.

5

La France occupe aujourd'hui une place de choix (2<sup>e</sup>) au sein de l'écosystème quantique européen : les startups et industriels français doivent transformer la technologie quantique en usages et en saisir immédiatement les opportunités ; les fonds d'investissement ont quant à eux un rôle clé dans le décollage des technologies émergentes.

# Quel impact sur les secteurs ?

## L'informatique quantique : prêts pour le grand saut ?

**Annnonce par Google de sa suprématie quantique, commercialisation par IBM de son premier ordinateur quantique : cette fois-ci, les grandes manœuvres sont lancées !**

Depuis le milieu du siècle dernier, la course à la puissance de calcul est effrénée. Des problèmes de plus en plus complexes à traiter, des volumes de données croissants à exploiter : les organisations ont besoin d'aller toujours plus vite pour rester compétitives.

L'informatique quantique promet sur ce plan des progrès considérables : Google prétend ainsi réduire à quelques minutes des calculs qui prendraient 10 000 ans avec un ordinateur classique...

Mais est-ce pour autant la solution miracle, constituant à elle seule l'avenir de l'informatique ? Pour mieux saisir la révolution qui s'annonce et s'y préparer efficacement, voici un décryptage des enjeux, des usages actuels et à venir de l'écosystème et des actions à engager.

## L'ordinateur quantique n'est pas un simple ordinateur classique plus puissant !

Avant de nous lancer dans l'analyse de cette révolution à venir, il est essentiel de mettre en évidence la caractéristique fondamentale d'un ordinateur quantique : **sa capacité à traiter certains types de calcul en parallèle et simultanément.**

Car l'ordinateur quantique est bien un nouveau modèle d'ordinateur, basé sur des principes assez éloignés de son cousin classique, tout comme l'ampoule électrique est une cousine éloignée de la bougie. Dans les deux cas, l'objectif initial est le même (éclairer ou calculer), mais les technologies mobilisées et les possibilités n'ont plus rien à voir.

En résumé, les propriétés quantiques mobilisées permettent de calculer avec

un même processeur les différentes « histoires » possibles du problème, là où un ordinateur traditionnel les calcule de façon séquentielle (ou en parallèle, sur plusieurs processeurs).

**Le gain de temps peut donc être considérable... mais dans certains cas seulement :** lorsque le problème consiste à parcourir un nombre considérable de combinaisons possibles !

Dès lors, trois grand types de **problématiques se distinguent pour bénéficier pleinement** des progrès apportés par l'informatique quantique : la simulation de systèmes complexes, l'optimisation de grands systèmes et la cybersécurité. Or ces questions se retrouvent **dans quasiment tous les secteurs d'activité.** Voici un rapide tour d'horizon des cas d'usages envisagés et parfois déjà effectifs.

« L'objectif initial est le même mais les technologies mobilisées et les possibilités n'ont plus rien à voir »

## La simulation de systèmes complexes

Puisant ses caractéristiques dans l'infiniment petit, l'ordinateur quantique est **un excellent outil pour simuler le fonctionnement de la matière et du vivant** qui se joue justement à cette échelle : chimie, physique et biologie sont ainsi des domaines privilégiés pour exploiter la puissance quantique.

La facilitation des découvertes dans ces domaines promet d'être considérable et riche en apports pour l'humanité et certaines industries :



### / Chimie - Pharmacie - Santé

La puissance de calcul aujourd'hui nécessaire pour concevoir de nouvelles molécules est trop importante pour la technologie actuelle : l'informatique quantique permettra de rendre accessible la simulation de molécules complexes, offrant ainsi un outil concret pour concevoir des molécules aux propriétés ciblées (médicaments, catalyseurs, protéines, enzymes, etc.) de façon moins aléatoire qu'aujourd'hui.

De façon analogue, elle devrait également permettre d'améliorer la compréhension du vivant, comme par exemple celui de notre cerveau.



### / Physique

Les laboratoires de recherche en France et en Europe passent des milliards d'heures de calculs dans des supercalculateurs pour résoudre des équations complexes comme celles de la prédiction de collisions de particules et de réactions nucléaires. Le calcul quantique permettra à terme de réduire les temps de calcul et de travailler sur des réactions encore méconnues.

Par exemple, il devrait permettre de mieux comprendre les clés pour créer des matériaux supraconducteurs à température ambiante, ce qui permettrait de réduire drastiquement les pertes d'un réseau électrique national, ou de développer les performances (ou réduire les coûts) des lignes de train à sustentation magnétique (comme le **train Maglev au Japon**, dont la mise en service est prévue en 2027).

L'ordinateur quantique ne garantit pas à proprement parler la faisabilité de ces applications, mais elle en sera sans aucun doute un catalyseur clé. À ce jour, les simulations permises par les ordinateurs quantiques sont limitées à des systèmes très simples (de quelques atomes). Des ordinateurs quantiques bien plus puissants seront nécessaires pour explorer toutes les possibilités en la matière.

## L'optimisation de grands systèmes

En sortant de l'échelle atomique, les **grands systèmes, composés de milliers voire de millions de composants interagissant entre eux**, sont également de bons candidats pour l'informatique quantique. Sa capacité à traiter simultanément toutes les « histoires » possibles et donc à éviter la traditionnelle explosion combinatoire dans ce genre de domaines, prend alors tout son sens pour **identifier rapidement les situations optimales**. De nombreux domaines sont concernés :



### / Transports – Énergie – Logistique

Les logisticiens, énergéticiens et acteurs du transport doivent chaque jour relever le défi d'optimiser de nombreuses questions, sans pouvoir calculer toutes les possibilités (en un temps acceptable) : planification de tournées, gestion de flotte de véhicules ou d'avions, 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.), ou encore prévisions météorologiques, etc. L'informatique quantique devrait permettre d'améliorer et de faciliter grandement ces calculs d'optimisation.

À titre d'exemple **Airbus a lancé un « Quantum Challenge »** début 2019, appelant la communauté quantique à contribuer à la résolution de plusieurs de ses problèmes stratégiques : la majorité de ces problèmes relèvent de l'optimisation (forme des ailes, chargement des avions, etc.).



### / Finance

Les institutions financières sont elles aussi très consommatrices de grandes puissances de calcul, notamment pour évaluer l'exposition aux risques de leurs portefeuilles, qui résultent des centaines de milliers de transactions quotidiennes. En réduisant drastiquement les temps de calcul du niveau de risque, l'informatique quantique doit permettre d'améliorer encore la performance des algorithmes à l'origine d'une partie croissante des transactions aujourd'hui.

Le secteur financier, combinant en effet un besoin mature et d'importants moyens d'investissement, se positionnera très certainement à l'avant-garde du calcul quantique.



### / Marketing

Les directions marketing rencontrent des problèmes complexes comme l'optimisation du mix marketing, l'optimisation de placement de publicités ou encore le marketing prédictif dont la résolution peut être accélérée par un ordinateur quantique.

## La cybersécurité

Nous avons jusqu'ici essentiellement évoqué les opportunités de l'informatique quantique, les domaines où elle pouvait devenir un levier majeur de performance. Cependant **la puissance de l'informatique quantique présente aussi des risques**. Le domaine de la cybersécurité, vital pour les échanges sur Internet qui sont devenus essentiels pour nos sociétés, en est la meilleure illustration.



### / L'informatique quantique comme cyber-risque majeur...

L'une des premières applications de l'ordinateur quantique est le décryptage de clés utilisées pour chiffrer les informations : ce faisant, il met en risque les communications, les systèmes de paiements, la validation des transactions financières ou encore toutes les applications de la *blockchain*, comme le *bitcoin*.

Ces clés sont en effet basées sur la difficulté à factoriser en nombres premiers des très grands nombres, problème qui est justement l'une des capacités fondamentales de l'ordinateur quantique : l'algorithme de Shor (1994) a été spécifiquement conçu à cet effet.

Il n'est toutefois pas encore temps de paniquer, cette application ne devrait pas être envisageable avant une bonne dizaine d'années compte tenu de la complexité des clés actuelles. Il est en revanche temps de trou-

ver des solutions qui résisteront à ce type d'attaque devenue triviale. Les recherches pour définir cette cryptographie post-quantique sont en cours et comme souvent, le passage de la théorie à la pratique avec un bon niveau de standardisation sera probablement compliqué.



### / ... mais aussi comme la solution idéale !

La physique quantique porte également en elle une solution définitive pour sécuriser les échanges : la sensibilité des particules à toute observation permet en effet de détecter à coup sûr si une information a été interceptée sur le chemin entre son émetteur et son récepteur.

Et le chemin vers cette solution n'est peut-être pas si long que cela. La Chine l'a prouvé par la mise en place d'une liaison de communication quantique sol-espace pour son **satellite Micius** dès 2017.

Ces technologies constitueront sans doute l'une des briques de sécurité de l'Internet de demain, affectant fortement le secteur des télécommunications. Les prémices sont déjà visibles, via par exemple la solution ID Quantique, qui contribue depuis début 2019 à la sécurisation du réseau 5G de l'un des leaders du marché de téléphonie mobile Sud-Coréen (**SK Telecom**).

## Intelligence artificielle et informatique quantique : un mariage heureux ?

Domaine « star » de l'informatique ces dernières années, grâce aux prouesses de la *Machine Learning* ou du *Deep Learning*, l'Intelligence Artificielle (IA) peut-elle franchir un nouveau cap grâce à l'informatique quantique ?

### Un facteur d'accélération

En première approche, très certainement : **l'IA est gourmande en calcul et vise souvent à résoudre des problèmes d'optimisation, elle constitue donc a priori un sujet idéal pour l'informatique quantique.**

Grâce à sa puissance combinatoire, le calcul quantique devrait donc permettre de réduire les temps d'apprentissage et les délais de traitement de nombreuses applications de l'IA, comme par exemple :

#### / Finance – Secteur Public

L'une des applications majeures de l'IA aujourd'hui concerne la détection des fraudes et des comportements « anormaux », véritables enjeux du secteur financier et des services de sécurité des collectivités. L'informatique quantique devrait permettre de mieux identifier et plus rapidement, les *patterns* correspondants.

#### / Automobile – Mobilité

La combinaison entre l'IA, pour rendre les véhicules autonomes, et l'informatique quantique, pour optimiser de façon centralisée les systèmes à plusieurs milliers de composants, peut ici être redoutablement mise à profit.

Des initiatives notables ont d'ailleurs été largement médiatisées : celle de **Volkswagen et D-Wave**, qui ont démontré en 2017 les bénéfices de la technologie sur l'optimisation du trafic de 10 000 taxis à Pékin, mais aussi celles de **Ford et de la NASA (avec D-Wave là encore)** en 2018 pour développer des véhicules autonomes.

## Des impacts parfois plus indirects... mais à plus court terme !

L'informatique quantique oblige par ailleurs à revoir fondamentalement la façon de concevoir les algorithmes. Certes, cela oblige à se former à de nouvelles façons de faire, mais cela peut aussi avoir des retombées positives.

Ainsi, Ewin Tang une étudiante à l'Université du Texas améliora en 2018 un algorithme de *Machine Learning* « classique », pour l'amener au même niveau de performance que l'algorithme quantique publié en 2017. Celui-ci permettait de réaliser des recommandations de films, de livres ou de rencontres de manière exponentiellement plus efficace que les méthodes antérieures.

Sans remettre en cause l'intérêt du quantique, cette anecdote met en exergue un effet de bord intéressant : les recherches algorithmiques quantiques actuelles peuvent avoir des retombées positives à court-terme.

### Un catalyseur indéniable, mais pas une baguette magique

L'informatique quantique dynamise dès à présent la découverte de nouveaux algorithmes et pourra considérablement contribuer à réduire la consommation d'énergie nécessaire à l'apprentissage des IA à long-terme. Cela pourra permettre de faciliter l'accès à ces technologies et donner un second souffle à l'IA en débloquent un second palier de développement : des intelligences s'appuyant sur la puissance quantique.

Néanmoins, l'informatique quantique n'est pas une solution miracle à tous les problèmes, et ne devrait pas permettre de traiter les principaux défauts actuels de l'IA :

/ **L'explicabilité** des algorithmes : la capacité à expliquer la prise de décision d'une IA est aujourd'hui limitée et source de méfiance pour ses utilisateurs.

/ **Le biais** algorithmique : l'erreur systématique d'un algorithme, liée aux données sur lesquelles il a été entraîné ; et plus globalement la capacité des algorithmes à s'adapter lorsque les données en entrée diffèrent grandement des données avec lesquelles il a été entraîné.

## En bref : l'informatique quantique va impacter quasiment tous les secteurs

Ce bref tour d'horizon laisse entrevoir des **gisements de progrès considérables pour nombre de secteurs** : qui peut en effet affirmer aujourd'hui ne pas avoir de problèmes d'optimisation de ses ressources ? Pour certains secteurs,

l'impact est même encore plus grand : pour n'en citer qu'un, la R&D dans le domaine de la pharmacie pourrait changer totalement, amenant à un changement stratégique majeur pour les grands acteurs, plus tourné vers la croissance organique basée sur des découvertes internes à l'entreprise, et moins axé vers les acquisitions ciblées qui sont la norme ces dernières années.

La grande famille de la technologie quantique recouvre également d'autres pépites.

Évoquons par exemple la métrologie quantique, qui promet de développer des dispositifs de mesure (du temps, de position, de gravité, de sondage du sous-sol) capables d'une précision inégalée.

Certains risques émergents sont à surveiller, notamment pour tout ce qui touche à la sécurité de l'information, sujet hautement sensible pour toutes les organisations désormais. Néanmoins sur ce point, les grands acteurs privés ne peuvent raisonnablement qu'attendre que le marché leur propose des solutions adaptées à ce nouveau risque.



# Les fondamentaux de l'informatique quantique

## Une brève histoire de l'informatique quantique

La loi de Moore, prédisant empiriquement un doublement de la puissance de calcul des processeurs tous les 18 mois, a été édictée en 1965. Elle a jusqu'ici été vérifiée, essentiellement grâce aux efforts de miniaturisation des transistors qui composent les processeurs. Mais à force de les miniaturiser, une limite physique va nécessairement apparaître : à très petite échelle (globalement celle de l'atome), il n'est plus possible de négliger les effets quantiques, qui viennent totalement perturber le fonctionnement.

Même si l'on n'en est pas encore là, le concept d'ordinateur quantique résulte de ce constat, et surtout des idées du physicien Richard Feynman : en 1981, il

explique en effet être convaincu qu'il faut non pas subir les effets quantiques, mais bien en profiter pour dépasser les limites des ordinateurs classiques.

Dès lors, les recherches en la matière se multiplient dans l'ensemble des domaines : composants matériels, algorithmie, langages, etc. Ces dernières années, nous assistons à une accélération de cette révolution technologique : des ordinateurs quantiques sont commercialisés et/ou accessibles dans le Cloud (ex : D-Wave, Rigetti, IBM), des environnements de développement sont utilisés par des communautés (ex : LIQUi|>, Qiskit) et des algorithmes sont optimisés pour le calcul quantique (ex : factorisation de grands nombres entiers en nombres premiers - Shor, algorithme de recherche - Grover).

### Les principales dates du développement

### de l'informatique quantique

**Premier modèle de base** pour un ordinateur quantique.  
« Les ordinateurs classiques ne peuvent pas simuler l'évolution des systèmes quantiques de manière efficace ».  
*R. Feynman*

**Description théorique** du fonctionnement d'un ordinateur quantique et des portails quantiques.  
*D. Deutsch*

**Développement d'un algorithme quantique** de factorisation de grands nombres.  
Ce dernier surpasse de manière exponentielle les meilleurs algorithmes classiques.  
*P. Shor*

**Premier ordinateur à RMN à 5 qubits.**  
*Technical University of Munich*  
Suivi peu de temps après par un dispositif à 7 qubits.  
*Laboratoire de Los Alamos*

**Standard opératoire** permettant de contrôler un dispositif à 12 qubits.  
*Institute for Quantum Computing et du Perimeter Institute for Theoretical Physics*

• Sortie du D-Wave 2000Q, 2048 qubits. Temporal Defense Systems est la première société à en faire l'acquisition.  
*D-Wave Systems*

• IBM dévoile son ordinateur quantique à 17 qubits.

• Intel confirme le développement d'une puce à 17 qubits.

• Google annonce la création d'une puce à 72 qubits, Bristlecone.

1981 1985 1994 1998 2000 2001 2006 2011 2015 2017 2019

**Première démonstration expérimentale d'un algorithme quantique** par un ordinateur quantique de 2 qubits de technologie RMN (résonance magnétique nucléaire).  
*Oxford University*

**Première démonstration de l'algorithme de Shor** (factorisation du nombre 15).  
*Centre de recherche IBM Almaden*

D-Wave One, premier ordinateur quantique disponible à la vente.  
*D-Wave Systems*

Sortie du D-Wave 2X, 1152 qubits.  
*D-Wave Systems*

• IBM dévoile son premier ordinateur quantique commercial.  
*IBM Q System One*  
• Google annonce avoir atteint la suprématie quantique.

## Les principes fondamentaux : qubit et superposition

### L'élément de base : le qubit

La brique de base d'un ordinateur classique est le bit, valant 0 ou 1 (selon que le courant « passe » ou non), il permet de représenter n'importe quelle information, en combinant intelligemment suffisamment de bits.

Mais dans un ordinateur quantique, changement fondamental : l'information est désormais stockée dans un qubit (quantum bits), qui a l'étonnante propriété de pouvoir prendre les valeurs 0 ou 1 (quand on le mesure) avec une certaine probabilité. Tant qu'on ne le mesure pas, il est à la fois 0 et 1 : il est dans **plusieurs états « superposés »**.

Nous verrons plus loin que de multiples options sont étudiées pour créer physiquement des qubits : atomes, électrons, etc. Tout est imaginable à partir du moment où l'on reste à l'échelle des particules quantiques.

### Une propriété clé : la superposition d'états

La véritable « magie » de l'ordinateur quantique intervient lorsque l'on effectue des opérations sur un qubit : chaque opération est alors effectuée sur les (deux) différents états du qubit.

C'est lorsque l'on combine plusieurs qubits dans un système que le concept devient intéressant : le nombre de ces états superposés augmente alors très vite. Avec 2 qubits on peut opérer sur

4 états, 1024 états avec 10 qubits, et l'on passe à plus d'un million d'états avec 20 qubits : de quoi envisager une parallélisation assez vaste.

La capacité exponentielle (au sens propre) de l'ordinateur quantique se joue ici, ce qui explique, en quelques mots et de façon nécessairement réductrice, comment un ordinateur quantique peut calculer en parallèle et simultanément les différentes « histoires » que nous évoquons plus haut.

### Mesurer la puissance d'un ordinateur quantique

À la lecture des communiqués de presse des acteurs majeurs, **la mesure de la puissance des ordinateurs quantiques semble évidente : c'est le nombre de qubits qui fait foi**. **Google** annonçait 72 qubits en 2018, **IBM** 53 qubits en 2019, alors que **D-Wave** commercialise déjà un ordinateur à 2048 qubits et en promet bientôt 5 000.

### Le nombre de qubits ne suffit pas

La réalité est quelque peu plus complexe, car **ce nombre de qubits représente assez mal la puissance d'un ordinateur quantique**, qui dépend également de :

/ **Son caractère « universel »** ou non : certains ordinateurs quantiques sont en effet conçus pour ne traiter que certains types de problèmes. Difficile donc de les comparer aux machines quantiques universelles : plus complexes à mettre au point, mais avec un périmètre d'application plus large.

/ **Sa topologie**, qui décrit comment les qubits sont liés entre eux.

/ **Le nombre et la variété des opérateurs disponibles** (les « portes quantiques »), qui offrent les opérations unitaires : l'équivalent des « et », « ou », « ou exclusif » de la logique traditionnelle.

Ces deux dernières caractéristiques, combinée de façon maline, permettent de réduire le nombre d'opérations pour réaliser un calcul.

### La technologie doit encore progresser

Par ailleurs, à ce jour, les technologies sous-jacentes sont encore en phase de maturation. Des caractéristiques de performance intrinsèque doivent donc être considérées, et notamment :

/ **Le taux d'erreur**, qui mesure la fiabilité des calculs : plus il est faible, plus il est possible d'enchaîner les opérations et ainsi de réaliser un calcul complexe. L'utilisation de codes correcteurs d'erreur permet de compenser, mais au prix d'une baisse des performances (comme en informatique classique).

/ **Le temps de cohérence**, qui définit la durée durant laquelle le qubit reste « cohérent », ou pour le dire simplement « exploitable » : plus ce temps est grand, plus on peut effectuer d'opérations et donc de calculs complexes.

## Deux familles d'ordinateurs

ORDINATEUR QUANTIQUE UNIVERSEL

ORDINATEUR QUANTIQUE « À RECUIT SIMULÉ »

### Description

Capable de réaliser toutes les typologies de calcul, il pourra être utilisé sur l'ensemble des champs d'applications évoqués plus haut

Limité à certains types de calcul, et plus lent qu'un ordinateur quantique universel, il permet néanmoins certaines applications liées à l'intelligence artificielle (ex : véhicule autonome)

### Principaux acteurs

Rigetti, IBM, IonQ, Alibaba, Google, Microsoft

D-Wave

### Échelle (nombre de qubits - 2019)

20-53

2048

### Un indicateur qui semble pertinent : le Quantum Volume

Les annonces du marché sont difficiles à comparer en l'absence de tout ou partie de ces informations, il est donc délicat de détecter les leaders technologiques.

Toutefois, **une mesure de puissance intéressante est promue par IBM depuis 2017 : le Quantum Volume (volume quantique)**, qui agrège en une mesure unique les différentes caractéristiques évoquées plus haut. En forme d'hommage à Moore et sa fameuse loi, IBM prévoit d'ailleurs que son ordinateur double son volume quantique chaque année.

## Le problème des standards technologiques

Comme pour toute technologie en cours de maturation, le problème de la standardisation se pose.

### NIVEAU DE STANDARDISATION

#### Type de qubits

Il n'existe pas de consensus à ce jour sur la manière de créer physiquement des qubits. Chaque constructeur mise sur la topologie qu'il considère la plus puissante et espère que celle-ci ne rencontrera pas un plafond de verre. Alors que les technologies les plus prometteuses semblent être celles basées sur les qubits CMOS (Intel), supraconducteurs (Rigetti), ions piégés (IonQ) ou les encore atomes froids (PasQal), aucune piste n'est à ce jour abandonnée.

#### Langages informatiques

Chaque constructeur développe ses propres langages de programmation, compilateurs, langages machine, plateformes de développement. Si les algorithmes quantiques sont quant à eux bien partagés notamment grâce à l'initiative Quantum Zoo qui liste les algorithmes développés pour le quantique, les développeurs sont de leur côté confrontés à de multiples façons de les implémenter toutes liées aux constructeurs.

S'il s'agit d'un débat de chercheurs pour la partie *hardware*, il en va autrement pour la partie *software*. Ce sont les équipes de développeurs qui devront appréhender ces nombreux langages pour donner vie aux applications. À ce stade, il est difficile de prédire quel *framework* deviendra dominant, mais ne doutons pas de la capacité des développeurs à en maîtriser plusieurs (comme ils maîtrisent aujourd'hui un nombre souvent considérable de langages « classiques »).

## L'informatique quantique vient-elle remplacer l'informatique classique ?

L'ordinateur quantique n'est pas près de remplacer le poste de travail personnel. Pour deux raisons : sa taille importante et son besoin régulier d'être refroidi à des températures proches de zéro. De nouveaux types de qubits pourraient à long terme réduire ces contraintes et permettre de miniaturiser les machines quantiques jusqu'à une taille acceptable.

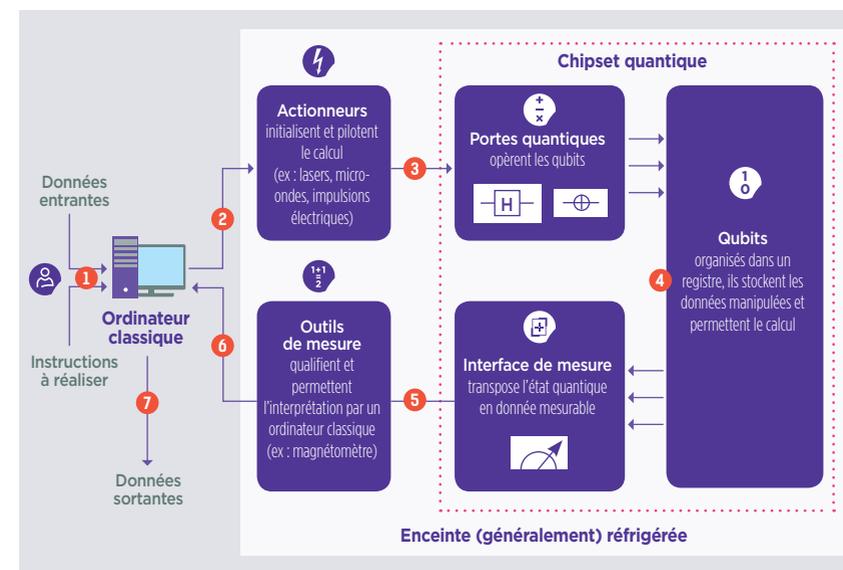
Il est en revanche susceptible de s'intégrer à moyen terme aux datacenters des constructeurs de supercalculateurs. Nous prévoyons que les acteurs du marché

HPC (*High Performance Computing*) s'équipent progressivement pour permettre à leurs clients d'exécuter leurs calculs complexes en combinant les forces du calcul classique et du calcul quantique afin de diminuer le temps de rendu. **Accenture** a déposé un brevet au cours de l'été 2019 facilitant l'orientation des calculs vers l'ordinateur approprié. De son côté, **Atos** propose déjà un puissant émulateur d'algorithmes quantiques à côté de son offre de supercalculateur. À ne pas confondre avec un ordinateur quantique, cet émulateur permet néanmoins de s'accoutumer aux caractéristiques de la programmation quantique.

Par ailleurs, nous l'avons vu, l'ordinateur quantique n'exprime toute sa puissance que sur certaines catégories de problèmes. Inutile par exemple de le mobiliser sur la grande famille des traitements transactionnels (ex : la réservation de billet de train, l'envoi d'emails) ou celle des traitements graphiques (ex : jeu vidéo, domaine télévisuel).

Enfin, un dernier point est décisif : l'ordinateur quantique ne remplacera pas l'ensemble des machines traditionnelles, car **l'ordinateur classique reste aujourd'hui nécessaire pour programmer et piloter son cousin quantique** comme le montre le schéma de principe ci-dessous.

## Schéma de principe d'un ordinateur quantique



Source : Schéma inspiré de l'ouvrage "Comprendre l'informatique quantique" - O. Ezraty

# Un écosystème riche mais encore jeune



Comme l'essentiel des technologies récentes, l'informatique quantique nécessite la mobilisation d'un écosystème riche et divers : recherche, financement, commercialisation, tous les acteurs doivent être mobilisés pour faire émerger des solutions opérationnelles, avec un véritable impact global.

## Les laboratoires de recherche, des partenaires clés

La technologie étant encore en phase de recherche et développement, **les laboratoires et universités sont des acteurs clés de l'écosystème quantique**. La majorité d'entre eux collaborent avec d'autres unités de recherche ou avec des entreprises privées.

Au niveau européen, de nombreux projets de recherche de collaboration internationale sont en cours, comme le projet **OpenSuperQ<sup>1</sup>** qui réunit des collaborateurs d'Allemagne, d'Espagne, de Suède, de Suisse et de Finlande. La collaboration d'institutions d'au moins trois pays différents est d'ailleurs l'une des conditions d'accès aux financements du programme européen : le **flagship quantique<sup>2</sup>**.

**Côté français, la recherche est active et de qualité. Citons notamment le projet de recherche Quantum Silicon à Grenoble qui réunit les chercheurs de trois laboratoires français (CEA-IRIG, CNRS-Institut Néel et CEA-Leti) autour de la composition de processeurs quantiques basés sur du silicium.**

## Les géants du numérique à l'avant-garde

Plusieurs grands groupes, les géants américains en première ligne, ont développé en interne des programmes dédiés à la technologie quantique pour l'utiliser, et la commercialiser, ou financent des programmes de recherche. Ce sont tout d'abord les géants américains Google, Microsoft, IBM et Intel.

**Google** s'est lancé depuis 2014 dans la confection de son propre ordinateur quantique via son *Quantum Artificial Intelligence Lab* (QuAIL), hébergé par la NASA. Son investissement lui a permis de devenir l'un des acteurs les plus importants du quantique. L'équipe de recherche de Google aurait ainsi atteint la suprématie quantique, le point où l'ordinateur quantique va au-delà des capacités de l'ordinateur classique. Cependant, Google n'a pas encore confirmé officiellement l'information, et Sycamore, le calculateur quantique utilisé, a peu d'applications réelles possibles.

**Microsoft** s'est lancé dès 2005 en finançant le programme de recherche Station Q à l'Université de Californie - Santa Barbara. En 2017, l'entreprise a lancé le *Quantum Development Kit*, un programme avec son langage de programmation (le Q#) utilisé pour développer des algorithmes quantiques. Le Kit, disponible en open-source, a été téléchargé plus de 100 000 fois.

1- <http://opensuperq.eu/partners>

2- <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/policies/quantum-technologies>

**IBM**, traditionnellement très actif dans les travaux de recherche fondamentale, a développé en interne son groupe de recherche pour construire de bout-en-bout son propre ordinateur quantique, qui s'est concrétisé dernièrement par l'annonce d'un système à 53 qubits disponible dans le Cloud en octobre 2019. La firme informatique ambitionne de commercialiser son ordinateur quantique à horizon 5 ans et de devenir le leader de l'écosystème. **Point intéressant pour l'écosystème français, IBM a créé un important centre sur ces technologies basé à Montpellier.**

**Intel** se concentre sur la production de puces informatiques quantiques. Son ambition est d'arriver à produire de façon massive des processeurs quantiques, de manière rapide et à moindre coût.

D-Wave et Rigetti, deux startups nord-américaines, sont des acteurs incontournables du marché des technologies quantiques.

**D-Wave** est une société canadienne souvent présentée comme pionnière dans le calcul quantique, puisqu'elle est la première à commercialiser des ordinateurs quantiques dit « à recuit simulé ». Il faut noter que ce type de calculateur ne peut travailler que sur certains types spécifiques de calculs, et ne correspond pas donc aux usages attendus d'un ordinateur quantique universel, mais ses progrès sont remarquables, et son écosystème logiciel particulièrement développé.

**Rigetti Computing** est une société californienne qui vise à réaliser un calculateur quantique entier : fabrication de puces, de l'architecture et des algorithmes permettant leur utilisation. À ce stade, ils mettent à disposition dans le Cloud une plateforme permettant de développer des algorithmes utilisant 36 qubits (sans qu'il soit néanmoins clair qu'il s'agisse d'une simple émulation ou d'une véritable machine à 36 qubits).

Les entreprises chinoises participent aussi à la compétition technologique. Le géant chinois du e-commerce, **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 quantiques. Un autre géant chinois, le moteur de recherche **Baidu**, a créé en 2018 un institut dédié à l'ordinateur quantique. Ces deux sociétés travaillent en partenariat avec la recherche publique chinoise.

**En France, 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.**

## Les industriels, de précieux catalyseurs

Les grands groupes industriels jouent également un rôle dans le développement du quantique, plusieurs ont mis en place leurs propres équipes de recherche ou ont financé des projets de recherche quantique appliquée en collaboration avec des laboratoires ou des startups. **Certains secteurs économiques, en particulier celui des transports, de l'aviation, des télécommunications et des énergies, sont plus sensibilisés.**

En 2015, **Airbus** a missionné une équipe dédiée au sein de la *Airbus Defense & Space Unit*. Le géant de l'aéronautique collabore avec QC Ware (USA, 2014), startup du logiciel quantique. L'objectif est d'utiliser l'ordinateur quantique pour de l'optimisation, et la simulation quantique pour créer des matériaux ultra-

durables. La société **Volkswagen**, déjà citée pour ses travaux sur l'optimisation de parcours de taxis à Pékin<sup>3</sup>, observe concrètement les possibilités offertes par le quantique dans les transports grâce à son partenariat avec la société D-Wave.

Dans le secteur de l'énergie, **Total** collabore avec Atos (QLM), afin, entre autres, de simuler et comprendre le comportement de particules, mais aussi d'optimiser la logistique des outils industriels. De la même manière, **EDF** a lancé en 2018 un projet dédié.

Le projet **PASQuaS**, qui vise à développer un simulateur quantique (*hardware* et *software*), et qui fait partie des projets soutenus par le 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.

3- <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fict.2017.00029/full>



## Les fonds d'investissement, des alliés incontournables

À ce jour, environ 150 sociétés de capital-risque (*venture capitals*) ont réalisé des investissements dans des startups quantiques. Le nombre de fonds d'investissement spécialisés dans le quantique est en revanche très faible et ne dépasse pas une demi-douzaine dans le monde. **La technologie quantique est regardée comme un investissement risqué** en raison de la complexité de la technologie et du manque de visibilité sur les retours sur investissement.

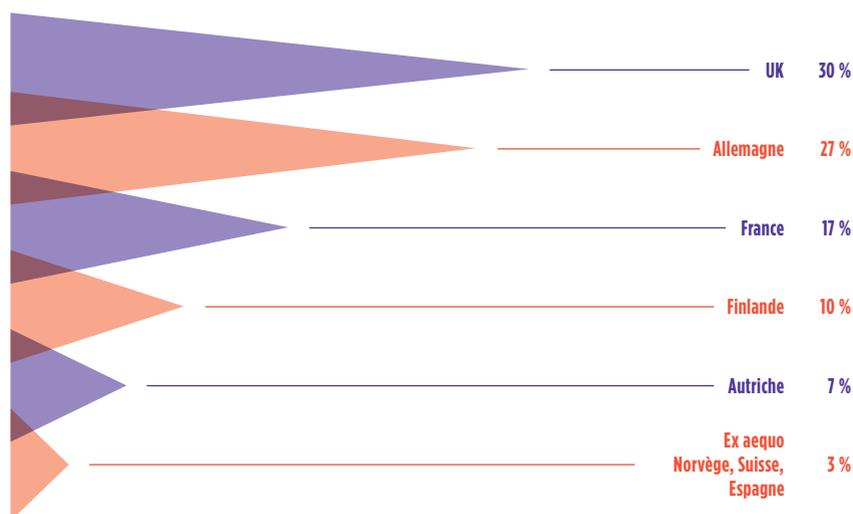
Les investissements actuels sont réalisés en majorité par des fonds spécialisés en *deeptech* ou spécifiques à une ou à

plusieurs technologies quantiques. Leur niveau est encore faible en comparaison avec ceux réalisés en intelligence artificielle ou sur la blockchain.

**En France, Quantonation, le fonds créé par Charles Beigbeder et Christophe Jurczak fait figure d'exception. D'autres fonds français ont investi ces dernières années dans des projets quantiques, comme le fond XAnge.**

Le nombre d'opérations d'investissement et les montants totaux ont connu une forte croissance ces dernières années. En 2012, trois startups avaient réalisé une levée de fonds, pour un montant total de 34 millions de dollars US. En 2018, 24 startups ont levé 128 millions de dollars US.

## Répartition des fonds d'investissement européens (2019)



Source : Wavestone

## Les États stratégiques et leurs programmes de financement

L'ordinateur quantique est devenu un **enjeu stratégique de souveraineté et de sécurité**. De nombreux États ont adopté des stratégies nationales de recherche et développement, avec des programmes de financement nationaux situés entre 140 millions et 1 milliard d'euros.

### Dans le monde

Les **États-Unis** et la **Chine** sont les deux États ayant investi le plus<sup>4</sup>. En 2019, l'administration américaine a mis en place le *National Quantum Initiative Act*. D'un montant d'1,3 milliards de dollars, ce programme gouvernemental vise à encourager la recherche et le développement, ainsi que l'éducation en matière de technologie quantique.

La Chine apparaît comme l'État ayant le plus investi dans la communication et la cryptographie quantique. Le pays a lancé en 2017 la construction du *National Laboratory for Quantum Innovation* qui devrait voir le jour en 2019, pour un montant estimé de 10 milliards de dollars. Depuis 2006, le montant total des investissements publics chinois s'élève à près de 2 milliards d'euros.

### L'Union Européenne

En 1999, l'Union Européenne avait investi 550 millions dans le programme FET (*Future & emerging technologies*). À la suite du « Quantum Manifesto » signé en mai 2016 par plus de 3 400 acteurs de l'académie et l'industrie, elle a accentué sa volonté d'investir dans la technologie quantique. **Le Quantum Flagship, lancé en 2018, est un projet de la commission européenne sur dix ans, doté d'1 milliard d'euros** (20 projets ont été soutenus dans sa première phase en 2018, pour 135 M€) et mobiliser une communauté académique européenne de plus de 5 000 chercheurs.

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, ce qui explique aujourd'hui les nombreux programmes universitaires et le (relatif) grand nombre de startup du pays.

**La France a récemment mis à l'agenda l'informatique quantique : une mission parlementaire menée par la députée Paula Forteza sur les technologies quantiques a été lancée en avril 2019, elle devrait mener l'exécutif à annoncer un plan national d'ici la rentrée 2020.**

<sup>4</sup> <https://www.ida.org/-/media/feature/publications/a/as/assessment-of-the-future-economic-impact-of-quantum-information-science/p-8567.ashx>

## L'écosystème en France et en Europe : beaucoup de projets, encore peu de startups

Pour monitorer l'évolution du marché en Europe, Wavestone initie cette année un radar de l'écosystème quantique (voir graphique ci-dessous). Les premiers constats :

/ Au niveau européen, l'écosystème compte environ 90 membres. Avec 20 startups, le Royaume-Uni se classe en 1<sup>re</sup> position, suivi de la France avec 16 et l'Allemagne avec 14.

/ Le nombre de projets ou startups positionnés sur le développement de *hardware* et de composants (soit également l'ensemble des startups du

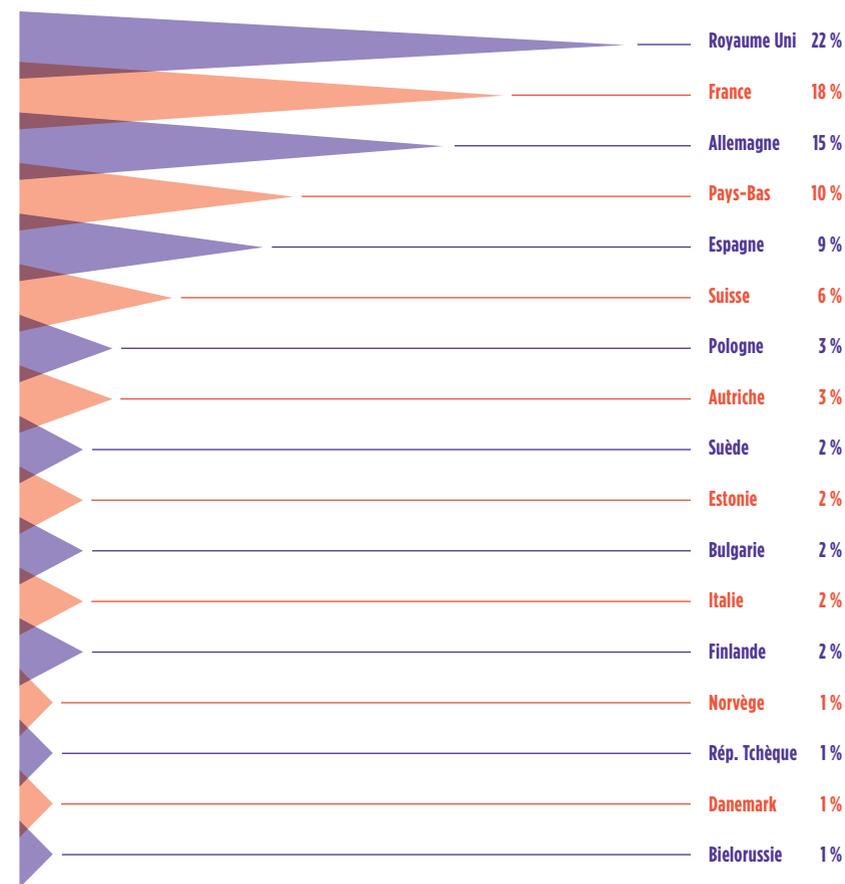
flagship quantique Européen) représente bien le focus actuel du marché : créer un ordinateur quantique suffisamment puissant et stable reste la priorité. Ce qui signifie probablement que les opportunités sur d'autres aspects (le développement de solutions logicielles, par exemple) restent à défricher.

Les startups intervenant dans le domaine sont encore peu nombreuses dans l'écosystème européen, et sont souvent récentes : la plupart ont été créées en 2018 et 2019. Très souvent issues de projets de laboratoires, et encore largement concentrées sur des activités de R&D, leur modèle d'affaire reste souvent peu propice au passage à l'échelle.

**« Avec 18 % des startups et 17 % des fonds d'investissement de l'écosystème quantum computing, la France se positionne comme un leader en Europe.\* »**

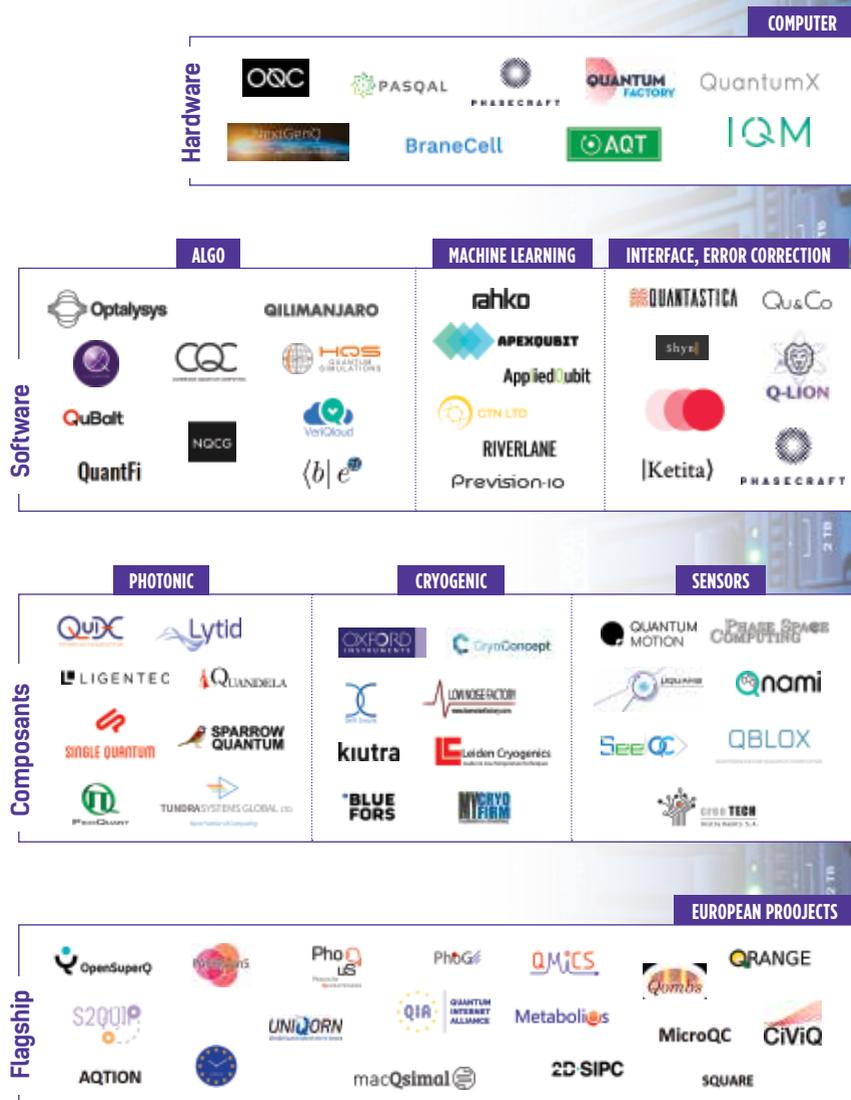
\*NB : le marché du quantum ne cessant d'évoluer, nous invitons le lecteur à adopter une certaine réserve quant à la précision de ces chiffres qui visent surtout à donner une vision globale de l'écosystème actuel.

## Répartition des startups européennes (2019)



Source : Wavestone

# Panorama 2019 de l'écosystème quantique européen



Chiffres Wavestone à partir des sources suivantes :  
 Fond d'investissement XAnge – xange.fr  
 Conférence QCB de la BPI (juin 2019)  
 Base de données Dealroom  
 Ezratty, O. (2019) - Comprendre l'informatique quantique.  
 Quantum computing report - <https://quantumcomputingreport.com>  
 Dossier de presse Flagship (2018) - [https://www.iqclock.eu/uploads/1/2/0/6/12064057/press\\_dossier\\_final\\_embargoed\\_1.pdf](https://www.iqclock.eu/uploads/1/2/0/6/12064057/press_dossier_final_embargoed_1.pdf)

# Se préparer à l'informatique quantique

La révolution de l'informatique est imminente : difficile d'affirmer un horizon temporel, mais la plupart des annonces convergent vers des premiers résultats concrets dans les 3 à 10 ans, selon l'optimisme ou le pragmatisme de leurs auteurs.

Dans tous les cas, il est encore temps de se préparer : les recommandations suivantes visent à encourager les acteurs publics et privés à se saisir de l'enjeu de la révolution quantique, porteuse de nombreuses opportunités.

## Pour les décideurs publics

### 1) Viser la « souveraineté quantique » de l'Europe

Les technologies quantiques seront clés dans les secteurs de la défense et de la sécurité. La maîtrise des ordinateurs et des communications quantiques seront des ressources majeures pour bâtir des infrastructures sécurisées et se doter de puissances de calculs sans précédent. Il faudra pour cela se mettre en capacité de maîtriser toute la chaîne de valeur : les matériaux, la construction des composants, les applications.

L'enjeu est ici de ne pas rater la prochaine grande vague technologique, pour limiter la prééminence des États-Unis, via les GAFA, et de la Chine dans le monde moderne.

### 2) Encourager les collaborations au niveau européen

La « souveraineté quantique », comme la « souveraineté numérique » peut et doit se penser au niveau européen, par un renforcement des coopérations. En raison des coûts et de la complexité de la recherche, la majorité des projets portant sur l'ordinateur quantique sont des collaborations entre plusieurs institutions, publiques et privées souvent internationales. Bien que déjà favorisées par les actions de la Commission européenne, ces collaborations peuvent encore être renforcées.

Sans que cela ne soit contradictoire, la création d'entités nationales, chargées de coordonner les différents projets de recherche, mettre en relation les différents acteurs du territoire et de piloter la stratégie en la matière, semble nécessaire pour favoriser l'efficacité des politiques publiques.

### 3) Encourager les investissements

Les technologies quantiques sont encore dans une phase lourde de R&D, leur développement nécessite des financements importants.

Au-delà de financements de laboratoires pour favoriser la recherche fondamentale, il serait pertinent de lancer des appels à projets quantiques sur des marchés publics. À court terme, le secteur de la défense et du renseignement pourrait notamment être un commanditaire de premier plan. Les investissements des grands acteurs publics ou privés pourraient également être facilités, via une politique fiscale dédiée.

#### 4) Développer les compétences

Pour permettre le développement des technologies quantiques, des compétences nouvelles devront être déployées. Cela passe d'abord par la **formation d'ingénieurs, doctorants, professeurs et chercheurs**, qui doit être organisée et financée à l'échelle nationale et locale.

L'ensemble des volets devront être considérés, car la création de qubits performants n'est pas la seule course engagée. Au-delà de la recherche en physique, la recherche dans le domaine du logiciel devrait également être dynamisée, afin de préparer l'émergence des futurs développeurs et algorithmiciens, indispensables pour mobiliser cette nouvelle puissance.

#### 5) Développer la visibilité du quantique

Enfin de façon plus large, l'acculturation de la population en général, et des décideurs publics et privés en particulier, est essentielle. Car le simple terme « quantique » suffit souvent à provoquer des réactions de rejet en raison de l'apparence de complexité et d'incertitude du sujet.

Cela explique en grande partie la peine pour l'écosystème quantique à s'offrir une bonne visibilité auprès des industriels et du grand public. **Le plan national constitue une occasion exceptionnelle de mettre sur le devant de la scène ces technologies, en faisant montre de pédagogie, et en positionnant un leader légitime sur ce sujet.**

#### Pour le secteur privé

##### 1) Évaluer l'impact de l'informatique quantique sur son positionnement stratégique

Comme nous l'avons rapidement exposé dans la première partie de cette étude, les opportunités sont considérables, mais ne concernent que certains types de questions : en résumé, la simulation et l'optimisation de grands systèmes.

Il revient aux dirigeants et à leurs stratégies d'intégrer ce nouvel élément à leurs réflexions stratégiques : parmi mes produits et services, lesquels pourraient bénéficier de cette puissance de calcul décuplée ? De nouvelles offres ou un avantage concurrentiel majeur peuvent-ils émerger sur ces bases ?

##### 2) Évaluer la possibilité de réduire ses coûts

En miroir de cette réflexion visant le développement de l'entreprise, celle visant la réduction des coûts est également clé : quels sont les problèmes que nous n'avons pas traités jusqu'ici faute de puissance suffisante, mais qui deviennent possible dans l'ère quantique ?

Nous avons vu précédemment que de nombreuses questions d'optimisation pouvaient bénéficier de cette révolution : au cœur de l'activité du dirigeant, les décisions concernant l'allocation des ressources pourraient par exemple être éclairées par de nouveaux algorithmes.

#### 3) Commencer à expérimenter, pour comprendre

Pour supporter ces réflexions et plans d'actions, plusieurs moyens peuvent être mis en œuvre : simple veille technologique, formation des décideurs, partenariat ponctuel avec un acteur de la communauté quantique (constructeur, éditeur, université, startup, fonds d'investissement, cabinet de conseil, etc.) pour éclairer ou prototyper un cas d'usage spécifique à son business.

Toutes les tactiques classiques de mobilisation d'écosystème sont à mettre à profit : appel à projets, co-développement de solutions, financement de chaires d'enseignement, concours (comme celui déjà évoqué d'Airbus, par exemple). Une fois le potentiel confirmé, alors la structuration d'une équipe dédiée, pour agir vite et précisément, devient pertinente.

#### 4) Envoyer ses équipes de développement en éclaireurs

En parallèle, inciter ses équipes de développement à se familiariser avec les nouveaux paradigmes de l'informatique quantique semble un mouvement intéressant. Ils seront ainsi opérationnels le moment venu, mais ils pourraient également aider les décideurs à identifier des zones d'intérêt quantique majeur au sein de l'organisation.

Il n'est pas nécessaire pour cela de prévoir l'achat et l'installation d'un ordinateur quantique en propre pour ce faire. Le modèle de commercialisation QCaaS (*Quantum Computer as a Service*), basé sur les ressources disponibles dans le Cloud, permet ici de limiter l'investissement initial nécessaire.



# Conclusion

Au début du XX<sup>e</sup> siècle, l'avènement de la physique quantique a chamboulé définitivement la perception du monde, du moins pour les plus grands esprits de l'époque. Aride, complexe, souvent contre-intuitive, elle est en revanche restée obscure pour le commun des mortels.

Pourtant nous utilisons tous quotidiennement des produits qui n'auraient pu voir le jour sans cette nouvelle approche, et qui ont un impact considérable sur nos vies : semi-conducteurs (transistors, microprocesseurs, et donc l'informatique traditionnelle), cellules photoélectriques (photocopieurs, appareils photos numériques, panneaux solaires, etc.), lasers (clés pour la numérisation de l'audio et de la vidéo, mais aussi intensivement utilisés dans l'industrie), etc.

Notre conviction est que **l'informatique quantique porte en elle une révolution** similaire. Par le saut qualitatif immense qu'elle promet dans le traitement de problèmes qui sont au cœur de nos sociétés, elle devrait permettre **d'ouvrir de vastes champs d'études et d'optimisation aujourd'hui fermés faute de puissance de calcul suffisante**.

Ses possibles applications sont majeures, et touchent **tous les secteurs** : création de nouvelles molécules permettant de traiter encore plus de maladies, simulation de systèmes complexes à plusieurs millions de composants permettant de



Benoît DARDE, Partner Wavestone

piloter efficacement les *smart cities*, avènement de systèmes de communications impénétrables pour sécuriser les communications, etc.

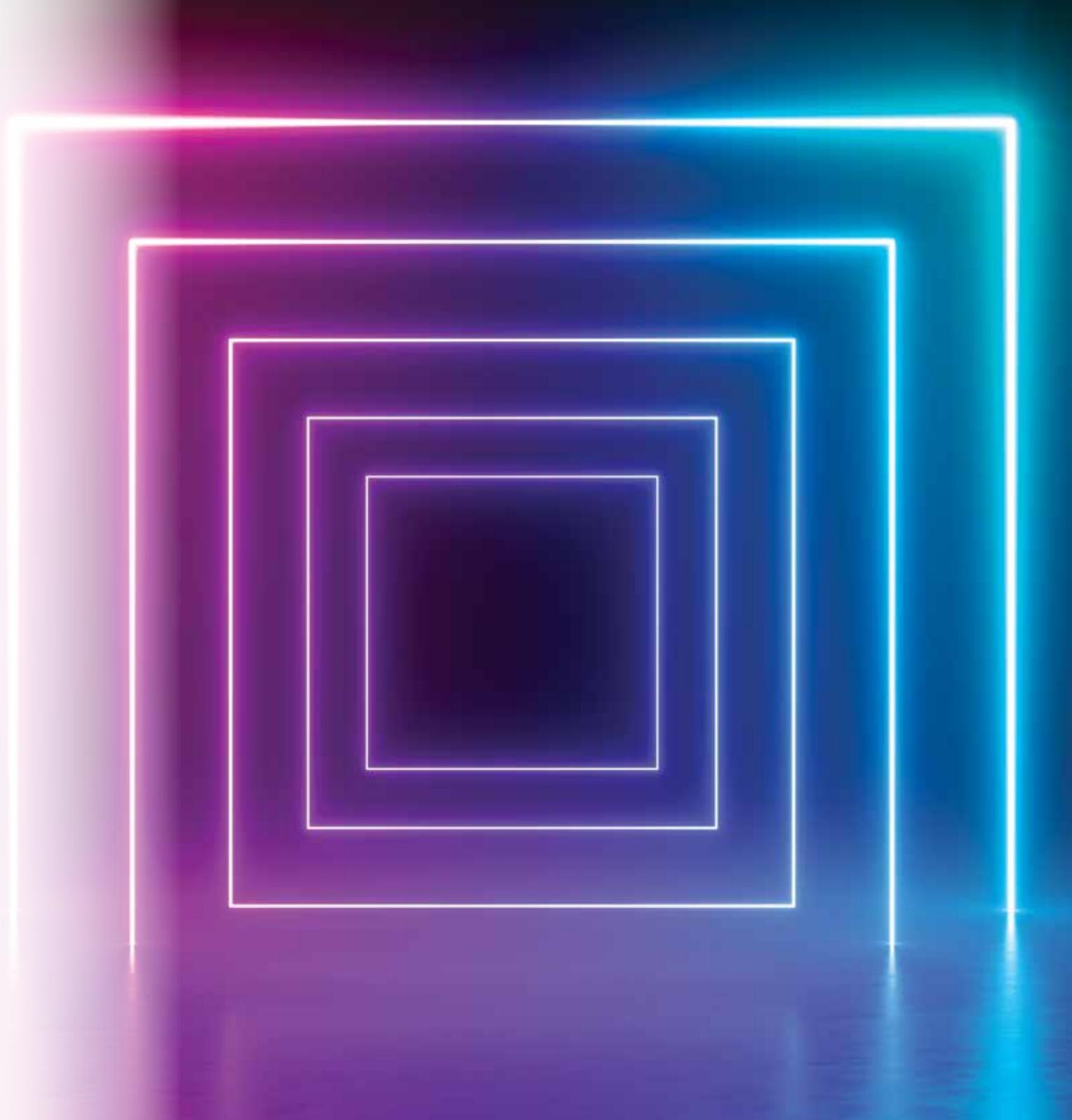
Aujourd'hui la compétition pour maîtriser cette technologie est mondiale, et l'Europe malgré ses premières actions peine à rester dans la course, face aux investissements colossaux des États-Unis et de la Chine notamment : **l'enjeu est pourtant majeur, celui de la souveraineté européenne** sur des sujets aussi essentiels que la R&D, la sécurisation des communications sensibles, ou plus simplement le maintien d'une productivité compétitive.

Au-delà des difficultés techniques à ne pas sous-estimer, mais qui devraient être progressivement levées dans les années à venir, deux freins nous semblent devoir être traités rapidement.

Le premier est lié à la difficulté à **faire émerger en Europe des écosystèmes compétitifs** par rapport à leurs homologues états-uniens ou chinois. Les clés sont connues : création d'une filière d'excellence, développement des partenariats entre recherche fondamentale et industrie, formation des compétences de demain, favorisation des financements, prise de risque. La puissance publique a ici un rôle de catalyseur fondamental.

Le second frein réside dans la **mobilité encore insuffisante de l'écosystème numérique**, sans doute liée à la maturité de la technologie. Mais dès lors qu'elle deviendra accessible, et ce temps ne semble plus si lointain, nous aurons besoin de toute la richesse et créativité des startups pour transformer la technologie en usages du quotidien.

Mais nous avons toutes les cartes en main pour **faire de l'Europe l'un des leaders de l'informatique quantique**. Alors ne nous laissons pas intimider, saisissons-nous dès maintenant du sujet, expérimentons, et **inventons le futur monde « quantique »** !



## AUTEURS



### Florian CARRIERE - Senior Manager

Florian est Senior Manager au sein de la practice Technologies Digitales et Émergentes. Depuis 20 ans il accompagne des DSI et des Directions Métiers dans leurs transformations majeures liées au déploiement des technologies numériques. Ces dernières années, il a piloté des projets majeurs sur le digital workplace et les smart territoires, en mobilisant les technologies innovantes (plateforme, RPA, chatbots, AR/VR, etc.) en s'appuyant sur des approches modernes (agile, UX design, lean startup).

[florian.carriere@wavestone.com](mailto:florian.carriere@wavestone.com)



### Robin GAYRARD - Manager

Robin est Manager au sein de la practice Technologies Émergentes, spécialisé sur les sujets Cloud et Digital Workplace. Diplômé de L'École Centrale Paris, il débute sa carrière à Paris dans les transformations Cloud et d'organisation des DSI au sein de Wavestone. Il rejoint ensuite le bureau Lyonnais où il accompagne depuis 3 ans les acteurs majeurs de la région Auvergne-Rhône-Alpes dans leur stratégie SI.

[robin.gayrard@wavestone.com](mailto:robin.gayrard@wavestone.com)



### Agathe RABAYROL - Policy Analyst France Digitale

Agathe Rabayrol est Policy Analyst à France Digitale, au sein du pôle d'Affaires Publiques. Elle se spécialise dans les deep techs et la data. Elle a collaboré avec [transport.data.gouv.fr](http://transport.data.gouv.fr) au sein de l'incubateur de politiques publiques de Sciences Po pour l'ouverture des données de transports au niveau local, et s'intéresse particulièrement aux questions d'inclusivité et de légitimité des politiques publiques numériques.

[agathe@francedigitale.org](mailto:agathe@francedigitale.org)



### Marianne TORDEUX - Directrice des Affaires publiques et européennes

Marianne est directrice des Affaires publiques et européennes chez France Digitale. Elle représente les intérêts des 1500 startups et 150 VC membres de France Digitale devant les institutions françaises et européennes sur toutes leurs problématiques (fiscalité, financement, statut des travailleurs des plateformes, IA, Blockchain, etc.). Avant de rejoindre France Digitale, Marianne était avocate fiscaliste et a notamment participé aux travaux de réglementation de la Blockchain en France.

[marianne@francedigitale.org](mailto:marianne@francedigitale.org)

## CONTRIBUTEURS

Cette publication a été réalisée avec l'aide de Jules Jaunay ([jules.jaunay@wavestone.com](mailto:jules.jaunay@wavestone.com)), consultant, et de Mélodie Lauque ([melodie.lauque@wavestone.com](mailto:melodie.lauque@wavestone.com)), service communication Wavestone.

## Remerciements

### Entretiens :

Cyril ALLOUCHE, Atos

Marianne BILLARD, Collaboratrice parlementaire

Oscar DIEZ, Commission Européenne

Sébastien GARCIA, Collège de France

Alexis DU PELOUX, XAnge

Olivier EZRATTY, Consultant et auteur,

Paula FORTEZA, Députée

Jean-Christophe GOUGEON, BPI

Olivier HESS, IBM

Elham KASHEFI, CNRS et VeriQloud

Pascal MAILLOT, Commission Européenne

Bernard OURGHANLIAN, Microsoft

Georges-Olivier REYMOND, Pasqal

Kristjan SIGURDSON, Creative Destruction Lab

Olivier TONNEAU, Quantonation

Christian TREFZGER, Commission Européenne

Nos remerciements à Olivier Ezratty et Olivier Tonneau pour leurs relectures attentives.

### Pour aller plus loin :

IMT (2019) - « L'avantage quantique : enjeux industriels et de formation »

CNRS (2019) - Les promesses de l'aube quantique

Ezratty, O. (2019) - Comprendre l'informatique quantique.

University of Maryland (2019) - Machine Learning meets quantum physics

CEA (2018) - L'ordinateur quantique, graal du numérique

BCG (2018) - The Next Decade in Quantum Computing

D-Wave (2018) - Introduction to Quantum Computing

University of Innsbruck (2017) - Machine learning & artificial intelligence in the quantum domain

UE (2016) - Quantum Manifesto

