



**OPIIEC**

Observatoire des métiers du Numérique,  
de l'Ingénierie, du Conseil et de l'Évènement

# RAPPORT D'ÉTUDE

## Les besoins en compétences, emploi et formation relatifs aux technologies quantiques

#quantique

#quantum

#emploi

#compétence

#formation

## **SOMMAIRE**

- 1. OBJECTIFS ET METHODE**
  - 2. LES TECHNOLOGIES QUANTIQUES**
  - 3. L'ÉCOSYSTEME DES TECHNOLOGIES QUANTIQUES**
  - 4. LA PLACE DE LA FRANCE DANS L'ÉCOSYSTÈME QUANTIQUE INTERNATIONAL**
  - 5. L'IMPACT DES TECHNOLOGIES QUANTIQUES SUR LES ACTIVITÉS, LES MÉTIERS ET LES COMPÉTENCES DE LA BRANCHE DES BUREAUX D'ÉTUDES**
  - 6. L'OFFRE DE FORMATION SUR LES TECHNOLOGIES QUANTIQUES**
  - 7. CONCLUSIONS, ENJEUX POUR LA BRANCHE ET PISTES D'ACTION**
- Annexes**

# 1.

## **OBJECTIFS ET METHODE**

# LES OBJECTIFS DE L'ETUDE

La rupture technologique d'ampleur que promettent les technologies quantiques d'ici 5 à 10 ans fait du soutien à ce secteur un impératif économique et souverain. Les promesses de ces technologies sont nombreuses : ordinateurs quantiques un milliard de fois plus rapides permettant notamment des outils de simulation et d'optimisation sans précédent pour la chimie, la santé, l'énergie ou encore les transports - capteurs quantiques permettant une navigation sans infrastructure ou des facultés de détection inédites - communications infalsifiables et impossibles à intercepter, etc.

La France possède les atouts nécessaires pour s'imposer comme un compétiteur scientifique et industriel majeur dans les technologies quantiques, notamment grâce au positionnement historique de sa recherche, de ses industriels précurseurs et du dynamisme de ses start-ups. La stratégie d'accélération dans ce secteur d'avenir a été présentée en détail le 21 janvier 2021 par le Président de la République qui a pour ambition de placer la France parmi les premiers pays à maîtriser les technologies quantiques et de bâtir une nouvelle filière industrielle.

Afin d'accompagner cette stratégie, il est nécessaire d'identifier les impacts des technologies quantiques sur les métiers du numérique. À l'approche de cette révolution, la formation est plus que jamais sur le devant de la scène : il est donc capital de pouvoir identifier les connaissances et de répondre aux besoins en compétences nécessaires à leur développement.

## 4 OBJECTIFS

- Évaluer la maturité de la France en tant que producteur et consommateur de technologies quantiques
- Évaluer l'impact des technologies quantiques sur les métiers et compétences de la branche et analyser les besoins actuels et prévisionnels qui en découlent
- Diagnostiquer l'offre de formation existante
- Identifier des pistes d'action susceptibles de répondre aux besoins identifiés et élaborer des plans d'action

# LA MÉTHODE

## Les grandes étapes

## Les points clés de la méthode

### PHASE 1 : ÉVALUATION DE LA MATURITÉ TECHNOLOGIQUE DE LA FRANCE

#### Étape 1.1

Présentation des technologies quantiques (acteurs, technologies, domaines d'application...)

- Analyse documentaire
- Plus de 10 entretiens avec des experts et acteurs du secteur

#### Étape 1.2

Réalisation d'un benchmark international des pays impliqués dans les technologies quantiques

- Analyse documentaire
- Plus de 10 entretiens avec des experts et acteurs du secteur

#### Étape 1.3

Réalisation d'un état des lieux de la filière des technologies quantiques en France (écosystème, emplois, métiers, perspectives d'évolution...)

- Analyse documentaire
- Plus de 20 entretiens avec des experts et acteurs du secteur
- Enquête auprès des acteurs identifiés du secteur

### PHASE 2 : ÉVALUATION DE L'IMPACT SUR LES MÉTIERS ET OFFRE DE FORMATION

#### Étape 2.1

Évaluation de l'impact des technologies quantiques sur les métiers et les compétences de la branche

- Enquête auprès des acteurs identifiés du secteur
- Environ 10 entretiens auprès d'entreprises productrices et exploitantes de technologies quantiques

#### Étape 2.2

Analyse des besoins actuels et prévisionnels qui en découlent

- Enquête auprès des acteurs identifiés du secteur et traitement des résultats de l'enquête sur les projections.
- Environ 10 entretiens auprès d'entreprises productrices et exploitantes de technologies quantiques

#### Étape 2.3

Recensement et analyse de l'offre de formation initiale et continue

- Analyse documentaire
- 4 entretiens auprès d'organismes de formation
- Cartographie de l'offre de formation

### PHASE 3 : PROPOSITION DE PISTES D'ACTION

#### Étape 3.1.

Analyse internationale de l'offre de formation

- Analyse documentaire
- 4 entretiens auprès d'organismes de formation

#### Étape 3.2.

Identification de pistes d'action susceptibles de répondre aux besoins identifiés et élaboration de plans d'action

- 1 groupe de travail pour élaborer des pistes d'actions

Dans le cadre de l'ensemble de l'étude, ont été interrogés (Entretiens et Enquête) :

Entreprises (entretiens)	Entreprises (enquête)	Organismes de formation (entretiens)
Capgemini	C12 Quantum Electronics	ARTEQ
Orange	Cailabs	EPITA
Thalès	CEA – Bruyères Le Chatel	ENSTA Bretagne
IBM	CEA – Grenoble	Université de Tours
INRIA	ColibriTD	
Systematic / ATOS	Cryoconcept	
CEA	ONERA	
Systematic	OVHcloud	
Quantonation	Paris Center for Quantum Computing	
C12 Quantum Electronics	Qbitsoft	
Atos (Eviden)	Quobly (anciennement Siquance)	
BPI France	Slient Waves	
Genci	Weling	
CryptoNext	Chipiron	
QbitSoft	Cryoconcept	
Weling	EDF	
Multiverse computing SAS	Multiverse Computing	
Pasqal	Quantum Risk Advisory	
Quandela	Air Liquide	
Alice & Bob	Le Lab Quantique	
IQM		
QuantiFi		
Minalogic		
Qubit Pharmaceuticals		
ColibriTD		

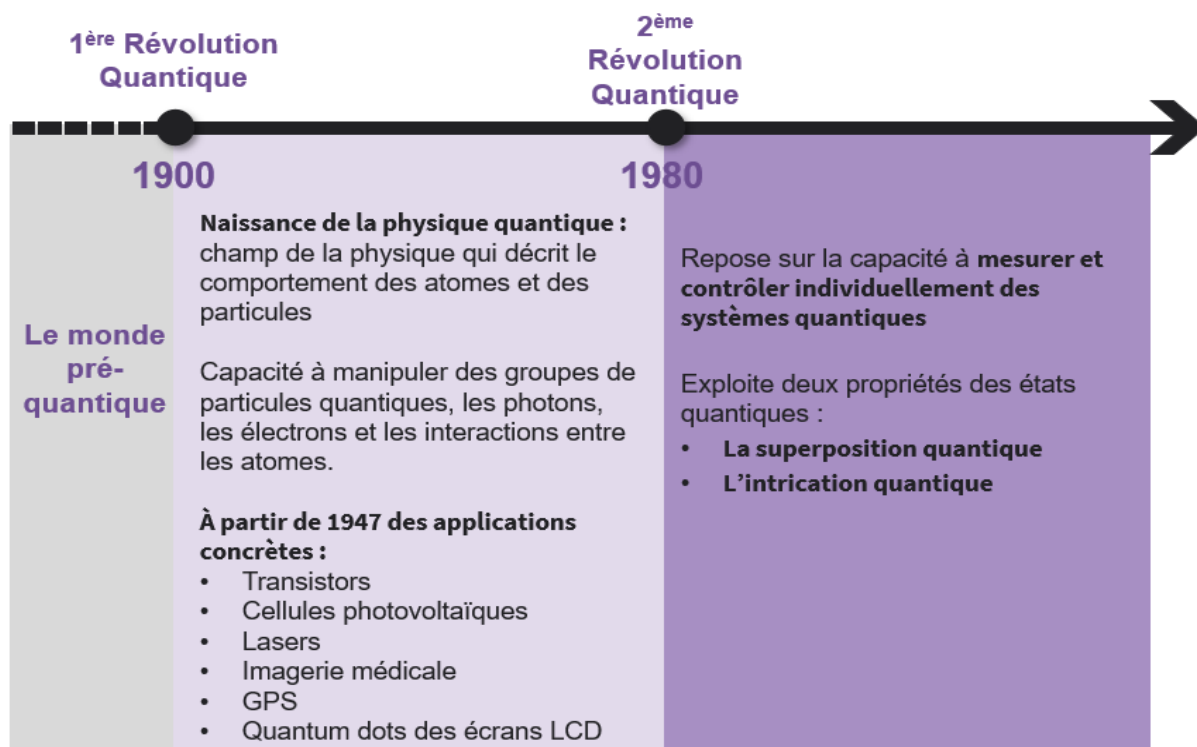
# 2.

## LES TECHNOLOGIES QUANTIQUES

# QUANTIQUE ET TECHNOLOGIES QUANTIQUES : DE QUOI PARLE-T-ON ?

## Il était deux fois la Révolution quantique

Alors qu'il est communément question d'une révolution quantique, il existe en réalité deux révolutions. Toutes deux sont liées à d'importantes avancées scientifiques.



**Figure 1 : Les deux révolutions quantiques**

Source : KYU Associés et Olivier Ezraty

Au début du 20<sup>e</sup> siècle, la naissance de la physique quantique marque le début de la 1<sup>re</sup> révolution quantique. Ce nouveau domaine de la physique théorise et étudie le comportement des objets physiques à l'échelle atomique et subatomique. La physique quantique a permis d'identifier plusieurs principes et propriétés des atomes et particules en particulier la superposition quantique, l'intrication quantique, la dualité onde-particule et l'interférence quantique.

Ces avancées scientifiques ouvrent la possibilité de manipuler les groupes de particules quantiques, les photons, les électrons ainsi que les interactions entre les atomes. Elle permet le développement d'applications concrètes aujourd'hui présentes dans de nombreux objets courants liés à l'électronique, l'informatique et les télécommunications :

- Les transistors, inventés en 1947, sont à la base de toute l'électronique et de l'informatique d'aujourd'hui ;
- Les cellules photovoltaïques ;
- Les lasers, qui exploitent l'interaction lumière particule ;
- L'imagerie médicale ;
- Les GPS, qui s'appuient sur des horloges atomiques ;
- Les quantum dots des écrans LCD.

À partir de **1980**, des expérimentations (notamment celle d'Alain Aspect en 1982) démontrent la possibilité de manipuler et contrôler individuellement des systèmes quantiques (ensemble des systèmes physiques qui obéissent aux lois de la physique quantique, ex : électrons, photons...), c'est la **2<sup>e</sup> révolution**



**quantique.** C'est également à partir de cette date que les premières idées de créations d'ordinateurs quantiques émergent (Benioff, Manin, Feynman). Cette nouvelle avancée scientifique est rendue possible grâce à la mobilisation de technologies issues de la 1<sup>re</sup> révolution quantique (lasers, matériaux supraconducteurs...). Cela permet alors d'exploiter deux grands principes de la physique quantique : la superposition quantique et l'intrication quantique.

La **2<sup>e</sup> révolution quantique** s'appuie ainsi sur de nouvelles capacités de contrôle et de mesure des systèmes quantiques permettant **d'exploiter certains principes de la physique quantique identifiés lors de la 1<sup>re</sup> révolution quantique.** Il est à noter que le terme de seconde révolution quantique a été simultanément créé en 2003 par Alain Aspect, Jonathan Dowling et Gérard Milburn.

*Le périmètre de cette étude est celui des technologies issues de la deuxième révolution quantique c'est-à-dire l'ensemble des technologies qui reposent sur les principes suivants :*



- La capacité à **contrôler et mesurer individuellement des systèmes quantiques** ;
- **La superposition quantique** : en mécanique quantique, un même état quantique peut posséder plusieurs valeurs pour une certaine quantité observable ;
- **L'intrication quantique** : phénomène par lequel deux particules forment un système lié, et présentent des états quantiques dépendants l'un de l'autre, quelle que soit la distance qui les sépare.

# Quelles technologies quantiques pour quelles applications ?

S'il est beaucoup question de l'ordinateur quantique, il existe en réalité plusieurs technologies quantiques réparties en trois grands domaines technologiques.



Figure 2 : les trois grands domaines des technologies quantiques

Source : KYU Associés et Olivier Ezratty



## L'informatique quantique

L'informatique quantique utilise des propriétés de la physique quantique pour résoudre des problèmes complexes que des ordinateurs classiques ne pourraient résoudre dans un délai acceptable. On distingue au sein de l'informatique quantique : les ordinateurs quantiques et les simulateurs quantiques.

- Les ordinateurs quantiques

Les ordinateurs quantiques reposent sur l'utilisation de qubits et de portes quantiques. En utilisant les propriétés physiques des qubits et des portes quantiques, l'ordinateur quantique permet de traiter un nombre important de combinaisons afin d'en faire ressortir la meilleure dans un temps théoriquement meilleur qu'avec des ordinateurs classiques.

Le fonctionnement des ordinateurs quantiques repose sur un ordinateur classique pour le contrôle et la lecture et l'exploitation des résultats. Les ordinateurs quantiques sont donc complémentaires aux ordinateurs classiques.

Les ordinateurs quantiques exploitent des bits quantiques ou des qubits. Alors qu'en informatique classique, les données sont représentées par des bits, qui peuvent prendre une valeur de 0 ou de 1, les qubits peuvent prendre deux états simultanés. Ils peuvent ainsi prendre la valeur 0 et la valeur 1 en même temps.

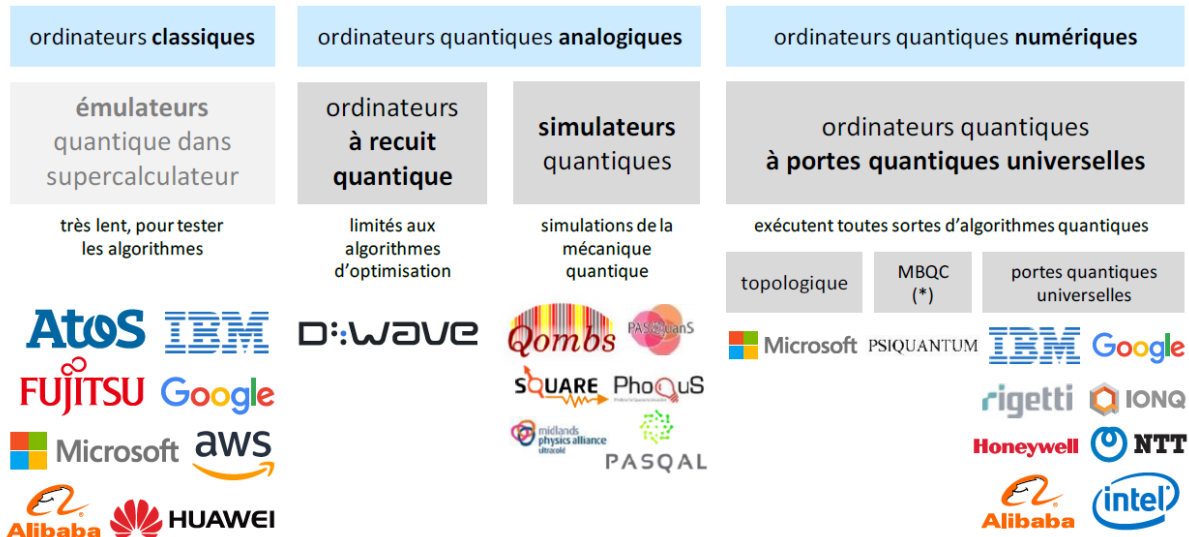


Les qubits peuvent également se combiner par ce que l'on appelle des portes quantiques (via l'intrication). Les portes quantiques sont des dispositifs permettant de réaliser des opérations sur les qubits et de manipuler et transformer leur état. Elles sont l'équivalent des portes logiques utilisées dans les circuits classiques.

Il existe trois grandes catégories d'ordinateurs quantiques : les ordinateurs classiques, les ordinateurs quantiques analogiques et les ordinateurs quantiques numériques. Toutefois, quatre types d'ordinateurs peuvent être distingués :

- Les émulateurs quantiques, qui sont utilisés pour réaliser des simulations de l'exécution d'algorithmes quantiques dans des ordinateurs traditionnels.
- Les ordinateurs quantiques à recuit simulé, comme ceux produits par D-Wave. Ils sont adaptés à l'exécution d'une partie seulement des algorithmes quantiques connus.

- **Les simulateurs quantiques analogiques**, qui servent de simulateurs de phénomènes quantiques. Ils fonctionnent de manière analogique et non numérique, à savoir que les paramètres reliant les qubits entre eux sont continus.
- **Les ordinateurs quantiques universels**, qui utilisent des qubits avec des portes quantiques capables d'exécuter tous les algorithmes quantiques et avec un gain de vitesse optimum par rapport aux supercalculateurs. Ils sont pour l'instant limités à une cinquantaine de qubits.

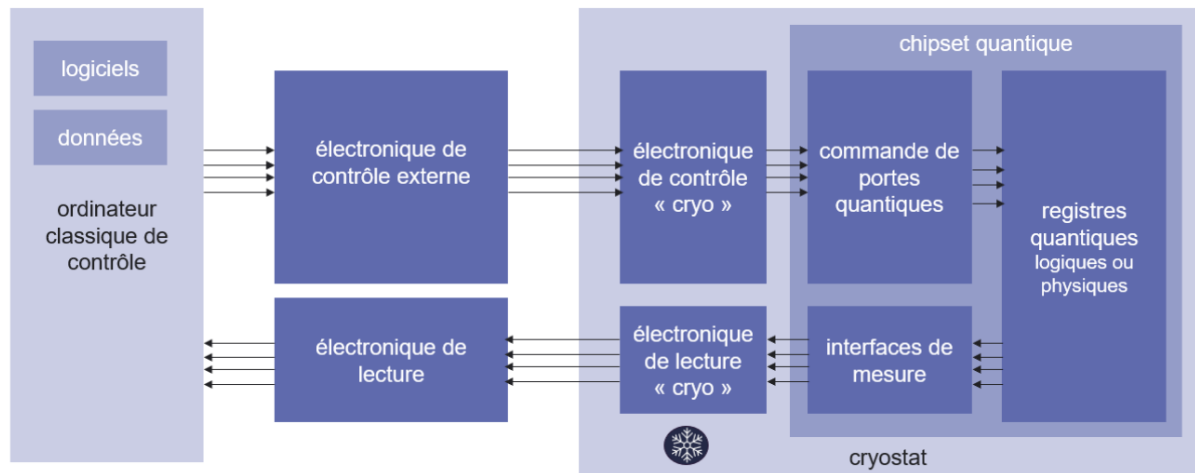


**Figure 3 : les grands types d'ordinateurs quantiques**  
Source : KYU Associés et Olivier Ezratty

#### Le schéma ci-dessous (figure 4) décrit l'architecture générale d'un ordinateur quantique.

Tout d'abord, les ordinateurs quantiques sont mis en œuvre comme des **coprocesseurs d'ordinateurs traditionnels** qui les alimentent. Ces ordinateurs classiques servent à exécuter les programmes destinés au processeur quantique pour les traduire en opérations physiques à réaliser sur les qubits et à en interpréter les résultats. L'ordinateur traditionnel pilote de près le fonctionnement de l'ordinateur quantique en déclenchant à un rythme précis les opérations sur les qubits qui sont réalisées par les portes quantiques. Ce déclenchement tient compte du temps d'exécution des portes quantiques et du temps de cohérence connu des qubits (le temps pendant lequel les qubits restent en état de superposition). En plus de son ordinateur classique de contrôle, l'ordinateur quantique comprend au minimum les composants suivants :

- **Les registres quantiques, qui sont des collections de qubits.** Ils stockent l'information manipulée dans l'ordinateur et exploitent le principe de superposition permettant de faire cohabiter un grand nombre de valeurs dans ces registres et d'opérer des opérations dessus simultanément.
- **Les commandes de portes quantiques,** qui sont des dispositifs physiques agissant sur les qubits des registres quantiques, à la fois pour les initialiser et pour y effectuer des opérations de calcul.
- **Des dispositifs physiques de mesure de l'état des qubits,** qui permettent d'obtenir le résultat des calculs à la fin du processus d'exécution séquentielle des portes quantiques.
- **Le chipset quantique,** qui comprend les registres quantiques, les portes quantiques et les dispositifs de mesure lorsqu'il s'agit de qubits à supraconducteurs ou à quantum dots.
- **Les qubits logiques,** qui regroupent des qubits physiques pour permettre une mise en œuvre de correction d'erreurs à l'échelle physique de l'ordinateur.
- **Une enceinte cryogénisée,** qui maintient généralement l'intérieur de l'ordinateur à une température voisine du zéro absolu. Elle contient une partie de l'électronique de commande et le ou les chipsets quantiques pour éviter de générer des perturbations empêchant les qubits de fonctionner, notamment au niveau de leur intrication et de leur cohérence ainsi que pour réduire le bruit de leur fonctionnement.
- **L'électronique de contrôle, dans l'enceinte du cryostat.** L'électronique de commande des qubits pilote les dispositifs physiques qui servent à initialiser, modifier et lire l'état des qubits.

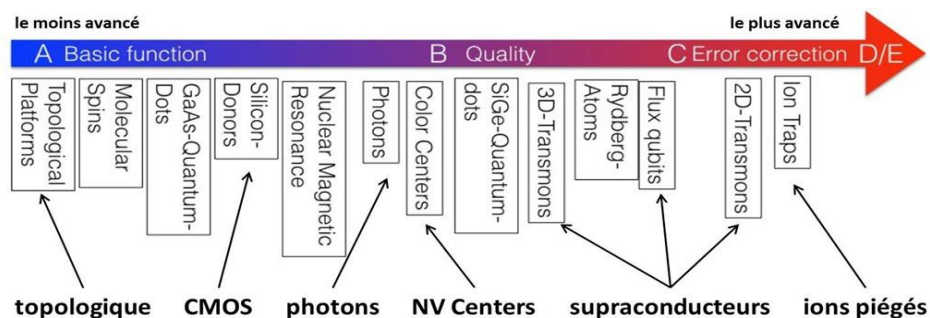


**Figure 4 : Modèle de fonctionnement de l'ordinateur quantique**

Source : KYU Associés et Olivier Ezratty

Les ordinateurs quantiques expérimentent **un large spectre de technologies** qui sont aujourd'hui **concurrentes les unes avec les autres**. Les supraconducteurs et les ions piégés sont les technologies les plus matures et les plus utilisées à ce jour sans qu'une technologie se soit imposée face aux autres. Le schéma ci-dessous décrit les différents types de qubits utilisés par les ordinateurs quantiques :

- **Les supraconducteurs** prennent la forme de l'état d'un courant supraconducteur qui traverse une barrière très fine.
- **Les spins d'électrons** sont une sorte de polarisation magnétique, que l'on retrouve dans les ordinateurs à base de quantum dots (particules semi-conductrices, ex : zinc, sélénium...).
- **Les centres NV** sont des structures de diamant artificiel dans lesquelles un atome de carbone a été remplacé par un atome d'azote.
- **Les ions piégés** sont des ions d'atomes maintenus sous vide et suspendus par suspension électrostatique. Un laser sert à la mesure et exploite le phénomène de fluorescence des ions excités par le laser.
- **Les atomes froids** sont des atomes refroidis à très basse température.
- **Les photons** sont des particules élémentaires médiatrices de l'interaction électromagnétique.



source : Entwicklungsstand Quantencomputer 2018 (231 pages)

**Figure 5 : Technologies utilisées dans les ordinateurs quantiques**

Source : Olivier Ezratty

Cependant, **un des freins principaux au développement de l'informatique quantique est aujourd'hui l'instabilité des phénomènes exploités**. Les qubits utilisés par les ordinateurs quantiques sont extrêmement sensibles aux interactions avec leur environnement (« le bruit ») et tendent à perdre rapidement leurs propriétés. C'est ce qu'on appelle la « décohérence quantique ». Ce phénomène peut engendrer des erreurs de calcul et limiter la durée de vie des qubits. (cf. « *Des technologies pas encore matures sur le plan scientifique et applicatif* »).

- *Les simulateurs quantiques*

Les simulateurs quantiques sont des systèmes quantiques permettent de simuler certains problèmes quantiques. Ils sont conçus pour étudier un sujet spécifique. Le domaine de la simulation quantique est aujourd'hui en plein essor, et ouvre la voie à des applications en **chimie quantique, en physique des matériaux**, mais aussi par exemple pour résoudre des problèmes **d'optimisation combinatoire**, qui apparaissent dans de très nombreux domaines.



### Les capteurs quantiques et la métrologie

Les capteurs quantiques sont des **instruments de mesure extrêmement précis** exploitant les lois de la physique quantique. Ils reposent sur la **manipulation parfaite d'objets microscopiques** (photons, atomes, électrons), sensibles à la moindre perturbation de l'environnement. L'origine des capteurs quantiques remonte aux années 1950 avec l'apparition des premières horloges atomiques, qui permettent de garder synchrones l'ensemble des échelles de temps réalisées dans le monde.

Du développement des horloges atomiques a découlé de nombreuses applications dans les domaines des **télécommunications, des transports, de la certification de transactions et des systèmes de positionnement par satellite**. Par ailleurs, de nouveaux types de capteurs sont aussi issus de ces premières horloges : les **capteurs à atomes froids, ou interféromètres**. Leurs applications sont multiples à l'instar des gravimètres (mesurant la gravité) permettant de prévoir les séismes ou prospector les sous-sols. Certains sont d'ailleurs déjà commercialisés par la société française Muquans.

### Muquans lance le premier gravimètre quantique

*Ce gravimètre quantique permet de mesurer avec une grande précision l'accélération de la pesanteur et d'évaluer ainsi les variations de masses sous la surface du sol. Les premiers résultats obtenus ouvrent de larges perspectives pour des applications scientifiques ou industrielles, en particulier dans le domaine de la géophysique, pour l'étude de la structure interne du globe et des ressources naturelles, pour la surveillance de réservoirs ou encore en métrologie.*

Source : Muquans, 2019



### Les communications quantiques et la cryptographie

- *Les communications quantiques*

Les **communications quantiques** sont des technologies permettant de transférer des informations quantiques sur des longues distances et de connecter des dispositifs quantiques entre eux. Elles reposent sur les réseaux quantiques qui permettent de générer, véhiculer, stocker et synchroniser l'information quantique entre des sites distants, au même titre que ce qu'il se fait quotidiennement dans nos réseaux classiques. Ces réseaux quantiques sont un ensemble de nœuds de communication qui assurent la transmission des bits quantiques. Dans les réseaux de communication quantique, l'information peut être transmise grâce à la téléportation quantique ou en faisant voyager des photons en espace libre ou par fibre optique. Ces réseaux mobilisent des répéteurs quantiques permettant d'augmenter les distances sur lesquelles l'information est transmise.

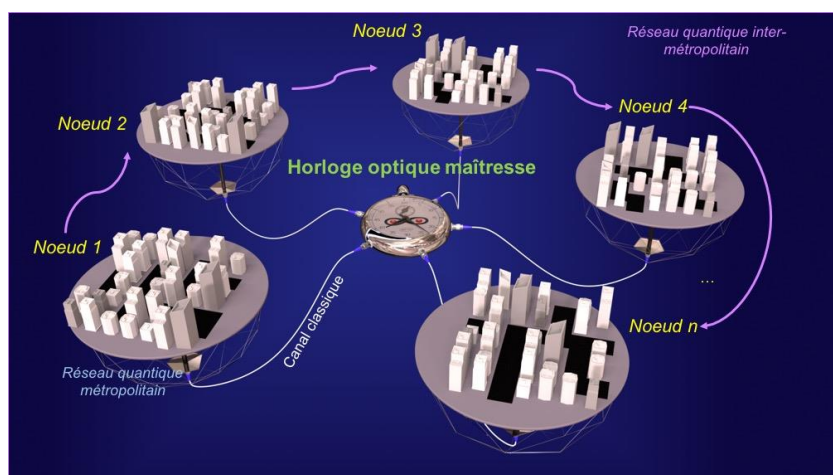
### Le CNRS synchronise les éléments d'un réseau de communication quantique façon « plug&play »

*Grâce à l'utilisation d'une horloge optique délivrée par un laser issu des technologies standards des télécommunications, des chercheurs ont mis au point une solution simple et universelle pour la synchronisation des nœuds des futurs réseaux quantiques de communication.*

*Les impulsions d'une horloge maîtresse sont distribuées en parallèle aux différents nœuds du réseau quantique via des canaux optiques. À chaque nœud, les impulsions d'horloge sont mises en forme afin d'alimenter directement les dispositifs quantiques.*

Source : CNRS, 2020

Les solutions développées permettent déjà de transmettre des messages, mais pas d'encoder des communications à grande échelle, car le débit de transmission de qubits sécurisés reste encore faible. Par ailleurs, en l'absence de relais et de répéteurs sécurisés, leur **système ne peut aujourd'hui fonctionner que sur des distances limitées à quelques centaines de kilomètres**. Les chercheurs travaillent actuellement à la construction de réseaux quantiques.



**Figure 6 : Modèle de réseau de communication quantique**

Source : CNRS

- *La cryptographie quantique*

La **cryptographie quantique** repose sur la transmission de qubits générés aléatoirement qui assure **l'inviolabilité des échanges en toutes circonstances**. Ces qubits **constituent des clés**, qui sont ensuite utilisées dans des protocoles de chiffrement classiques. Dans la mesure où il est impossible de cloner une information quantique sans qu'elle soit détruite, ou de mesurer un état quantique sans le modifier, la lecture de l'information par un intrus serait immédiatement détectée par les destinataires du message.

- *La cryptographie post-quantique*

La cryptographie post-quantique vise à créer des méthodes de cryptographie résistantes aux calculateurs quantiques à même de « craquer » les clés de cryptage actuellement utilisées. La cryptographie est une technologie à fort enjeu, car la sécurisation des données intervient à chaque instant dans de très nombreux domaines de la vie privée ou publique. Elle représente également un enjeu stratégique pour les entreprises, les grands groupes industriels ou les états.

La cryptographie post-quantique, malgré son nom, n'a pas besoin d'ordinateurs quantiques pour fonctionner. Ces solutions sont actuellement développées par des entreprises telles que CryptoNext Security.

**La France transmet son premier message diplomatique en cryptographie post-quantique**

*Le message diffusé le 30 novembre 2022 a permis de transmettre le mémorandum signé ce même jour entre le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et l'Office of Science and Technology Policy des États-Unis. Pour cette expérimentation, la France s'est appuyée sur les travaux de la start-up CryptoNext Security, entreprise issue des travaux de recherche de l'INIRIA, du CNRS et de la Sorbonne.*

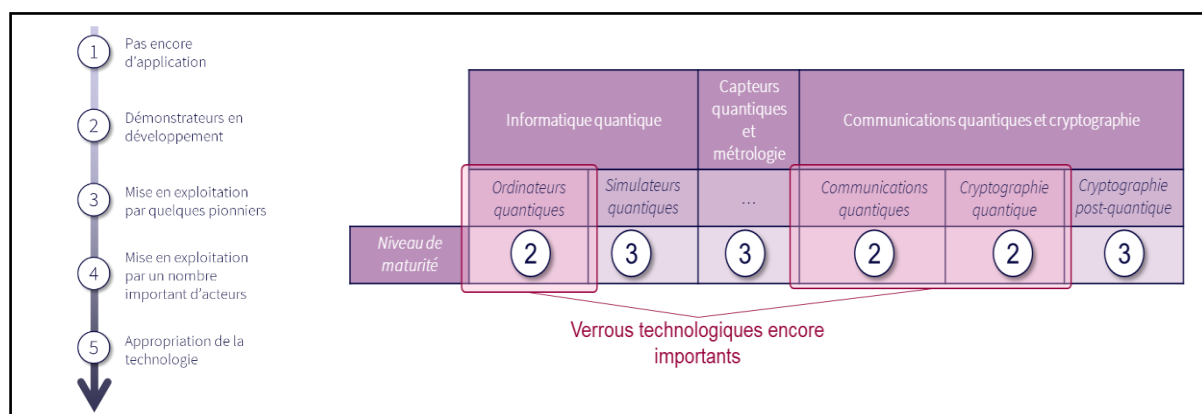
Source : France diplomatie, 2022

# Des technologies qui ne sont pas encore matures sur le plan scientifique et applicatif

Les technologies quantiques, et particulièrement, l'ordinateur quantique, sont confrontées à des barrières qui ne sont pas encore levées.

Les technologies quantiques n'ont pas toutes le même niveau de maturité scientifique et applicatif.

- **Les technologies des simulateurs quantiques, des capteurs quantiques et de la cryptographie post-quantiques** ne reposent pas sur des équipements fonctionnant à partir des fameux qubits. Ils s'appuient sur des équipements et des connaissances déjà maîtrisées. De ce fait, ces technologies sont d'ores et déjà mises en exploitation chez certains pionniers (niveau 3 de maturité).
- **Les ordinateurs quantiques, communications quantiques et cryptographies quantiques** reposent sur des équipements où les qubits jouent un rôle primordial. De ce fait, ces technologies sont confrontées à d'importants verrous scientifiques et demeurent au stade de démonstrateurs en développement (niveau 2 de maturité).



**Figure 7 : Niveau de maturité des technologies quantiques**  
(échelle de maturité à gauche)  
Source : KYU Associés

## L'ordinateur quantique – à la recherche de l'avantage quantique

L'avantage quantique désigne le moment où un ordinateur quantique est en mesure de faire aussi bien ou mieux que les supercalculateurs actuels (en termes de temps de calcul, de consommation énergétique, de qualité des résultats ou encore de coût financier). Les ordinateurs quantiques visent en effet à répondre aux limites des ordinateurs « classiques ». Ceux-ci sont confrontés à la fin probable de la loi de Moore dans les années qui viennent et à leur impossibilité à réaliser des calculs très complexes dans un temps acceptable à l'échelle humaine et industrielle. En utilisant les propriétés physiques des qubits (superposition des états quantiques), l'ordinateur quantique permet de traiter un nombre important de combinaisons afin d'en faire ressortir la meilleure dans un temps théoriquement acceptable. **L'ordinateur quantique vise à résoudre certains types de problèmes plus rapidement que les ordinateurs classiques.**

Toutefois, malgré la communication de certains constructeurs affirmant avoir atteint l'avantage ou la suprématie quantique, **des verrous demeurent avant de pouvoir atteindre effectivement cet avantage.**

- Des verrous et freins technologiques
  - **Le taux d'erreur des opérations sur les qubits** : les qubits étant très sensibles aux perturbations de leur environnement (changement de température ou de pression...), ils peuvent perdre leurs propriétés d'intrication et de superposition quantique au cours du calcul. Cela limite le nombre d'opérations possibles et augmente le risque et le nombre d'erreurs au cours du calcul.
  - **Le nombre limité de qubits** : le nombre de qubits conditionne la puissance de calcul des machines quantiques. Aujourd'hui, la plupart des calculateurs développés dépassent rarement les 50 qubits physiques opérationnels de qualité. Cela étant, le nouveau processeur quantique « Osprey » développé par IBM possède 433 qubits, soit le triple de la version Eagle produite par IBM en 2021. IBM promet une montée en puissance au-delà de 1000 qubits dès 2024 pour développer des systèmes de plusieurs dizaines de milliers de qubits à partir de 2026.
  - **D'autres paramètres clés** : la connectivité entre les qubits (qui conditionne la rapidité d'exécution des algorithmes quantiques), la fidélité des qubits (qui conditionne la capacité à enchaîner de nombreuses étapes de calcul), la température de fonctionnement des processeurs et de leur appareillage (qui conditionne la cohérence des qubits), la consommation totale d'énergie...

**Plus de 1 chance  
sur 1 000**

*Le taux d'erreur sur une opération sur les ordinateurs quantiques les plus stables (un taux nettement plus élevé par rapport au taux d'erreur sur des ordinateurs classiques).*

**4M de qubits physiques et  
4 jours de traitement**

*Les ressources nécessaires pour simuler l'état fondamental des modèles d'espace actif de l'enzyme FeMoco, une étude de cas classique de la littérature sur les technologies quantiques.*

*Source : Olivier Ezratty, 2023.*

- Des cas d'usage encore difficiles à identifier
  - **Un besoin de problèmes spécifiques** : plusieurs personnes interrogées lors de cette étude ont souligné la difficulté à identifier des problèmes suffisamment complexes et spécifiques auxquels pourraient répondre particulièrement bien les ordinateurs quantiques.
  - **Une compétition avec l'informatique classique** : même si les perspectives d'accroissement de la performance des calculateurs classiques risquent d'être limitées de nombreux problèmes complexes peuvent être traités avec des ordinateurs classiques en adaptant et en optimisant les algorithmes mobilisés rendant inutile l'utilisation d'un ordinateur quantique.

## Des promesses, mais des échéances encore floues

**La prospective dans l'informatique quantique est un art difficile et les avis divergent entre les optimistes et les pessimistes :**

- **Les optimistes** : certains experts optimistes s'accordent à dire que les start-ups spécialisées dans le domaine seront en mesure de fournir des solutions à grande échelle dans les cinq prochaines années. Pour Alain Aspect, il n'y aurait pas d'obstacle scientifique à la création d'ordinateurs quantiques fiables. Il pense que l'incertitude est uniquement une question technologique et d'ingénierie, mais qu'il faudra quelques décennies pour la lever. Les optimistes comprennent aussi les nombreuses start-ups qui se lancent dans le calcul quantique au niveau matériel et présentent tous des solutions qui devraient fonctionner à grande échelle selon eux d'ici cinq ans.
- **Les pessimistes** : cependant, d'autres experts adoptent une perspective plus pessimiste et remettent en question notre capacité à contrôler le niveau d'erreur affectant les qubits avant longtemps. De nombreuses avancées technologiques doivent encore être réalisées pour rendre le fonctionnement des ordinateurs quantiques possible. Cela inclut par exemple la maîtrise de la correction des erreurs, la mise en œuvre de la cryogénie à grande échelle, le développement d'algorithmes et de logiciels permettant d'exploiter pleinement les capacités du matériel quantique.

**Aujourd'hui, malgré les avancées technologiques certaines (augmentation du nombre et de la qualité de qubits) et les communications de certaines entreprises, aucune étude de cas présentant un avantage quantique n'a été identifiée.** Chaque étude de cas publiée doit en effet être analysée à partir de différents



critères permettant d'évaluer si l'informatique quantique a un avantage par rapport à l'informatique classique (cf. schéma ci-dessous, figure 8).

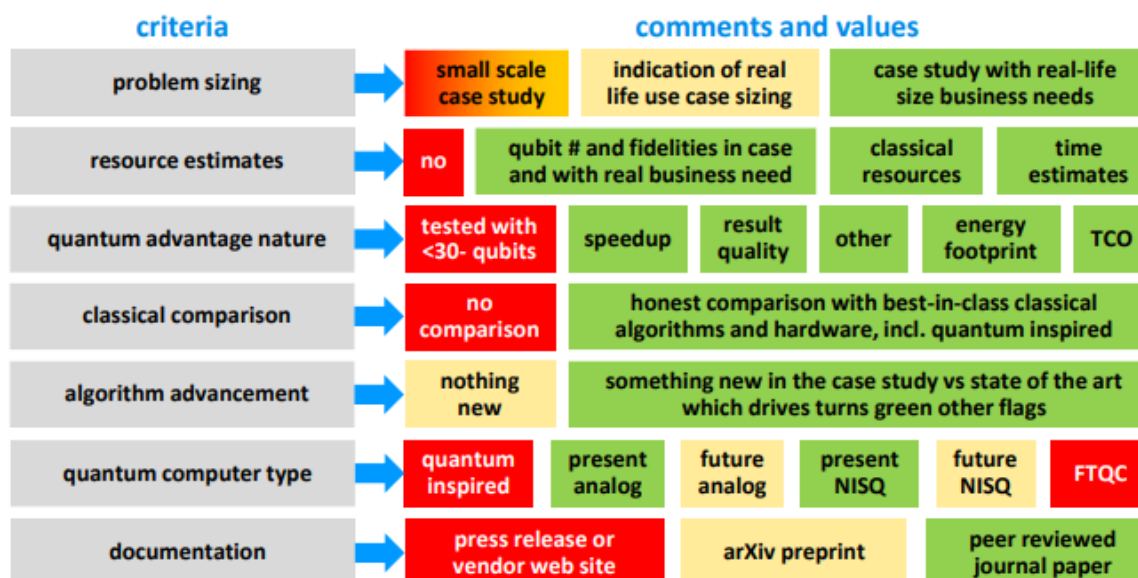


Figure 8 : Critère d'évaluation des études de cas quantiques

Source : Olivier Ezratty

- **Dimensionnement du problème** : l'un des aspects essentiels d'une étude de cas est son dimensionnement. L'étude de cas peut être réalisée à petite échelle, mais il est préférable qu'elle donne des indications sur la taille réelle (nombre de paramètres) du problème à résoudre.
- **Estimation des ressources** : une bonne étude de cas permet d'estimer les ressources en informatique classique et quantique nécessaires pour résoudre un problème donné. Cette estimation est d'autant plus importante lorsque la solution n'a été testée que sur un problème de petite taille.
- **Nature de l'avantage quantique** : l'étude de cas doit préciser quelle est la nature de l'avantage quantique (rapidité de calcul, qualité du résultat, consommation énergétique, coût...)
- **Comparaison avec l'informatique classique** : existe-t-il une comparaison honnête et actualisée entre la solution quantique proposée et les solutions équivalentes ? Si la solution peut être facilement implémentée sur un ordinateur classique, alors il n'y a pas d'avantage quantique.
- **Avancement des algorithmes** : l'étude de cas apporte-t-elle quelque chose de nouveau par rapport à l'état de l'art dans le domaine de l'informatique classique et quantique ?
- **Type d'ordinateur quantique** : l'étude de cas doit préciser le type d'ordinateur quantique utilisé
- **Documentation** : le dernier critère de validation d'une étude de cas est la manière dont elle est documentée. Si l'étude de cas fait l'objet d'une publication scientifique, cela atteste de sa légitimité.

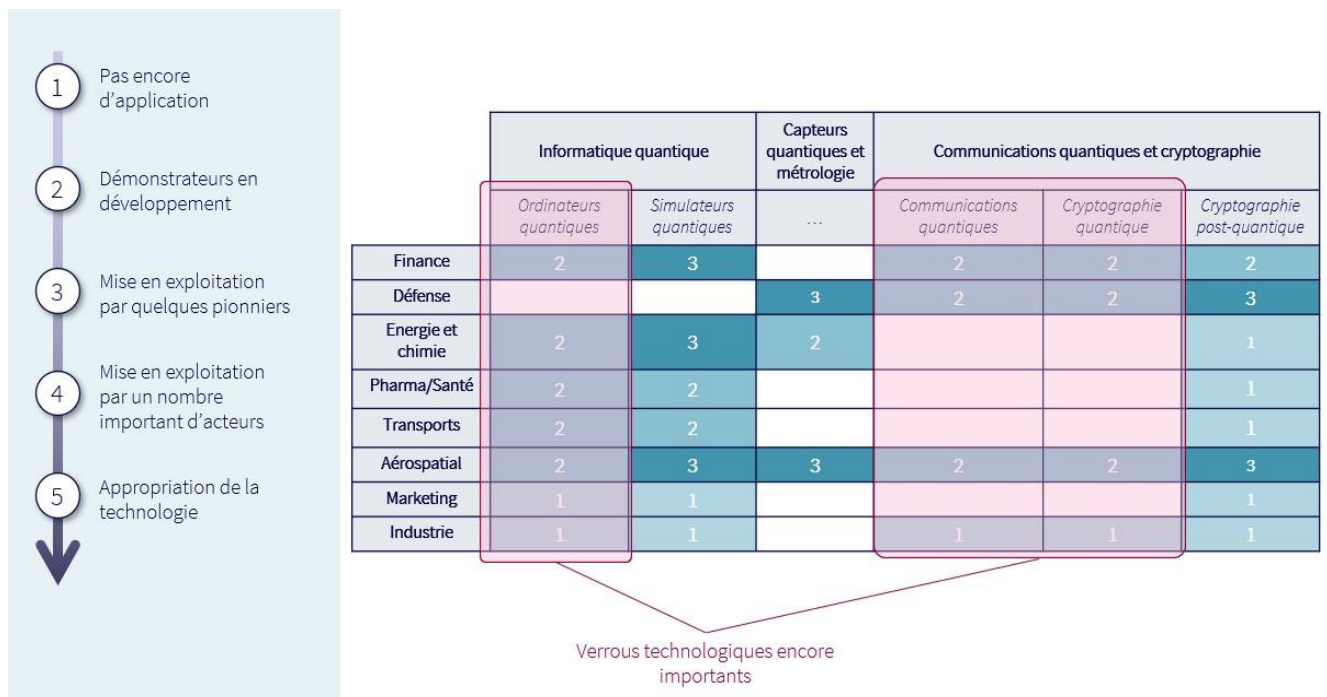
# LES PROMESSES DES TECHNOLOGIES QUANTIQUES

## À quoi pourraient servir les technologies quantiques ?

Les technologies quantiques trouvent aujourd'hui des **applications multiples dans divers domaines**. Les principaux secteurs potentiellement impactés par ces technologies sont :

- **La santé et les biotechnologies**
- **L'énergie et la chimie**
- **Les transports et la logistique**
- **La finance**
- **Le marketing**
- **La défense et l'aérospatial**
- **Le renseignement**
- **L'industrie**

Les différentes technologies présentent des **degrés de maturité plus ou moins avancés**. Dans le schéma ci-dessous, nous utilisons une échelle de 1 à 5 pour évaluer le degré de maturité de chaque technologie. La plupart des domaines d'applications sont toujours en phase de test et expérimentation, à l'exception de la finance, des communications / cryptographie et des capteurs qui sont déjà mis en exploitation par quelques pionniers du secteur.



**Figure 9 : Niveau de maturité des technologies quantiques et domaines applicatifs**

Source : KYU Associés



### Santé et biotechnologies

Le secteur de la santé et plus précisément des **biotechnologies** est celui auquel on pense le plus pour développer les usages du **calcul et de la simulation quantiques**. C'est également l'un des marchés où

l'on trouve **le plus de start-ups dédiées**. Les grands **laboratoires pharmaceutiques** évaluent les technologies disponibles depuis maintenant plusieurs années en ayant commencé par conduire quelques projets pilotes sur des ordinateurs quantiques produits par l'entreprise canadienne D-Wave.

Dans le domaine pharmaceutique, les technologies quantiques offrent des opportunités importantes en rendant possible des **simulations de molécules de plus en plus proches de la réalité** et en réduisant drastiquement les approximations de mesure des ordinateurs classiques. Un des objectifs principaux du secteur est d'étendre les capacités des supercalculateurs d'aujourd'hui avec des calculateurs et simulateurs quantiques pour **simuler les molécules du vivant** « in silico <sup>1</sup> », afin de **créer ou découvrir de nouveaux traitements**. C'est le domaine de la « **in-silico drug discovery** ».



## Énergie et chimie

Dans ce secteur, les premières applications envisagées concernent la **création de matériaux innovants**, la **résolution de problèmes complexes d'analyse et d'optimisation** et la **simulation in silico de molécules et structures cristallines**. Comme dans de nombreux domaines, les premières études de cas ont d'abord été réalisées avec les ordinateurs à recuit quantique de D-Wave, qui semblent bien indiqués pour des simulations d'interactions atomiques dans des matériaux.

Les recherches sont en cours pour **créer des batteries plus efficaces en termes de densité énergétique, de vitesse de charge et de minimisation des phénomènes d'usure**. C'est par exemple l'un des axes de recherche de Volkswagen qui travaille notamment avec les entreprises Xanadu et D-Wave spécialisées dans l'informatique quantique. La **capture du carbone** est également un enjeu important du secteur qui pourrait utiliser les capacités de l'informatique quantique.

**EDF** étudie par exemple de très près les usages du calcul quantique pour l'**évaluation de l'usage de matériaux, des statistiques de sécurité, la gestion de smart grids et la gestion de batteries**. **BP** travaille à la conception d'algorithmes d'optimisation de la **prospection pétrolière** : il s'agit d'exploiter les données de différents capteurs, notamment sismiques, pour consolider des modèles de simulation de ce que le sol recèle. C'est également un domaine de recherche chez **TotalEnergies**.



## Transports et logistique

Au-delà des questions énergétiques évoquées ci-dessus, le marché des transports est surtout intéressé par les **algorithmes d'optimisation de systèmes complexes**.

Dans l'aviation, l'**optimisation de la planification de flottes d'avions pour le transport aérien est un des grands objectifs**. Elle permettra de maximiser la capacité à répondre à la demande tout en optimisant le taux de remplissage des avions. Le calcul quantique permet aussi l'**optimisation de la gestion des aéroports** et des portes pour les avions, afin de minimiser le temps d'attente des passagers.

La **gestion de flottes de véhicules autonomes** est une autre application cible des ordinateurs quantiques. Plus les véhicules seront autonomes, plus il faudra en automatiser et coordonner les parcours. Les problèmes à résoudre consisteront à déterminer pas à pas les trajets de flottes de véhicules pour **optimiser le temps de parcours de chacun de ces véhicules**.

**Airbus** est l'une des principales entreprises de transport en Europe impliquée dans le quantique. L'entreprise organise depuis 2019 son « *Quantum Computing Challenge* », une manière d'externaliser le développement de solutions quantiques pour les aider à résoudre leurs problèmes métiers (optimisation des vols, conception des ailes, remplissage des soutes...).



## Finance

<sup>1</sup> In silico est un néologisme désignant une recherche ou un essai effectué au moyen de calculs complexes informatisés ou de modèles informatiques.

**La finance** est un autre grand domaine d'application des algorithmes quantiques. Les banques doivent **optimiser de nombreuses facettes de leurs activités**, notamment celles de **la gestion de leurs portefeuilles, des risques de change, des produits dérivés ...** L'**optimisation d'actifs** est ainsi la principale application imaginée pour les technologies quantiques. Les banques ont également besoin de **détecter au plus près les risques de fraudes**, ce que permet de faire l'informatique quantique.

En 2019, **BNP Paribas** a créé une communauté interne d'une cinquantaine de personnes investiguant les usages du calcul quantique dans la banque et a organisé un événement autour des technologies quantiques, en partenariat avec **IBM, Cryptonext et QuantiFi**. Le **Crédit Mutuel** et Le **Crédit Agricole** ont également lancé des initiatives de même nature.



## Marketing

**Le marketing** est aussi un domaine où les **algorithmes d'optimisation de systèmes complexes** réalisés à base d'ordinateurs quantiques pourraient être intéressants. Cela concerne **l'optimisation du mix marketing, celui de plans média, ou la maximisation de revenus publicitaires**, divers domaines qui sont également investis par le champ de l'intelligence artificielle. **Volkswagen** expérimente par exemple un système de recommandation de véhicules dans les sites de vente en ligne, avec un ordinateur quantique D-Wave.



## Défense et aérospatial

Le **secteur aéronautique et spatial civil et militaire** s'intéresse grandement aux applications du quantique. **La NASA** a par exemple cofondé le **laboratoire QuAIL** (Quantum Artificial Intelligence Laboratory) avec Google afin de tester des **algorithmes quantiques d'optimisation** de remplissage de vaisseaux spatiaux. Le groupe Airbus a de son côté créé une équipe basée au Pays de Galles qui étudie les usages du quantique, notamment dans **l'analyse d'imagerie aérienne ou pour la conception de nouveaux matériaux**. L'un des objectifs est d'optimiser l'écoulement d'air sur les ailes ou les souffleries d'air conditionné dans les avions.

Dans un autre domaine, les *marines* américains s'intéressent à la **métrologie quantique** et plus précisément par les outils de mesure de précision de la gravité qui permettent de **détecter des sous-marins**. Ce type de métrologie est la spécialité de la startup française **Muquans**. **Thales Alenia Space** investit de son côté avec le CNES et la DGA dans les **télécommunications quantiques par satellite**.



## Renseignement

Le monde du renseignement et des écoutes ciblées est fortement positionné sur le quantique. Les acteurs du secteur souhaitent à la fois **décoder les informations interceptées auprès de cibles diverses** et **protéger les communications sensibles contre ce type de décryptage**. Ils investissent donc simultanément dans **l'informatique quantique** et dans les **clés quantiques et la cryptographie quantique et post-quantique**.



## Industrie

L'industrie au sens large du terme est enfin un autre débouché pour l'informatique quantique. Le quantique pourra être utilisé pour résoudre des **problèmes complexes d'optimisation pour de l'ordonnancement, de la supply chain ou de l'aide à la conception de systèmes complexes**. Le routage de circuits électroniques est par exemple un problème complexe qui pourrait être en partie traité par des algorithmes quantiques, pour peu qu'ils disposent d'un nombre de qubits suffisant.

# Le marché des technologies quantiques

## Une multitude d'avis divergents sur le développement du marché quantique

Les estimations concernant la taille du marché quantique mondial varient selon les cabinets d'études. Selon ces estimations le marché des technologies quantiques est compris **entre 300 et 500 millions de dollars aujourd'hui**. Il pourrait atteindre **entre 3 et 9 milliards de dollars en 2030**.

- Le cabinet Hyperion Research estime le marché à 320 millions de dollars aujourd'hui, avec une prévision de croissance atteignant 830 millions de dollars d'ici 2024.
- Marketandmarkets évalue le marché à 470 millions de dollars en 2021, et estime qu'il pourrait atteindre environ 1,7 milliard de dollars d'ici 2026.
- Le cabinet Yole Development prévoit une croissance plus importante du marché quantique, avec une estimation de 3,2 milliards de dollars d'ici 2030, en enregistrant une croissance moyenne annuelle de l'ordre de 17%.
- Selon une étude de Statista réalisée en 2021, le marché mondial de la technologie quantique dépassera les 9 milliards de dollars (pour une croissance annuelle moyenne de 40%) d'ici 2030, soit trois fois plus que ce qui a été estimé par le cabinet Yole Development.
- Finalement, une étude récente réalisée par l'International Data Corporation estime que le marché du calcul quantique à lui seul représenterait environ 7,6 milliards de dollars d'ici 2027.

Ces chiffres demeurent toutefois des projections et la vision du développement futur du marché quantique est complexe. Le caractère émergent et incertain de ce marché rend difficile à estimer ses potentiels.

## L'essor des capteurs cèdera la place à la montée en puissance de la cryptographie et de l'informatique quantique

D'après l'étude du cabinet Yole Development, le **marché des capteurs est actuellement bien plus développé que celui du calcul et de la simulation quantique et de la cryptographie**. Cependant, il ne connaîtra pas une croissance significative en raison de sa nature de secteur de niche, principalement axé sur la défense et quelques applications scientifiques spécifiques. En revanche, il est prévu un **développement majeur dans le domaine de la cryptographie quantique, mais surtout dans celui des calculs et la simulation quantiques**, qui deviendront le marché dominant d'ici 2030, dépassant ainsi la cryptographie et les capteurs. Absente de ce schéma, la **cryptographie post-quantique** devrait fortement se développer dans les années à venir, en raison de son indépendance vis-à-vis du matériel quantique. Cette nouvelle approche viendra dynamiser le marché de la cybersécurité à court et moyen terme. En revanche, le marché de la **cryptographie quantique** a encore beaucoup d'obstacles à lever pour **atteindre sa maturité**.

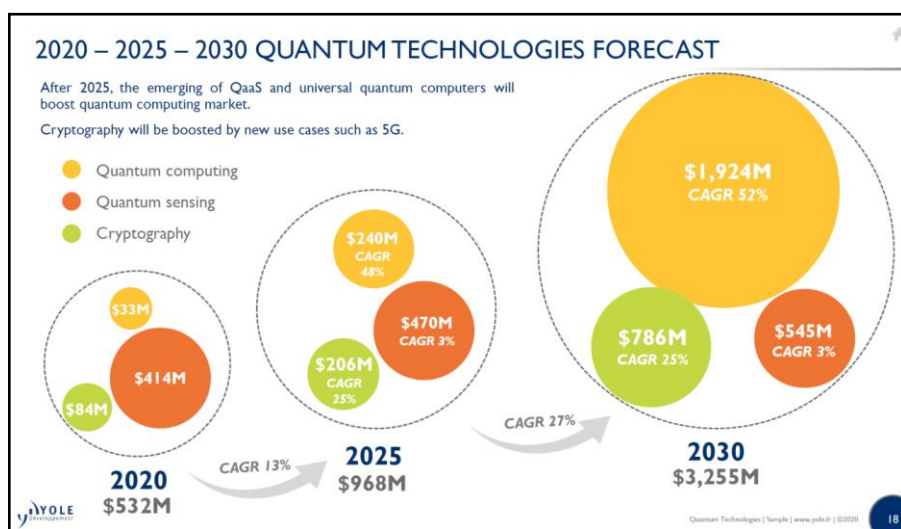


Figure 10 : Prévision d'évolution du marché des technologies quantiques  
Source : Yole Development



## À RETENIR

- Les technologies quantiques sont issues de la 2<sup>e</sup> révolution quantique. Elles reposent sur la capacité à contrôler et mesurer individuellement des systèmes quantiques ainsi que sur les principes de superposition et d'intrication quantique.
- Les technologies quantiques regroupent l'informatique quantique, les capteurs quantiques et les communications quantiques.
- Les technologies quantiques présentent de nombreuses promesses et pourraient dans quelques années trouver des applications dans de nombreux secteurs applicatifs (de la santé à la finance en passant par la défense).
- Toutefois, ces technologies, en particulier l'informatique quantique dont les promesses sont les plus élevées, demeurent immatures sur le plan scientifique et applicatif. Si de nombreuses estimations existent, elles divergent quant au moment où l'informatique quantique atteindra l'avantage quantique.

# 3.

## L'ECOSYSTEME DES TECHNOLOGIES QUANTIQUES

# LA CARACTÉRISATION DE L'ÉCOSYSTÈME DES TECHNOLOGIES QUANTIQUES

## La chaîne de valeur des technologies quantiques

Les technologies quantiques mobilisent un ensemble d'activités caractérisées à la fois par leur place dans la chaîne valeur, par le type de technologie concerné et la catégorie d'usage de ces technologies.

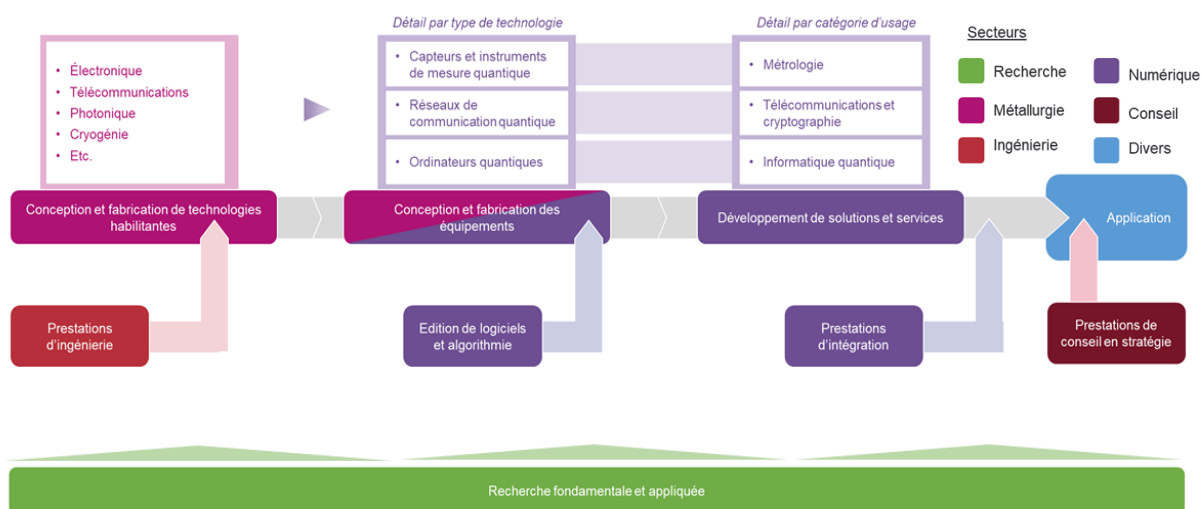


Figure 11 – Chaîne de valeur des technologies quantiques

Source : KYU Associés

**La recherche fondamentale et appliquée** : compte tenu du caractère émergent des technologies quantiques, le rôle de la recherche fondamentale et appliquée est particulièrement stratégique dans la chaîne de valeur de ces technologies. Alors que la recherche fondamentale vise à mettre en place des théories et modèles explicatifs, la recherche appliquée a pour objectif d'identifier et développer les applications pratiques des résultats de la recherche fondamentale. Celle-ci intervient tout au long de la chaîne de valeur des technologies quantiques.

Dans le champ des technologies quantiques, les principaux domaines de recherche concernés sont : la **physique**, l'**optique**, l'**électronique**, les **mathématiques** et l'**informatique**.

**La conception et la fabrication des technologies habilitantes** : les technologies quantiques mobilisent des technologies dites habilitantes. Ces technologies habilitantes relèvent principalement des domaines de la **photonique**<sup>2</sup> (laser, circuits photoniques, générateurs et détecteurs de photons...), de l'**électronique** (composants radiofréquence, MEMS – microsystèmes électromécaniques, composants micro-ondes...) et de la **cryogénie** (solutions de refroidissement d'atomes, cryostats...), des **télécommunications** et de l'**informatique**. Ces technologies sont des technologies indispensables à maîtriser pour envisager de mettre au point un équipement basé sur les technologies quantiques de dernière génération.

**La conception et la fabrication des équipements** : cette étape vise à développer les équipements matériels (hardware) des technologies quantiques. On peut distinguer au sein de cette étape la conception et la fabrication des ordinateurs quantiques, des capteurs et instruments de mesure quantique et des réseaux de communication quantique.

**L'édition de logiciels** : dans la partie logicielle des équipements quantiques, il est possible de distinguer :

<sup>2</sup> La photonique est la science et la technologie relative à la lumière. La photonique est l'une des technologies mobilisées pour la fabrication de certaines technologies quantiques et notamment les ordinateurs quantiques (cf. figure 5).



- **Les couches basses de la partie software des ordinateurs quantiques** c'est-à-dire l'infrastructure logicielle permettant de retranscrire les instructions des algorithmes aux processeurs quantiques tout en optimisant leur fonctionnement. Le développement de cette infrastructure est étroitement lié à la conception des processeurs et ordinateurs quantiques puisque les couches basses logicielles dépendent généralement de l'architecture hardware des ordinateurs.
- **Les outils et logiciels applicatifs** qui permettent de créer une chaîne de traitement automatisée à partir d'un langage facilement manipulable permettant de donner des instructions compréhensibles par les équipements quantiques. Ces démarches logicielles sont hybrides et permettent une utilisation métier des propriétés des équipements quantiques.

**Le développement de solutions et de services** : la mobilisation des technologies quantiques permet de déployer plusieurs types de solutions et services relevant à la fois de l'ingénierie, du numérique et des télécommunications. On peut ainsi distinguer parmi ces solutions et services : la métrologie quantique qui repose sur l'utilisation de capteurs quantiques, l'informatique quantique qui repose sur les ordinateurs quantiques, les télécommunications quantiques et la cryptographie quantique et post-quantiques.

**Les prestations d'intégration** : ces prestations et services qui peuvent intervenir en amont des usages des technologies quantiques visent à identifier les opportunités de déploiement de ces technologies, à évaluer leur pertinence et à accompagner les usagers dans l'intégration de ces technologies dans leur écosystème numérique. Ces activités reposent sur une connaissance pointue des problématiques métiers des usagers, mais aussi des propriétés et usages potentiels des technologies quantiques.

**Les prestations de conseil en stratégie** : ces prestations visent à conseiller les entreprises en aval de la chaîne de valeur afin d'évaluer les opportunités de se positionner sur les technologies quantiques.

**Les usages et applications** : au dernier rang de la chaîne de valeur des technologies quantiques se trouvent les usages possibles de ces technologies. Ces usages se trouvent dans plusieurs secteurs d'activité (santé, chimie, finance, transport, défense...).

## Les types d'acteurs intervenant sur la chaîne de valeur des technologies quantiques

**Les acteurs faisant partie de l'écosystème des technologies quantiques peuvent également se caractériser selon leur type (entreprise, laboratoire, investisseur...) et, d'un point de vue plus administratif selon leur code APE et selon leur branche professionnelle.**

On retrouve 8 grands types d'acteurs au sein de l'écosystème des technologies quantiques :

- Les laboratoires ;
- Les start-ups ;
- Les entreprises « traditionnelles » composées de PME, ETI et de grands groupes
- Les pôles de compétitivité ;
- Les investisseurs publics et privés ;
- Les réseaux ;
- Les établissements de formation ;
- Les administrations publiques.

Une quinzaine de codes APE (activité principale exercée – aussi appelé code NAF) peuvent être identifiés parmi les acteurs potentiels des technologies quantiques.

DIVISION	CODE APE/NAF	ACTIVITÉ
<b>26 – Fabrication de produits informatiques, électroniques et optiques</b>	26.51B	Fabrication d'instrumentation scientifique et technique
	26.70Z	Fabrication de matériels optique et photographique
<b>28 – Fabrication de machines et équipements n.c.a</b>	28.99B	Fabrication d'autres machines spécialisées
<b>58 – Édition</b>	58.29A	Édition de logiciels système et de réseau

<b>62 – Programmation, conseil et autres activités informatiques</b>	62.01Z	Programmation informatique
	62.02A	Conseil en systèmes et logiciels informatiques
<b>64 – Activités des services financiers hors assurance et caisse de retraite</b>	64.20Z	Activités des sociétés holding
<b>70 – Activité des sièges sociaux et conseil de gestion</b>	70.22Z	Conseil pour les affaires et autres conseils de gestion
<b>71 – Architecture et ingénierie, contrôle et analyses techniques</b>	71.12B	Ingénierie, études techniques
<b>72 – Recherche et développement scientifique</b>	72.19Z	Recherche-développement en autres sciences physiques et naturelles
<b>74 – Autres activités spécialisées, scientifiques et techniques</b>	74.90B	Activités spécialisées, scientifiques et techniques diverses

**Figure 12 – Les principaux codes d'activité des acteurs de l'écosystème quantique**

Source : KYU Associés

Parmi les acteurs privés de l'écosystème des technologies quantiques, deux branches professionnelles principales sont représentées.

BRANCHE PROFESSIONNELLE	CODE IDCC	NOTE
<b>Branche professionnelle de la métallurgie</b>	•	Il existe près d'une cinquantaine de conventions collectives liées à la métallurgie. À partir du 1 <sup>er</sup> janvier 2024 une seule convention collective s'appliquera aux entreprises de la métallurgie.
<b>Bureaux d'études techniques, cabinets d'ingénieurs-conseils et sociétés de conseils</b>	1486	•

**Figure 13– Les branches professionnelles des acteurs de l'écosystème quantique**

Source : KYU Associés

# L'ÉCOSYSTÈME FRANÇAIS DES TECHNOLOGIES QUANTIQUES

## Un écosystème fort d'une centaine d'acteurs impliqués sur toute la chaîne de valeur

L'écosystème français des technologies quantiques se caractérise par le poids important des laboratoires et des entreprises issues de la recherche.

Un peu plus d'une centaine de structures impliquées dans l'écosystème des technologies quantiques ont pu être recensées. Parmi elles, les laboratoires et les entreprises privées sont les acteurs les plus nombreux de cet écosystème traduisant :

- Le caractère encore émergent de ces technologies qui continuent de nécessiter un effort conséquent de recherche fondamentale et appliquée ;
- La maturation progressive de certaines applications des technologies quantiques permettant aux entreprises de développer et commercialiser certaines de ces technologies.

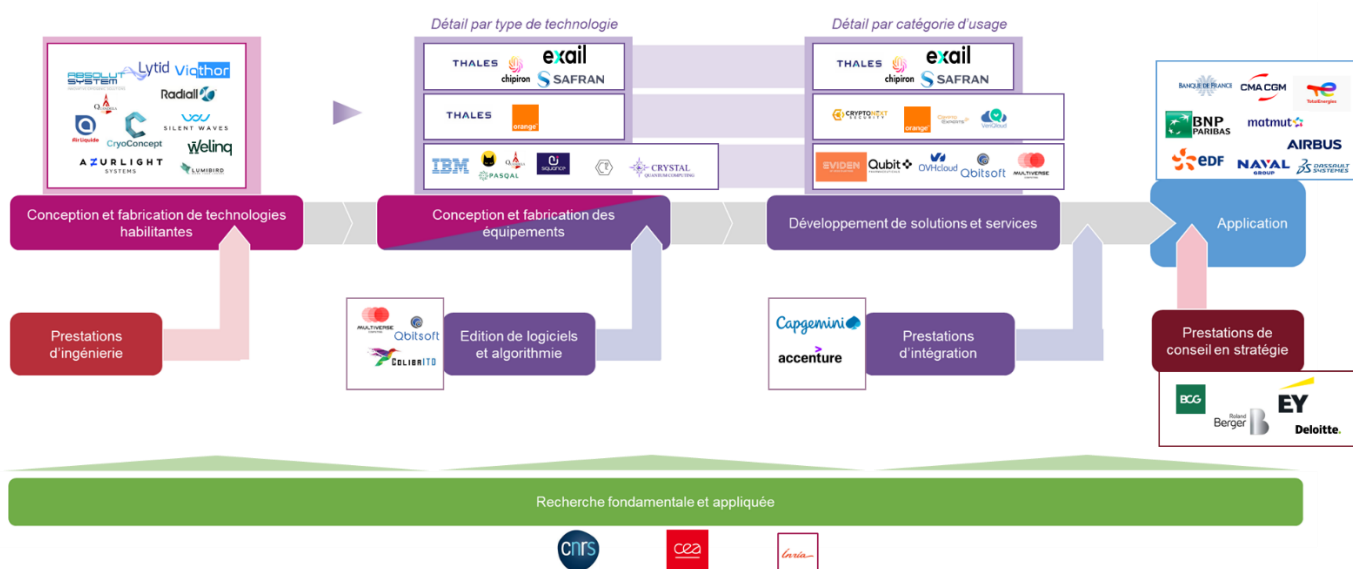


Figure 14 – Les principaux acteurs de l'écosystème français des technologies quantiques (non exhaustif)

Source : KYU Associés

Compte tenu du caractère encore émergent de cet écosystème et du besoin d'expertises particulièrement pointues, la chaîne de valeur des technologies quantique demeure très fragmentée. Les laboratoires et entreprises positionnées sur la chaîne de valeur sont ainsi très souvent spécialisés sur une brique technologique.

---

## Un écosystème de recherche performant, public qui favorise l'industrialisation grâce à des partenariats et l'émergence de start-up

5 grands centres de recherche nationaux, une quarantaine de laboratoires et près de 1000 chercheurs sont impliqués dans l'écosystème des technologies quantiques.

Les prix Nobel français de physique Albert Fert, Serge Haroche et Alain Aspect dont les travaux sont liés aux technologies quantiques, traduisent de la solidité et du dynamisme de la recherche et des laboratoires français. Près de 70 laboratoires et instituts sont impliqués sur les technologies quantiques (cf. figure 14). Ceux-ci sont positionnés sur toute la chaîne de valeur de technologies quantiques (technologies habilitantes, équipements quantiques, algorithmie, logiciels, usages...). Ils s'inscrivent dans une **logique d'interdisciplinarité** en adressant l'ensemble des domaines scientifiques nécessaires au développement des technologies quantiques (physique quantique, informatique, électronique, optique, cryogénie...).

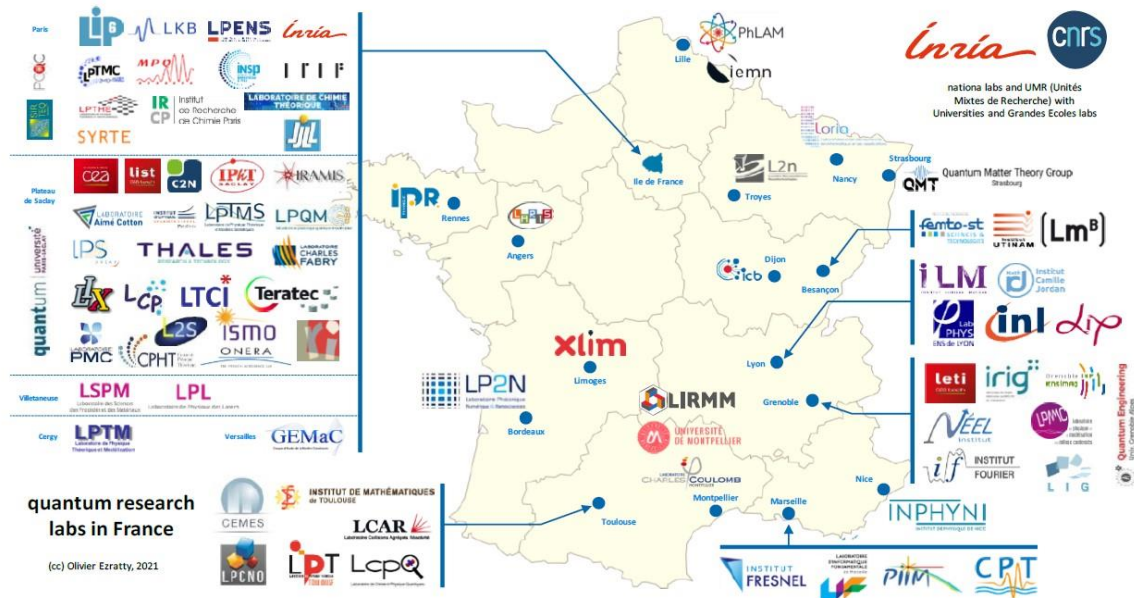
Les laboratoires sont structurés autour de **5 organismes scientifiques impliqués** dans la recherche fondamentale et appliquée du quantique :

- Le **CNRS** – Centre national de la recherche scientifique – qui compte plus de 200 chercheurs sur le quantique ;
- L'**INRIA** – Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique
- Le **CEA** – Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives - qui compte environ 40 chercheurs sur le quantique
- L'**ONERA** – Office national d'études et de recherches aéronautiques
- Le **CNES** – Centre national d'études spatiales

Parmi ces 5 organismes, **le CNRS, le CEA et l'INRIA** ont été désignés pour **piloter la stratégie nationale d'accélération des technologies quantiques** lancées en janvier 2021.

Selon Olivier Ezratty, l'écosystème quantique est aujourd'hui constitué de **plus de 1000 chercheurs en France**, dont 80% sont concentrés sur les pôles de **Paris, Saclay et Grenoble**.



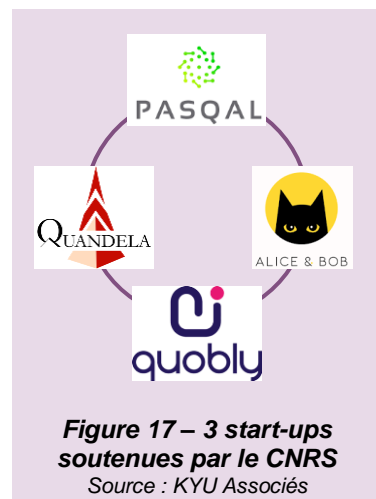


**Figure 16 – écosystème de la recherche en France**  
 Source : Olivier Ezratty

**Un écosystème de recherche actif, qui soutient l'émergence de nombreuses start-ups**

Au-delà du nombre de laboratoires et de chercheurs mobilisés sur les technologies quantiques ou du nombre de publications scientifiques, la performance de la recherche française se mesure également par sa capacité à diffuser ses résultats à travers des applications. La recherche française sur les technologies quantiques se distingue en ce sens par son lien direct avec les entreprises de l'écosystème. Les laboratoires et centres de recherche sur les technologies quantiques ont ainsi fait émerger plusieurs start-ups.

- Issue du CNRS, la **société Quandela** travaille à la conception et au développement d'ordinateurs quantiques et de nouveaux réseaux de communication. Elle vient de remporter l'appel à projets Innov'up Leader PIA, lancé conjointement par l'État et la Région Ile-de-France et opéré par Bpifrance.
- Issue également du CNRS, la **société Pasqal** est positionnée sur les simulateurs quantiques programmables à l'ide d'atomes froids.
- Le CNRS, via sa filiale CNRS Innovation, est entré au capital de la **start-up Alice & Bob**. Celle-ci vise à mettre mise au point en cinq ans d'un calculateur quantique universel opérationnel. Elle a levé 3,3 millions d'euros en 2020.
- **Quobly**, anciennement SiQuance, est issue du CEA et du CNRS. Elle vise à développer un ordinateur quantique fondé sur des technologies de microélectronique.



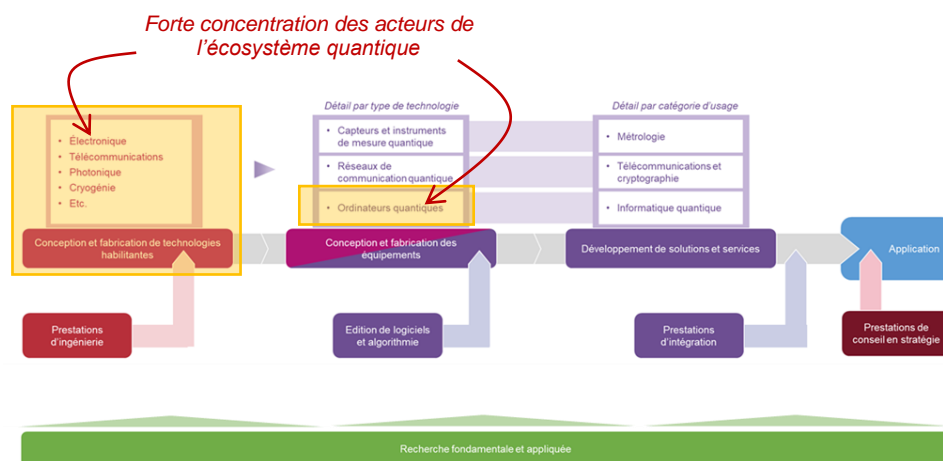
**Figure 17 – 3 start-ups soutenues par le CNRS**  
 Source : KYU Associés

## Des entreprises majoritairement concentrées en amont de la chaîne de valeur quantique, et notamment sur le développement d'ordinateurs quantiques

En France une soixantaine d'entreprises sont positionnées dans l'écosystème des technologies quantiques.

L'écosystème quantique français se focalise **principalement en amont de la chaîne de valeur** des technologies quantiques sur la conception des équipements liés à l'informatique quantique (processeurs quantiques, qubits...) et sur le développement des technologies habilitantes nécessaires à leur construction et leur fonctionnement (cryogénie, optique, photonique...). Ainsi sur la **soixantaine d'entreprises identifiées dans l'écosystème** des technologies quantiques (source : Olivier Ezratty, recensement KYU Associés), **plus de la moitié travaillent sur le développement d'équipements liés à l'informatique quantique et sur les technologies habilitantes**. Moins d'une dizaine d'entre elles sont respectivement positionnées sur des problématiques logiciels, de communications et cybersécurité, et de capteurs quantiques.

Ce positionnement majoritaire des entreprises sur l'amont de la chaîne de valeur et sur le hardware s'explique par la non-maturité de ces équipements. En effet, les logiciels quantiques **nécessitent des installations quantiques** pour pouvoir être développés et testés. Ainsi, les entreprises ont dans un premier temps pris le chemin du hardware, pour maintenant commencer à se tourner vers le software.



**Figure 18 – Une concentration des acteurs privés en amont de la chaîne de valeur**

Source : KYU Associés

## Des start-ups de premier plan dans la conception et la fabrication d'ordinateurs quantiques

L'écosystème de start-ups quantiques en France notamment sur le hardware de l'informatique quantique se développe depuis plusieurs années. Parmi ces start-ups, la France compte des acteurs de premier plan, comme **Pasqal**, qui a récemment levé 100 millions d'euros de financements, **Quandela**, qui ouvre tout juste sa nouvelle usine à Massy pour industrialiser son ordinateur quantique fonctionnant grâce à la photonique ou **Alice & Bob**, qui annonce pouvoir faire aussi bien que le géant Google avec 60 fois moins de qubits dans un futur proche. Ces entreprises sont aujourd'hui des structures incontournables, même sur le plan international, et placent la France parmi les pays les plus avancés dans la conception et le développement de l'ordinateur quantique. Dans leur sillage, de nouvelles entreprises se sont également créées dans le développement d'ordinateurs quantiques comme **Quobly** (ex. Siquance) ou **C12**.

## Dans la conception et la fabrication de technologies habilitantes, des entreprises qui développent une offre tournée sur les technologies quantiques.

Compte tenu de la taille limitée du marché des technologies quantiques, les entreprises positionnées sur les technologies habilitantes sont des entreprises qui ont développé des produits spécifiques aux technologies quantiques, mais qui s'inscrivent dans une offre plus large. On trouve parmi elles :

- **Air Liquide et CryoConcept** se concentrent sur la **cryogénie**, qui est essentielle pour refroidir les qubits et maintenir des conditions optimales de fonctionnement des ordinateurs quantiques.
- **Silent Waves et Welinq** se consacrent à la **partie électronique** des ordinateurs quantiques, en développant des composants et des circuits spécialisés pour la manipulation et le contrôle des qubits.
- **Quandela, Cailabs et Lytid** sont des entreprises spécialisées **dans la photonique**, en concevant des sources de photons quantiques, des guides d'ondes et des composants optiques avancés pour les applications quantiques.
- **Riber, Plassys et Orano** travaillent sur la **fabrication et les matériaux** nécessaires aux technologies quantiques. Ils développent des équipements de dépôt de couches minces, des substrats et des matériaux spécifiques pour la réalisation des dispositifs quantiques.

## Des entreprises moins nombreuses dans la conception et le développement de logiciels et algorithmes quantiques

Bien qu'elles soient moins nombreuses, certaines entreprises se positionnent plus spécifiquement sur la partie algorithmie et software de l'informatique quantique. Parmi elles peuvent être distinguées :

- Celles qui **développent des outils et des algorithmes spécifiquement conçus pour les ordinateurs quantiques**. Ces logiciels permettent de concevoir des circuits quantiques, d'optimiser la résolution des problèmes et d'exploiter les avantages de la computation quantique. Se trouvent notamment parmi elles les start-ups **ColibriTD** et **Multiverse** ainsi que l'entreprise **Eviden** (branche quantique d'Atos) qui développe des logiciels centrés sur l'optimisation et la simulation de systèmes quantiques, la correction d'erreurs et l'intégration de l'informatique quantique aux centres de calcul HPC traditionnels.
- Celles qui se concentrent sur **les applications industrielles du quantique**, en proposant des solutions pour des domaines tels que la cybersécurité, l'optimisation des chaînes logistiques, la simulation de matériaux ou la recherche pharmaceutique. Elles développent des technologies quantiques **adaptées aux besoins spécifiques de ces domaines** en exploitant les avantages de la résolution quantique de problèmes complexes. À titre d'exemple, **Qubit Pharmaceuticals** souhaite exploiter les technologies quantiques pour **accélérer et développer la recherche en chimie** notamment (développement des molécules). En France, une petite dizaine d'entreprises se positionnent sur les applications industrielles du quantique.

---

## Des entreprises en aval de la chaîne de valeur qui acculturent les futurs usagers à l'informatique quantique

Compte tenu de la non-maturité des technologies quantiques, les entreprises en aval de la chaîne de valeur sont moins nombreuses. Elles acculturent et préparent les entreprises des domaines applicatifs à l'utilisation du quantique dans leur activité.

Parmi les entreprises en aval de la chaîne de valeur on distingue celles qui disposent d'une offre de prestation de services et d'intégration et les cabinets de conseil en stratégie.

### Les entreprises de prestations de service et d'intégration

Parmi ces acteurs des stratégies et des offres de service très différentes coexistent. Toutefois, peu d'acteurs sont encore positionnés sur cette brique de la chaîne de valeur des technologies quantiques. Se trouve notamment :

- **Eviden (Atos)** - Eviden se positionne à la fois sur le **développement de calculateur à hautes performances (HPC)**, sur la **création de couches logicielles intermédiaires** permettant de faciliter la création d'algorithmes quantiques et de définir des cas d'usage (Qaptiva) tout en intégrant d'autres services liés au quantique (optimisation d'algorithmes, accompagnement et formation des usagers aux outils liés au quantique, algorithmie de correction d'erreur...). L'entreprise participe également au **développement d'ordinateurs hybrides**, qui combine supercalculateurs et processeur quantique.
- **OVH Cloud** – L'entreprise française OVH Cloud est également présente sur l'écosystème quantique, en France et dans le monde. Elle fournit aux développeurs un accès cloud à certaines technologies quantiques, en établissant des partenariats avec des entreprises comme Pasqal, Quandela ou Atos. OVH Cloud a récemment acheté un processeur Quandela de 6 qubits afin d'expérimenter de son côté différents cas d'usage.
- **Capgemini** - D'autres entreprises travaillent parallèlement aux développements du hardware, à l'instar de Capgemini. Ils interviennent à la fois sur la partie technique, liée au **déploiement des solutions ou d'algorithmes**, comme sur l'accompagnement **stratégique** et sur la **transformation opérationnelle**.
- **Accenture** - Accenture se positionne davantage sur la **réalisation d'études** et de **plans de développement opérationnel** pour les entreprises dans leur stratégie d'appropriation des technologies quantiques. L'entreprise commence à intégrer le quantique dans ces cas clients, notamment sur des problématiques pharmaceutiques.
- **IBM** – IBM est l'un des acteurs les plus importants de l'écosystème des technologies quantiques à l'échelle mondiale. Sa principale force réside dans la **verticalité de ses opérations** : contrairement aux start-ups ou aux PME travaillant sur les technologies quantiques, IBM se positionne sur presque toute la chaîne de valeur : **technologies habilitantes, hardware, software, cloud...** L'entreprise emploie plus de 1000 personnes, **et son influence est mondiale**, puisqu'elle développe des partenariats partout à travers le monde. L'entreprise est également installée en France, **et emploie quelques centaines de personnes en Europe, principalement dédiées à la partie commerciale et à la partie d'intégration**.

### Les cabinets de conseil en stratégie

Les cabinets de conseil en stratégie **comme Deloitte, EY ou McKinsey** se positionnent également dans l'acculturation des entreprises des domaines applicatifs. Elles apportent à leurs clients une réflexion sur l'opportunité d'intégrer ou non les technologies quantiques dans leurs activités.



---

# Dans le domaine des communications et des capteurs, un écosystème plus en retrait et davantage orienté sur la défense et la sécurité

Alors que l'écosystème français relatif à l'informatique quantique est plutôt dense, les activités liées aux communications quantiques et la métrologie sont plus en retrait.

## Un environnement industriel des capteurs quantiques restreint à quelques acteurs

Parmi les acteurs positionnés sur le développement de capteurs quantiques et proposant une offre de services de métrologie se trouvent :

- **Des entreprises pionnières**, comme **Muquans**, acquise par IxBlue en 2020 et qui a été rebaptisée Exail en 2022. Cette entreprise propose des gravimètres opérationnels et portatifs, et développe également des capteurs permettant de se repérer sans signal GPS. À titre d'exemple, l'un de leurs gravimètres est installé au sommet de l'Etna afin de mesurer les mouvements de magma.
- **Des acteurs d'envergure**, comme **Thales** qui travaille sur la métrologie et les capteurs quantiques depuis plusieurs années. L'entreprise dont le laboratoire est situé à Palaiseau est notamment positionnée sur trois technologies : les centres NV-diamants, les atomes froids et les SQUIDS (Superconducting Quantum Interference Devices).
- **De quelques start-ups** qui se développent autour du sujet de la métrologie, comme **Syrlinks**, **Orolia** ou **Chipiron**.

Du côté des utilisateurs des capteurs, les domaines sont très restreints (aérospatial, défense, géologie...) et peu d'acteurs ont été identifiés. Toutefois, malgré le nombre limité d'informations disponibles, il existe un intérêt de la part **de l'armée française** : l'appropriation des capteurs quantiques dans le matériel utilisé par les soldats leur permettrait de **mieux appréhender le terrain** et l'environnement dans lequel ils évoluent.

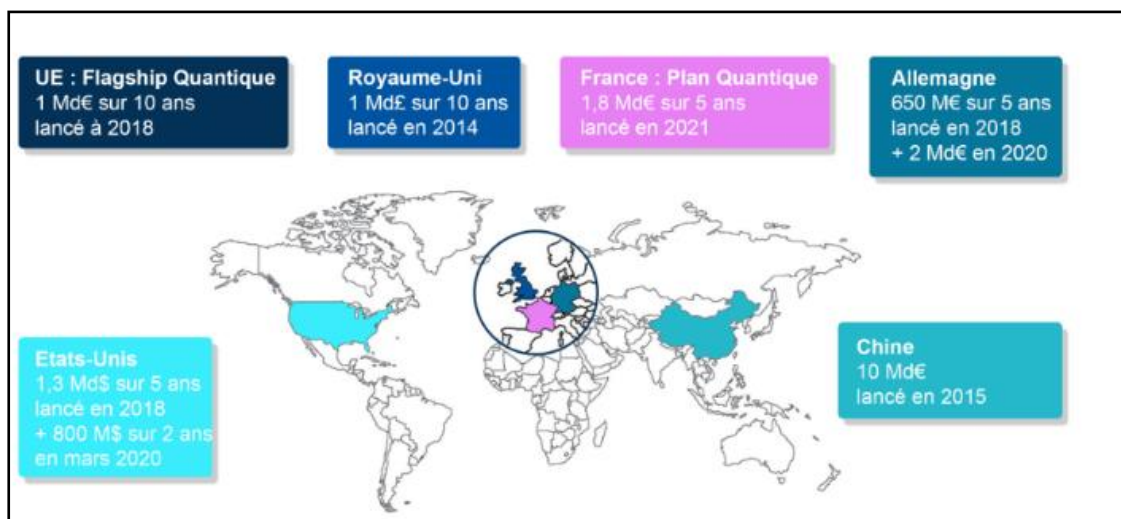
## Dans le domaine des communications, des acteurs majoritairement positionnés sur la cryptographie post-quantique

En ce qui concerne le domaine de la communication quantique et de la cryptographie, le schéma est relativement similaire à celui des capteurs :

- **Cryptographie post quantique - CryptoExperts** qui travaille sur des problématiques de cryptographie post-quantique avec des géants industriels français comme Airbus ou Orange, et **Secure-IC** développant des solutions de cryptographie post-quantique.
- **Cryptographie quantique** - La France **n'est pas experte dans ce domaine**, mais certaines start-ups y consacrent leurs activités, comme **VeriQloud**, qui travaille notamment avec la Banque de France sur la création d'un VPN robuste aux technologies quantiques. La cryptographie quantique est encore au stade de recherche en France.
- **Communication quantique** - La France est encore plus en retrait sur les domaines de communications quantiques, là où d'autres pays construisent des réseaux quantiques complets, parfois de **plusieurs milliers de kilomètres**. La France s'est récemment lancée dans un tel projet de construction : Orange, Thales, CryptoNext Security avec d'autres acteurs se sont lancés dans la construction d'un réseau de communication quantique en France. Ce projet, FranceQCI, sera cofinancé par la Commission européenne et s'étalera sur 30 mois.

## Un écosystème qui bénéficie d'un plan quantique national d'envergure

En 2021 la France s'est dotée d'un plan quantique ambitieux permettant de soutenir l'écosystème quantique français. L'Union européenne apporte également depuis 2018 un soutien important à la filière.



**Figure 19 : le positionnement du plan quantique français au regard des investissements gouvernementaux dans le monde**

Source : CNRS, rapport Forteza et Olivier Ezratty

Annoncée le 21 janvier 2021, la stratégie quantique française s'est dotée d'un plan d'investissement de plus de **1,8 milliard d'euros réparti sur 5 ans** (1 milliard de financements publics français, 250 millions d'euros de financements européens et un montant total prévisionnel de 550 millions provenant des entreprises). Le niveau de financement de ce plan est relativement similaire aux financements dans les autres puissances quantiques. À travers ce Plan Quantique la France s'est donnée pour objectifs :

- **De maîtriser les technologies quantiques** afin d'offrir aux entreprises et aux organisations françaises un avantage stratégique décisif.
- **D'être le premier pays à posséder d'un prototype complet d'ordinateur quantique généraliste** et de devenir un leader mondial dans la course à l'ordinateur quantique universel.
- **De maîtriser les filières industrielles critiques dans les technologies quantiques et habilitantes**, en devenant notamment un des leaders en cryogénie, en laser et en production de silicium 28.
- **Développer considérablement son capital humain** lié au quantique, en créant un cadre de travail favorable pour les entrepreneurs et les chercheurs / étudiants, afin de former les meilleurs talents mondiaux.

Pour répondre à ces objectifs, le gouvernement a prévu de répartir les financements entre différents axes technologiques.

Axes technologiques de la stratégie nationale						Total 2021 – 2025
	NISQ	LSQ	Capteurs quantiques	Communications quantiques	Cryptographie post quantique	Technologies habilitantes
Objectifs	Développer et diffuser l'usage des simulateurs et accélérateurs NISQ	Développer l'ordinateur quantique passant à l'échelle LSQ	Développer les technologies et les applications des capteurs quantiques	Développer les systèmes de communications quantiques	Développer l'offre de cryptographie post-quantique	Développer une offre de technologies habilitantes compétitives
Montant alloué	352 Md€	432 Md€	258 Md€	325 Md€	156 Md€	292 Md€
<i>Ordinateur quantique</i>						

**Figure 20 : Répartition des financements du Plan Quantique selon les axes technologiques identifiés**  
Source : Stratégie quantique nationale

Les financements du Plan quantique s'orientent majoritairement sur la recherche, et les entreprises privées (incubateurs, fonds d'investissement...) et dans une moindre mesure dans la formation et les politiques d'achat public.

Total 2021 – 2025	1815 Md€
Recherche (Organismes CNRS, CEA, INRIA, ONERA, CNES, programmes UE, infrastructures)	725 Md€
Formation (PhD, Ingénieurs, masters, techniciens)	61 Md€
Maturation technologique	171 Md€
Innovation de rupture (ordinateur quantique)	114 Md€
Soutien au déploiement industriel (lignes pilotes et cryogénie)	224 Md€
Politique d'achat public (calcul, défense)	72 Md€
Entreprenariat (fonds d'investissement, incubateurs)	439 Md€
Intelligence économique (standardisation, PI)	9 Md€

**Figure 21 : Répartition des financements du Plan Quantique selon le type de soutien**  
Source : Stratégie quantique nationale

2 ans après le lancement du Plan Quantique, plus de la majorité des principales composantes du plan ont été lancées<sup>3</sup>:

- Lancement du Programme d'Équipement Prioritaire de Recherche à destination des laboratoires
- Plusieurs initiatives côté formation pour augmenter l'offre de formation autour des technologies quantiques
- Plusieurs achats publics (exemple : achat d'une plateforme de calcul hybride annoncé en 2022)
- Augmentation du capital de certaines start-ups par le biais de BPI France

En plus de sa stratégie nationale, la France s'inscrit dans **une démarche de développement européenne, avec le lancement en 2018 du Quantum technologies Flagship**. Ce plan européen vise à soutenir les travaux des chercheurs dans le domaine du quantique sur une durée de 10 ans. Il représente un financement de la part de l'Union européenne de 1 milliard d'euros, et permet de soutenir la recherche sur l'ensemble des technologies, à savoir le calcul quantique, la simulation, la métrologie quantique et les communications quantiques. L'un des enjeux phares de ce programme est de positionner l'Union européenne comme le leader mondial des technologies quantiques, devant les États-Unis et la Chine.

Outre les fonds du gouvernement français et de l'Union européenne, l'écosystème du quantique peut s'appuyer sur les **investissements des acteurs privés**. Le fonds d'investissement français **Quantonation** est le premier fonds d'investissement dédié aux technologies quantiques et finance **plus d'une vingtaine de start-ups** partout dans le monde. Il a par ailleurs participé aux financements de **Pasqal, Quandela et de Qubit Pharmaceuticals**.

<sup>3</sup> Pour en savoir plus, voir *La stratégie quantique française, un an après*, Opinions Libres, Olivier Ezratty, 2022

---

# Les pôles géographiques de l'écosystème quantique en France

L'écosystème quantique français se concentre principalement en Île-de-France. Toutefois, la région grenobloise et dans une moindre mesure la région bordelaise et l'Occitanie sont également des pôles de l'écosystème quantique. Ces regroupements géographiques d'acteurs sont animés par des pôles de compétitivité, à savoir Systematic pour la région d'Île-de-France, Optitec pour l'Occitanie, Minalogic pour Grenoble et ses alentours, ainsi qu'ALPHA-RLH pour la région bordelaise.

## L'Île-de-France, l'épicentre français des technologies quantiques

La grande majorité des acteurs de la recherche, mais aussi des industriels, est concentrée en Île-de-France et notamment autour de Paris-Saclay. Les domaines de spécialités y sont très variés : création de qubits, conception d'algorithmes, télécommunications et cryptographie.

Les laboratoires présents font partie des acteurs majeurs de la recherche en France et en Europe. Parmi la cinquantaine de laboratoires impliqués dans le quantique que compte la région, les plus importants sont :

- l'INRIA et le CEA, qui travaillent sur la création de qubits et sur la correction des erreurs quantiques,
- le LIP6 (Laboratoire d'Informatique de la Sorbonne), qui axe ses recherches sur la cryptographie
- le LPENS (Laboratoire de Physique de l'École Nationale Supérieure), spécialisé dans les domaines des nanotechnologies et de la photonique.

L'environnement industriel, et notamment celui des start-ups, est également très développé, puisque la région accueille certains des principaux acteurs français, comme Pasqal, Quandela, C12 Quantum Electronics, Thales et bien d'autres.

## Grenoble, pôle d'excellence en recherche quantique

Le second pôle quantique français se situe dans la région grenobloise. Ce centre, très dense et particulièrement bien structuré, est l'un des centres les plus importants du plan quantique national avec Paris Saclay, mais il est aussi l'un des acteurs majeurs du programme européen de développement des technologies quantiques. Il est spécialisé dans la création de qubits à base de spins d'électron, mais aussi dans les qubits supraconducteurs et sur la photonique.

L'institut Néel est sans doute le laboratoire le plus important de la zone, avec un effectif d'environ 450 personnes, dont 175 chercheurs, ou enseignants-chercheurs. Il s'agit d'une unité appartenant au CNRS, situé à deux pas de l'autre laboratoire important de la région grenobloise, à savoir le CEA-Leti, spécialisé dans les domaines de la micro et de la nanoélectronique. Ce dernier travaille également sur la création de qubits à spin d'électron. A cela s'ajoutent l'Inria et le CEA Leti.

À l'exception de Quobly, Silent Waves, Diamfab, Radiall et Air Liquide, le réseau de start-up n'est pas vraiment développé dans la zone, qui reste cependant très riche en instituts de recherche.

## Bordeaux : hub majeur en photonique et en métrologie

La région bordelaise est également une région dynamique dans le domaine du quantique et notamment dans la photonique et la métrologie. Un regroupement de chercheurs et d'industriels travaille sur des capteurs quantiques permettant de se repérer sans signaux GPS. Muquans, absorbée par Exail, a également mis au point un capteur quantique (gravimètre) déployé sur l'Etna, permettant de mesurer et de prévoir les évolutions du magma. Exail travaille notamment avec le LP2N (Laboratoire Photonique, Numérique et Nanoscience), spécialisé dans la photonique et en métrologie à base d'atomes froids, qui est l'acteur le plus important dans la recherche quantique dans la région bordelaise. Le développement des technologies quantiques dans cette région est également porté par la création d'un « hub quantique », le NaQuidis. Ce hub a pour objectifs de développer les projets de recherche ainsi que les applications innovantes liées au quantique.

## Occitanie, une région positionnée sur les communications quantiques

À elles seules, les villes de Toulouse et de Montpellier accueillent plus de 200 chercheurs du CNRS, répartis entre l'université de Montpellier, de l'Université Toulouse III, de l'INSA ou de l'ISAE-

SUPAERO à Toulouse également. La recherche en Occitanie porte principalement sur les **communications quantiques sécurisées, sur les capteurs et la métrologie, et sur la simulation quantique**. Plusieurs gros industriels sont implantés en Occitanie, comme IBM, Eviden, Airbus, Thales Alenia Space, mais aussi des centres de recherches et d'innovations comme le CNES ou le Cerfacs.

**L'institut quantique Occitan** a été lancé à la suite de l'annonce du plan quantique nationale, et regroupe l'ensemble des acteurs du développement quantique, de la recherche fondamentale aux entreprises privées. Il a pour objectif de favoriser le partage des connaissances et l'excellence scientifique dans ce domaine de recherche, de renforcer le transfert de la recherche et de préparer les étudiants et les ingénieurs aux technologies quantiques.

 **À RETENIR**

- Plus d'une centaine d'acteurs sont positionnés dans l'écosystème des technologies quantiques en France et ce, sur l'ensemble de la chaîne de valeur, de la recherche fondamentale au développement d'applications.
- L'écosystème français se caractérise par une recherche particulièrement dynamique structurée autour de trois centres de recherche : le CNRS, le CEA et l'INRIA.
- Du côté des entreprises, l'écosystème français se compose à la fois de start-ups de premier plan (telles que Pasqal, Quandela ou Alice & Bob) majoritairement positionnées sur le développement d'ordinateurs quantiques et de grandes entreprises du numérique (Capgemini...) qui acculturent les futurs usagers du quantique à ces technologies.
- Les acteurs français travaillent majoritairement sur l'informatique quantique en amont de la chaîne de valeur, même si certaines grandes entreprises et start-ups sont positionnées sur les capteurs quantiques (Thales, Muquans...) et les communications quantiques (Orange, CryptoNextSecurity...).
- Cet écosystème est soutenu par une stratégie quantique nationale lancée en 2018 qui finance le développement de l'ensemble des technologies à hauteur de 1,8 milliard d'euros.

# 4. LA PLACE DE LA FRANCE DANS L'ÉCOSYSTÈME QUANTIQUE INTERNATIONAL

# LE POSITIONNEMENT DES PRINCIPAUX PAYS DES TECHNOLOGIES QUANTIQUES

## Les États-Unis, leader mondial dans la recherche et dans l'industrie quantique

Les États-Unis dominent la scène mondiale quantique grâce, notamment, à une recherche fondamentale performante et à des géants mondiaux du numérique qui tirent l'écosystème du pays.

### Une recherche alliant secteur public et secteur privé

- **La recherche universitaire** - L'une des institutions les plus renommées est le National Institute of Standards and Technology (NIST) qui mène des recherches fondamentales et appliquées sur les technologies quantiques. Les universités américaines, telles que le MIT, Caltech, Harvard, Stanford et d'autres sont également des acteurs clés dans ce domaine.
- **Les géants numériques dans la recherche quantique** - Les entreprises du numérique de premier plan comme IBM, Google, Microsoft et Honeywell sont engagées dans des initiatives de recherche quantique ambitieuses, développant des ordinateurs quantiques et des technologies connexes.
- **Financement de la recherche** - Le gouvernement américain, par l'intermédiaire de la National Science Foundation (NSF), du Département de l'Énergie (DOE) et de la Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), alloue des ressources importantes pour soutenir la recherche fondamentale et appliquée en physique quantique. De plus, des partenariats public-privé se sont formés, tels que le Quantum Economic Development Consortium (QEDC), pour promouvoir la collaboration entre les entreprises, les universités et les organismes gouvernementaux.
- **Les grandes avancées quantiques** - Les principales découvertes dans le domaine quantique aux États-Unis ont marqué l'histoire de la science. IBM et Google poussent constamment la recherche quantique, comme le témoigne les multiples annonces faites par ces deux géants : Google a dévoilé en 2019 sa puce Sycamore de 54 qubits, alors que l'entreprise IBM a présenté en 2022 son nouveau processeur cumulant 433 qubits et a également annoncé travailler sur un ordinateur de 4158 qubits. Cependant, ces annonces sont à prendre avec de grandes précautions puisque derrière les annonces d'avoir atteint l'avantage quantique de nombreux papiers scientifiques viennent contredire ces affirmations. Toutefois, ces annonces témoignent bien des progrès réalisés dans la capacité à multiplier les qubits dans un même processeur, et à améliorer leur qualité.

### LES CHIFFRES CLÉS



**918 millions**

De \$ investis par le gouvernement en 2022



**157**

Start-up et PME composent l'écosystème quantique aux États-Unis



**79**

Nombre de prix Nobel de physique attribués à des chercheurs américains

### Un plan quantique ambitieux



En juin 2018, les États-Unis ont lancé le **National Quantum Initiative Act** dans le but de favoriser la recherche et le développement dans le domaine de la technologie quantique. Cette initiative a prévu l'allocation totale de **1,275 milliard de dollars** sur une période de cinq ans. Ces fonds ont été répartis entre le département de l'Énergie (625 millions de dollars), la National Science Foundation (250 millions de dollars) et le National Institute of Standards and Technology (400 millions de dollars). Au fil des années, ces budgets ont été **progressivement augmentés**.

Le National Quantum Initiative Supplement to the President's FY 2023 Budget a suivi les différents investissements gouvernementaux au fil des années. Ainsi, les financements fédéraux ont dépassé les 400 millions de dollars en 2019, atteint les 600 millions de dollars en 2020, les 800 millions de dollars en 2021, et on estime qu'ils approcheront les **1 milliard de dollars pour l'année 2022 (918 millions)**. Ces chiffres témoignent de la volonté des États-Unis de maintenir leur position de leader sur la scène internationale des technologies quantiques.

### Une industrie composée de géants mondiaux et de start-ups spécialisés

Le monde de l'industrie est très lié au monde de la recherche fondamentale aux États-Unis. En effet, les géants de l'informatique comme **Google, IBM, Microsoft** sont à la fois acteurs dans la recherche et dans les applications des technologies quantiques. Ces grands acteurs travaillent notamment sur le développement des qubits supraconducteurs. D'autres entreprises, comme **IBM Quantum ou IonQ** axent leurs recherches sur l'informatique quantique, avec le développement de plateformes quantiques et d'algorithmes. La société Intel, bien que plus discrète, travaille aussi sur la création d'un ordinateur quantique, et mise sur les qubits à spin d'électron pour arriver au même niveau que ces principaux concurrents dans le quantique. La société AWS quantique se concentre sur la création de réseaux quantiques permettant de relier les ordinateurs quantiques entre eux.

En parallèle de ces géants du numérique, les États-Unis sont dotés **d'un écosystème de start-ups qui est le plus développé au monde** : 157 start-ups travaillent dans le domaine du quantique en mars 2023 (Source : Olivier Ezratty). Ces start-ups se positionnent sur plusieurs domaines du quantique : [AV1]

- **Matériel quantique**, avec Rigetti Computing ou encore Quantum Circuits Inc., qui travaillent tous les deux sur les qubits supraconducteurs
- **Logiciels et algorithmes**, avec notamment Zapata Computing, qui fournit des plateformes et des logiciels pour la programmation quantique
- **Sécurité quantique**, où les entreprises travaillent notamment sur les technologies de chiffrement quantiques et sur les communications sécurisées (Qrypt, Quantum Xchange...)

Les États-Unis jouent un rôle essentiel à la fois en tant que **producteur et fournisseur de matériel quantique**, mais également en tant que **développeur de solutions logicielles, de plateformes et d'algorithmes de machine learning quantique**.

#### LES FORCES DES ETATS-UNIS

- **Leader mondial** dans la recherche et dans l'industrie quantique.
- Les États-Unis possèdent l'ordinateur quantique **le plus puissant à ce jour**.
- Les États-Unis possèdent l'écosystème d'innovation le plus développé, avec la présence de **nombreuses start-ups** et de **nombreux incubateurs**. Les États-Unis possèdent l'écosystème d'innovation le plus développé, avec la présence de **nombreuses start-up** et de **nombreux incubateurs**.
- Le NIST actualise ses normes afin **d'inclure la cryptographie post-quantique**.

#### LES FAIBLESSES DES ETATS-UNIS

- Les plus gros acteurs du monde du numérique et de l'informatique (Google, IBM, Amazon, Intel, ...) **investissent dans le quantique** comme dans de nombreuses autres technologies avec de gros moyens, mais pas toujours **la même constance que des entreprises plus focalisées**.
- Les États-Unis sont en retrait dans le domaine des **communications quantiques**.

#### Les principales innovations quantiques :

- *Google a affirmé avoir atteint la **suprématie quantique** en 2019, en développant un ordinateur quantique de 53 qubits. Celle-ci est aujourd'hui remise en question par le développement des performances des supercalculateurs.*
- *IBM a lancé en 2022 son nouveau processeur nommé Osprey, **considéré comme l'ordinateur quantique possédant le plus de qubits, soit 433.***

---

# La Chine, principal concurrent des États-Unis ?

La Chine a rejoint la course quantique et connaît une croissance rapide dans ce domaine. Le gouvernement chinois investit massivement dans la recherche, et construit des laboratoires à plusieurs milliards de dollars.

## Des progrès significatifs dans le domaine de la recherche

La Chine ne **joue pas actuellement un rôle majeur dans la recherche fondamentale et appliquée en matière de technologies quantiques**. Le pays a souvent été perçu comme étant plus enclin à s'inspirer des avancées réalisées par les pays occidentaux plutôt que d'être un véritable créateur d'idées. Il est également difficile de discerner la réalité des prouesses technologiques communiquées par la Chine, car il existe des interrogations sur la transparence et la fiabilité des informations publiées. Cependant, il convient de noter que **les chercheurs chinois ont fait des progrès significatifs** dans certains domaines spécifiques des technologies quantiques. La Chine est en compétition avec d'autres pays pour développer **l'ordinateur quantique le plus puissant**, et elle semble être en avance, notamment dans le domaine des qubits à base de photons.

Certaines annonces ont avancé la mise au point d'un circuit optique capable d'effectuer des calculs quantiques appelés "Gaussian Boston Sampling" 100 billions (soit mille milliards) de fois plus rapidement qu'un supercalculateur classique, ainsi que la création d'**un processeur quantique de 62 qubits en 2021**, connu sous le nom de "Jiuzhang 2", dont les capacités de calcul sont estimées être 100 sextillions (soit  $100 \times 10^{36}$ ) de fois plus rapides que les meilleurs ordinateurs conventionnels. Toutefois, ces annonces sont à modérer dans un contexte de forte concurrence technologique. Dans la plupart des cas, les calculs actuellement réalisés par les ordinateurs quantiques **pourraient également être exécutés sur des ordinateurs classiques**, et l'avantage quantique n'est pas encore d'actualité (cf. figure 8).

## Un financement gouvernemental de plus en plus important

Tout comme le Royaume-Uni, le gouvernement chinois a pris **des mesures précoces pour investir dans la recherche quantique**. L'implication du gouvernement chinois dans le développement de la technologie quantique s'est concrétisée à travers plusieurs plans, échelonnés au fil des années. Cependant, il est difficile de déterminer avec certitude les montants exacts alloués par le gouvernement, car certaines publications mentionnent des chiffres qui peuvent sembler extrêmement élevés. Les programmes de développement ont **principalement débuté en 2006 et ont une durée de cinq ans chacun**.

Le premier programme a été lancé avec un investissement de **160 millions de dollars**, suivi par le deuxième programme qui a bénéficié d'un financement de 800 millions de dollars. Le troisième programme a quant à lui reçu un investissement de 320 millions de dollars, complété par un financement de 640 millions de dollars provenant des régions. **En 2021, la Chine a annoncé un nouveau programme avec une augmentation de 11 % du financement global** consacré à la recherche quantique. À l'heure actuelle, nous disposons de peu d'informations sur les détails et les montants de ce dernier programme de développement.

## Une industrie portée par des géants du numérique

Contrairement aux grandes puissances européennes, **la Chine ne possède pas un écosystème de start-ups très développé** dans le domaine quantique. Cependant, elle peut compter sur quelques acteurs majeurs qui sont fortement impliqués à la fois dans la recherche et l'industrie. Parmi ces acteurs, on retrouve **Alibaba**, qui a investi dans la création de l'Alibaba Quantum Computing Laboratory, un laboratoire spécialisé dans la cryptographie et les calculs quantiques.

Une autre entreprise notable est **Baidu**, le troisième site Web le plus visité au monde en 2019 et un moteur de recherche populaire en Chine. En 2018, Baidu a créé l'Institute for Quantum Computing, qui se consacre à la recherche quantique. Cet institut travaille notamment sur les logiciels, les émulations quantiques et une variété d'outils liés aux technologies quantiques.

**D'autres grandes entreprises chinoises** se sont également investies dans le développement du quantique, **telles que Tencent et ZTE**. Bien que l'écosystème des start-ups quantiques en Chine ne soit

pas aussi développé que dans certaines autres régions, la présence de ces entreprises renforce la recherche et le développement dans le domaine quantique en Chine.

#### LES FORCES DE LA CHINE

- Fort de leur volonté de rattraper les États-Unis notamment, **la Chine investit massivement**, et se retrouve à la pointe de la technologie.
- La Chine s'appuie **sur des grands acteurs industriels** pour se développer.
- La Chine travaille sur **des prototypes de calcul à qubits photons**.
- La Chine est pionnière en matière **de communication quantique, notamment via satellite**.

#### LES FAIBLESSES DE LA CHINE

- L'écosystème de **start-ups** chinois est **très peu développé**, ce qui peut être un frein à l'innovation.
- La recherche chinoise s'est inspirée des progrès réalisés à l'échelle internationale, bien que ces derniers temps, elle tende **à devenir de plus en plus autonome**.

# Le Royaume-Uni, leader Européen et pionniers dans le domaine quantique

Dès 2013, le gouvernement britannique a financé la recherche fondamentale dans le domaine du quantique, ce qui permet au Royaume-Uni de s'offrir une place de choix dans le développement du secteur à l'échelle européenne, mais aussi mondiale.

## Des centres de recherches actifs dans tout le pays

Le Royaume-Uni peut s'appuyer **sur ses nombreux centres de recherche** pour développer les technologies quantiques. Ainsi, une trentaine d'universités, regroupées en quatre pôles (hub), ont engagé des projets de recherche sur les technologies quantique :

- **Le UK Quantum Technology Hub Sensors and Timing**, consacré notamment à la métrologie et aux solutions de mesure du temps. L'université au centre de ces technologies est l'université de Birmingham.
- **Le Quantic Hub**, également spécialisé dans la métrologie et notamment dans l'imagerie quantique. L'université au centre de ce dernier est l'université de Glasgow.
- **Le Quantum Computing & Simulation Hub**, consacré aux problématiques de calculs et de sécurité (création d'un réseau d'ordinateurs quantiques à ions piégés). L'université au cœur de ce regroupement est l'université d'Oxford.
- **Quantum Communications Hub**, dédié aux technologies de communication quantique, avec comme centre l'université de York.

Le Royaume-Uni peut également compter **sur ses chercheurs et professeurs renommés en physique quantique** notamment, comme David Deutsch, créateur de l'algorithme de Deutsch-Jozsa, ou encore Thorsten Altenkirch et Jonathan Gratage, créateurs du langage QML.

## Deux plans de développement dépassant les 3 milliards de livres sur 20 ans

Le Royaume-Uni est l'un des premiers pays à lancé un plan de développement des technologies quantiques, le « **UK National Quantum Technologies Program** ». Ce dernier est lancé en novembre 2013, et représente un financement gouvernemental de 270 millions de livres. Une augmentation du budget gouvernemental de 350 millions de livres a eu lieu en 2019. Si l'on additionne l'investissement public et privé, ce plan dépasse les 1,2 milliard de livres.

**Un nouveau plan national de développement des technologies quantiques** (la *National Quantum Strategy*) a été annoncé par le gouvernement britannique, Celui-ci s'étalera sur 10 ans, comme son prédécesseur. Cependant, le gouvernement allouera cette fois-ci **2,5 milliards de livres**, et estime que ce plan pourrait générer 1 milliard de livres d'investissement privé. Ce plan de développement a pour objectifs de :

- Faire partie des premiers pays en termes de développement des compétences quantiques et de recherche
- Soutenir les entreprises pour faire du Royaume-Uni un lieu incontournable de la chaîne d'approvisionnement des technologies quantiques et pour attirer les investisseurs
- Utiliser et tirer profit du quantique dans l'économie, la santé et dans la sécurité nationale du Royaume-Uni
- Créer un cadre réglementaire national et international pour soutenir l'innovation et l'utilisation des technologies quantiques.

Le gouvernement britannique reconnaît l'importance de la recherche quantique et a investi des fonds substantiels pour soutenir les initiatives dans ce domaine. En 2018, il a annoncé **un financement de 315 millions de livres** pour lancer le programme **Quantum Technologies Challenge**, qui vise à accélérer le développement et la commercialisation des technologies quantiques au Royaume-Uni.

Ce qui différencie le Royaume-Uni des autres pays, c'est également son approche innovante en matière de financement des start-ups quantiques. Par exemple, IpGroup a créé un fonds de financement de 12 millions

### LES CHIFFRES CLÉS



**400**

Docteurs sortis de plus de 30 universités



**2,5 milliards**

De £ pour le prochain plan gouvernemental 2024-2034



**Plus de 70**

Start-ups, ce qui place le Royaume-Uni en deuxième position derrière les États-Unis

de livres spécifiquement dédié aux start-ups du domaine quantique. Cette initiative vise à soutenir financièrement ces entreprises émergentes et à favoriser leur croissance. **Les investissements privés sont importants au Royaume-Uni**, et sont très corrélés à la valeur des financements du gouvernement. Ces efforts de financement et d'incubation des start-ups quantiques au Royaume-Uni témoignent de l'engagement du pays à promouvoir et à soutenir le développement de la recherche et de l'industrie quantiques.

### Une industrie quantique florissante

Le Royaume-Uni est un acteur majeur dans le domaine des technologies quantiques, avec plus de **70 start-ups dédiées à leur développement et à leur production**<sup>[AV2]</sup>. Il occupe la deuxième place mondiale en termes de nombre de start-ups, juste derrière les États-Unis et le Canada. Parmi ces entreprises, certaines se distinguent par leurs domaines d'expertise spécifiques. Par exemple, Oxford Instruments se concentre sur la **cryogénie**, un aspect essentiel de la recherche quantique. Oxford Quantum Circuits se spécialise dans les qubits supraconducteurs et **a même développé l'ordinateur quantique du Royaume-Uni, qui est composé de huit qubits**. ORCA Computing se focalise quant à elle sur les qubits photoniques.

*L'entreprise **Oxford Quantum Circuits** est la seule entreprise du Royaume-Uni à posséder l'ordinateur quantique. L'ordinateur qu'ils ont développé, baptisé **Lucy**, est composé de **8 Qubits**.*

Le secteur quantique au Royaume-Uni se concentre principalement **sur l'informatique quantique et la communication quantique**. On dénombre plus de **200 entreprises** travaillant dans le domaine de l'informatique quantique. En ce qui concerne la communication, **un réseau commercial à sécurité quantique** a été mis en service il y a environ un an grâce à une collaboration entre Toshiba et BT. Le cabinet EY figure parmi les premiers clients de ce nouveau réseau et l'utilise pour relier deux de ses sites à Londres.

#### LES FORCES DU ROYAUME-UNI

- Une **recherche à la pointe de la technologie** poussée par la présence de nombreux instituts et laboratoires.
- Le Royaume-Uni est le leader en matière de **capteurs quantiques**.
- Un écosystème de **startups développé poussant le Royaume-Uni à l'innovation**.
- Le gouvernement britannique a anticipé le développement du quantique en lançant **dès 2013 une stratégie de développement et des financements significatifs**.

#### LES FAIBLESSES DU ROYAUME-UNI

- Les technologies sont encore **en retrait par rapport aux grandes puissances du quantique** (8 Qubits pour le Royaume-Uni contre 433 aux États-Unis).

# L'Allemagne, un acteur important du développement quantique Européen

Bien que l'Allemagne ait commencé à investir dans le domaine quantique relativement tardivement, elle reste un acteur européen incontournable, accueillant notamment un ordinateur quantique de la société IBM sur son territoire.

## L'Allemagne, pionniers et acteurs majeurs de la recherche quantique

L'Allemagne abrite **plusieurs instituts de recherche engagés** de manière visible dans les technologies quantiques. Les principaux piliers de la recherche quantique en Allemagne sont la Fraunhofer-Gesellschaft, la Helmholtz-Gemeinschaft, la société Max-Planck ainsi que l'organisation mère de l'écosystème, la Deutscher Quantum Gemeinschaft.

Les différents instituts allemands sont classés selon plusieurs niveaux et spécialités technologiques :

- **Plusieurs agences fédérales** travaillent simultanément sur la métrologie, notamment le PTB, ainsi que sur la cybersécurité et l'aérospatial.
- L'Allemagne s'appuie également **sur des réseaux de recherche** tels que le réseau **Fraunhofer** ou l'Association **Leibniz**. Ces réseaux regroupent souvent des laboratoires, des instituts et des groupes de recherche. C'est à l'institut Fraunhofer que l'ordinateur quantique Q System One d'IBM est installé. Cet ordinateur de 27 qubits permet depuis 2021 aux universités, aux organismes de recherche et aux industriels de concevoir et tester des applications quantiques.
- Parmi les laboratoires impliqués dans la recherche quantique, le **Max Planck Institute for Quantum** se distingue particulièrement par ses travaux sur la cybersécurité. Il fait partie du Munich Center for Quantum Science and Technology, un centre qui réunit plusieurs acteurs majeurs de la recherche quantique, tels que le **Walther-Meißner-Institute for Low Temperature Research (WMI)** ainsi que les deux grandes universités de Munich. Ce centre couvre tous les domaines technologiques liés à la physique quantique.
- Enfin, de grandes universités participent également à la recherche et à l'enseignement des technologies quantiques, **comme l'Institute for Complex Quantum Systems ou le groupe Theoretical Quantum Physics** à l'université de Sarrebruck.

### LES CHIFFRES CLÉS



**2 milliards**

*D'euros de financements annoncés de 2018 à 2025 pour les technologies quantiques*



**55**

*Entreprises travaillant dans le domaine du quantique en 2021*

## Des initiatives de développement significatives, bien que tardives

À l'instar de la France, **le gouvernement allemand a tardivement commencé à financer de manière significative** la recherche fondamentale et appliquée. Ce n'est qu'en 2018 que le ministère fédéral de la Recherche a annoncé un financement de **650 millions d'euros**, répartis sur une période de quatre ans. En juin 2020, le gouvernement a annoncé une augmentation de ce financement, le portant à **2 milliards d'euros**. Ce financement a bénéficié à une variété de projets, majoritairement axés sur le développement de qubits supraconducteurs et d'ordinateurs quantiques. En 2021, ce plan de financement a été divisé en deux parties : 1,1 milliard d'euros alloués au ministère fédéral de la Recherche et de l'Éducation, et 878 millions d'euros alloués au ministère fédéral des Affaires économiques et de l'Énergie. En plus de ces projets nationaux, l'Allemagne dirige ou participe à plusieurs programmes de développement européens, tels que **MetaboliQs, UNIQORN, S2QUIP et QRANGE**.

## Une industrie qui s'intéresse au quantique

Ces dernières années, le réseau de start-up en Allemagne s'est développé et compte actuellement une **vingtaine d'entreprises**, dont Avonetix dans les algorithmes hybrides, PicoQuant dans le comptage des photons, et InfiniQuant dans le domaine de la cryptographie. Certains grands industriels du pays, issus de divers secteurs, s'intéressent également aux technologies quantiques, tels que **BASF** dans le secteur de la

chimie, **Merck** dans le domaine de la santé, **Deutsche Telekom** dans les télécommunications, **Bosch et Daimler** dans la fabrication de composants et d'automobiles.

D'autres grandes entreprises multinationales, telles que **BMW et Volkswagen**, intègrent les technologies quantiques dans leurs activités. BMW collabore notamment avec **la start-up française Pasqal** pour améliorer ses processus de fabrication, tandis que Volkswagen s'associe à plusieurs start-ups à l'échelle internationale, comme D-Wave, pour **améliorer les performances de ses batteries** et résoudre des problématiques de gestion de flux et de trafic.

Plusieurs projets réunissent des entreprises allemandes, comme le Quantum Technology and Application Consortium, dont l'objectif principal est de développer des applications concrètes des calculs quantiques dans des secteurs tels que la chimie, la pharmacie et la finance.

### LES FORCES DE L'ALLEMAGNE

- Un des principaux points forts de l'Allemagne est **sa capacité de recherche**. Certains de ses laboratoires font partie des plus renommés au monde.
- L'Allemagne voit son écosystème de start-ups évoluer, **même s'il n'est pas encore au niveau** de celui du Canada par exemple.

### LES FAIBLESSES DE L'ALLEMAGNE

- Le gouvernement **a mis du temps avant de lancer sa stratégie quantique** et de financement significatif de la recherche.
- La création de l'écosystème quantique en Allemagne **est encore en plein développement**. La création de partenariats et le renforcement du dynamisme de cet écosystème permettront à l'Allemagne de renforcer sa position dans le domaine du quantique.
- **L'écosystème de start-ups demeure peu développé** et aucune ne fournit le pays en ordinateur quantique l'obligeant à se fournir dans d'autres pays.

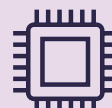
# La Finlande, experte de la cryogénie

Identifier une spécialité quantique parmi les pays étudiés peut parfois s'avérer compliqué, mais la Finlande se démarque clairement grâce à ses compétences dans le domaine de la cryogénie quantique. En tant qu'acteur important sur la scène internationale, le pays occupe une position privilégiée dans ce domaine. Cette expertise a permis à IQM, entreprise Finlandaise, de construire un ordinateur quantique de 5 qubits.

La Finlande se distingue sur la scène mondiale de la recherche quantique grâce à des entreprises leaders dans des domaines clés.

- L'entreprise **Bluefors** a su se positionner en tant que **leader mondial de la cryogénie**, une technologie essentielle dans la fabrication des ordinateurs quantiques. Cette expertise solide permet à la Finlande de se positionner en tant qu'acteur majeur dans la course aux technologies quantiques.
- Dans le domaine des qubits supraconducteurs, la start-up IQM joue un rôle prépondérant. Non seulement elle est **la plus importante et la mieux financée des start-ups travaillant sur cette technologie en Finlande**, mais elle a également réussi à construire **le premier ordinateur quantique du pays, doté de 5 qubits**<sup>[AV3]</sup>. Bien que représentant une avancée pour la Finlande, cette réalisation **met en évidence le retard** que la start-up a accumulé dans le développement de **ses propres processeurs** quantique, surtout en comparaison avec **d'autres acteurs majeurs dans le domaine quantique**.

## LES CHIFFRES CLÉS



**20**

Nombre de qubits de l'ordinateur quantique de l'entreprise finlandaise IQM



**10 millions**

D'euros investis par le gouvernement dans le regroupement de centres de recherche

En 2022, la Finlande a lancé un regroupement de centres de recherche et d'acteurs industriels, **soutenu par un financement de 10 millions d'euros**. Ce groupement d'experts travaille sur toutes les facettes des technologies quantiques, allant de la cryogénie aux logiciels en passant par le matériel.

## LES FORCES DE LA FINLANDE

- La Finlande possède **des entreprises reconnues** sur la scène internationale.
- La société **Bluefors** possède une expertise de grande valeur dans le champ de **la cryogénie**, et sa renommée s'étend à **l'échelle mondiale**.

## LES FAIBLESSES DE LA FINLANDE

- Le domaine de la recherche n'occupe **pas une place importante** dans le développement du quantique en Finlande.
- Les financements publics sont **très limités**
- La Finlande **n'a pas lancé de plan de développement**
- La Finlande **est en retard** sur le développement de l'ordinateur quantique



# L'Italie, un acteur plus en retrait dans la recherche quantique

L'Italie bénéficie de la présence de chercheurs de renommée internationale, ce qui lui offre une opportunité de se positionner sur la scène mondiale. Toutefois, le retard de développement de son industrie limite sa capacité à proposer des solutions appliquées, contrairement à d'autres pays européens.

Dans le cadre de son plan de relance, le gouvernement italien a récemment annoncé un **financement de 1,6 milliard d'euros** destiné à soutenir sept centres de recherche à travers le pays, dont l'un est spécifiquement dédié aux technologies quantiques. L'Italie se distingue par son dynamisme dans le domaine de la recherche, en particulier dans **l'exploration des différentes technologies de computation quantique**.

Parmi les chercheurs italiens les plus actifs, **Francisco Tafuri** de l'université de Naples mène des recherches approfondies sur les qubits supraconducteurs, tout **comme l'Institut National Italien de Physique Nucléaire**. Ces travaux contribuent à l'avancement des connaissances et des compétences dans le domaine prometteur des qubits quantiques supraconducteurs. Cependant, **la plupart des chercheurs quantiques italiens sont en France**, comme Anna Minguzzi ou Silvano de Franceschi : le nombre de postes de recherche ouverts en Italie **est très faible**, et les financements publics pour le développement **des technologies quantiques sont rares**.

En outre, l'Italie a également mis en place **l'Italian Quantum Backbone**, un réseau de fibre optique d'environ **1850 kilomètres de long**. Cette infrastructure permet de faciliter la communication et l'échange d'informations entre les différentes institutions et centres de recherche impliqués dans les technologies quantiques.

Un autre acteur clé dans le paysage italien de la recherche quantique est **l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica** basé à Turin. Cet institut se spécialise dans le codage de la polarisation des photons via des satellites, contribuant ainsi aux avancées de la communication quantique sécurisée.

Néanmoins, bien que l'Italie soit très active dans la recherche, **elle manque d'acteurs industriels significatifs dans le domaine**, ce qui limite son potentiel de développement en matière d'applications concrètes des technologies quantiques. C'est un défi que le pays s'efforce de relever afin de combler l'écart avec d'autres nations plus avancées dans ce domaine.

## LES CHIFFRES CLÉS



**1850 kms**

*De réseau de fibre optique permettant la communication entre les différents centres de recherche quantique.*



**1,6 milliard**

*D'euros destinés à soutenir 7 centres de recherche, dont l'un est dédié aux technologies quantiques*

### LES FORCES DE L'ITALIE

- L'Italie est dotée de **centres de recherche importants** à l'échelle européenne.
- L'Italie se spécialise dans **la communication quantique**, en créant l'un des réseaux de communication les plus importants au monde.

### LES FAIBLESSES DE L'ITALIE

- L'écosystème industriel quantique en Italie est très pauvre, ce qui freine l'innovation, surtout en matière d'application.
- L'Italie n'a pas de plan de développement dédié au quantique. L'Italie **finance le quantique** dans le cadre de son plan de relance, mais nous n'avons pas d'information quant au montant exact alloué aux technologies quantiques.

---

# Le Canada porté par une industrie en plein développement

Le Canada est un acteur de taille dans le domaine du quantique, que ce soit dans le secteur de la recherche fondamentale et appliquée, ou dans le monde de l'industrie. Le pays s'appuie sur des entreprises pionnières en la matière, et notamment sur D-Wave, faisant ainsi du Canada une puissance quantique à part entière.

## Une recherche fragmentée en plusieurs écosystèmes indépendants

L'influence du pays dans les technologies du quantique est **largement supérieure à son poids économique sur la scène internationale**, et notamment en recherche fondamentale. Le Canada possède plusieurs grands acteurs de la recherche internationale, et notamment **Gilles Brassard** (Université de Montréal) qui a coinventé le protocole « Quantum Key Distribution BB84 » avec Charles Bennett (IBM Research). Ce protocole est reconnu comme étant le pionnier en matière de cryptographie quantique. Il représente le premier mécanisme formellement établi pour l'échange de clés quantiques.

L'environnement de la recherche est fragmenté en plusieurs écosystèmes relativement indépendants les uns des autres. Ils sont répartis sur quatre provinces :

- **L'Ontario** avec notamment l'Institute for Quantum computing de l'université de Waterloo, très présent dans le domaine de la recherche fondamentale, mais aussi sur l'enseignement. Cet institut couvre plus ou moins tous les domaines du quantique. Il est composé d'une trentaine d'équipe de chercheurs, d'une cinquantaine de doctorants ayant fini leur thèse, et de plus de 120 thésards.
- **La région d'Alberta** peut notamment s'appuyer sur l'université de Calgary qui travaille notamment sur les communications quantiques, tout comme l'université d'Alberta. Ces deux universités travaillent ensemble sur la création d'un réseau quantique de quelques dizaines de kilomètres.
- **Le Québec** avec notamment l'université de Sherbrooke. Cette université est très en lien avec le monde de l'industrie, et forme des étudiants avec leur programme QSciTech, créé en partenariat avec des industriels spécialisés dans les technologies quantiques.
- **La Colombie-Britannique**, berceau de l'University of British Columbia et de l'entreprise D-Wave et 1QBIT.

### LES CHIFFRES CLÉS



**360 millions**

De \$ CAN annoncés par le gouvernement entre 2021 et 2028



**60**

Startup composent l'écosystème quantique au Canada



**150**

Acteurs spécialisés dans le secteur du quantique

## Près de 15 ans d'investissements dans les technologies quantiques

Le gouvernement canadien a annoncé avoir investi **plus d'un milliard de dollars canadiens entre 2009 et 2020**. Le gouvernement canadien a également annoncé le lancement de sa stratégie quantique nationale, qui a pour principaux objectifs de :

- Faire du Canada un chef de file mondial dans le déploiement et l'utilisation des technologies quantiques, au profit de son industrie, de son gouvernement et de ses citoyens.
- Assurer la protection de la vie privée et la cybersécurité des Canadiens, grâce à un réseau de communication quantique national
- Permettre au gouvernement et aux industries canadiennes de rapidement adopter les nouvelles technologies de détection et de métrologie quantique.

Cette stratégie est accompagnée **d'un plan de financement de 360 millions de dollars canadiens**. Pour atteindre ces objectifs, le Canada soutiendra massivement la recherche fondamentale et appliquée dans la physique quantique notamment, développera son offre de formation et s'efforcera d'attirer de nouveaux talents dans son écosystème, et transformera la recherche en produits commerciaux pouvant bénéficier aux industries canadiennes et au reste du monde

## Une industrie quantique développée

De la même manière que dans le domaine de la recherche fondamentale, le Canada abrite un écosystème de start-up florissant, **le plaçant à la deuxième position** dans cette catégorie pour les levées de fonds (1 060 millions de dollars, d'après Olivier Ezratty), juste derrière les États-Unis.

D'autres acteurs importants, **comme D-Wave, 1QBIT ou Nord Quantique**, travaille depuis plus de 10 ans sur le développement des technologies quantiques.

- D-Wave utilise des qubits supraconducteurs pour réaliser des calculs quantiques. Ses ordinateurs sont utilisés pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes, notamment dans les domaines de l'intelligence artificielle et de la logistique. D-Wave est spécialisée dans **le recuit quantique**, une approche différente de celle des acteurs majeurs du quantique qui se basent sur les portes quantiques, bien que D-Wave ait annoncé en 2021 travailler sur cette dernière méthode. Cependant, **aucun résultat tangible** n'a encore vu le jour concernant cette dernière catégorie de processeur. L'entreprise propose également des services, **notamment en mettant à disposition des machines quantiques via le cloud**<sup>[AV4]</sup>, à de grandes entreprises telles que **Volkswagen, Accenture et BBVA**.
- **1QBit** joue également un rôle important dans le développement et l'application pratique de l'informatique quantique. Elle met l'accent sur les solutions aux problèmes du monde réel. Bien qu'étant très avancé dans le domaine du matériel informatique quantique, le Canada a également développé **le domaine des logiciels**. Cependant, l'entreprise ne propose aucune application commerciale à ce jour.
- D'autres entreprises travaillent sur le calcul quantique au Canada, comme **Xanadu**. De nombreuses start-ups se concentrent sur les plates-formes logicielles et les algorithmes, telles que **Menten AI, SoftwareQ et ReactiveQ**. Certaines start-ups se sont également spécialisées dans la cybersécurité, comme **Quantropi et Quantum Numbers Corp**, ainsi que dans le domaine des capteurs, avec des exemples tels que **GEM Systems et Qubic**.

### Les premières innovations du Canada :

- *D-Wave a lancé en 2011 le premier ordinateur basé sur des technologies quantiques*
- *1QBIT a été reconnue comme la première entreprise de logiciel dédiée à la production d'applications commerciales pour les ordinateurs quantiques en 2015*
- *Xanadu a créé PennyLane, le premier logiciel d'apprentissage automatique destiné aux ordinateurs quantiques. L'entreprise est également reconnue pour ses avancées dans le calcul quantique.*

### LES FORCES DU CANADA

- Un poids dans la recherche internationale **largement supérieur à son poids dans l'économie mondiale**.
- Des start-ups au cœur du développement des technologiques. Le Canada se positionne **en deuxième position**, après les États-Unis, concernant le financement de son écosystème de startups.
- Le Canada abrite des entreprises fondamentales de la recherche, quantique, avec **notamment D-Wave et 1QBIT**.

### LES FAIBLESSES DU CANADA

- La recherche au Canada dans le domaine quantique est caractérisée par une **fragmentation importante**, contrairement aux grandes puissances quantiques qui regroupent instituts, laboratoires, universités et entreprises dans des communautés de recherche.

# L'Australie, acteur ambitieux du développement quantique

L'Australie souhaite développer les technologies quantiques et leurs utilisations au sein de son territoire. Pour ce faire, le pays a mis en place une stratégie ambitieuse de développement, et compte bien stimuler le secteur de l'industrie pour le faire évoluer.

En 2020, le gouvernement australien a **lancé sa stratégie de développement quantique** avec pour objectif de faire du secteur quantique un marché de plus de **4 milliards de dollars**, créant ainsi **16 000 emplois d'ici 2040**. [AV5]

En ce qui concerne le financement public de la recherche scientifique, **l'Australie a alloué 820 millions de dollars** sur une période de 4 ans à partir de 2015, dont 19 millions pour la recherche quantique. De plus, le gouvernement a investi 33,7 millions de dollars dans la création du Centre d'Excellence en Calcul quantique et Technologie des Communications. En novembre 2021, le gouvernement a également annoncé une augmentation de 80 millions de dollars pour soutenir davantage cette initiative.

Du côté des entreprises, l'Australie a principalement **3 start-ups dans le domaine quantique** : QuintessenceLabs, spécialisé dans la distribution des clés quantiques, Silicon Quantum Computing, travaillant sur les qubits en silicium, Archer dans le domaine qubits à spin d'électrons, ou encore QxBranch, firme américaine implantée en Australie et spécialisée dans les logiciels et le conseil aux entreprises.

En matière de recherche, **plusieurs centres d'excellence en Australie** attirent des groupes de chercheurs de renommée mondiale, dont l'un des plus remarquables est le groupe du **CQC2T**. Ce groupe est **l'un des pionniers mondiaux** dans la fabrication de dispositifs atomiquement précis en silicium. De plus, les équipes de recherche australiennes se démarquent également en produisant les qubits à temps de cohérence le plus long dans l'état solide.

## LES CHIFFRES CLÉS



**4 milliards**

*Prévision de la taille du marché quantique à horizon 2040*



**19 millions**

*De \$ investis par le gouvernement de 2015 à 2019*

## LES FORCES DE L'AUSTRALIE

- **L'Australie a beaucoup d'ambition** dans le développement du quantique au sein du pays. Le gouvernement souhaite **investir massivement** pour arriver à ses objectifs.
- L'Australie accueille **des centres de recherche d'excellence**, comme le CQC2T et a développé une expertise dans les qubits en silicium.
- L'Australie a signé un partenariat avec la société Microsoft en ce qui concerne l'électronique de contrôle.

## LES FAIBLESSES DE L'AUSTRALIE

- L'Australie compte **très peu d'entreprises dans son écosystème**.
- L'Australie fait face à des limitations dans son développement quantique en raison **d'un nombre d'infrastructures relativement restreint** par rapport à d'autres puissances quantiques.

# La Corée du Sud, terre d'accueil des géants de la télécommunication

La Corée du Sud est présente dans la course au quantique internationale grâce à certains géants du numérique et de la télécommunication, comme Samsung ou SK Telekom.

Jusqu'à présent, la Corée du Sud ne s'est pas beaucoup concentrée sur les technologies quantiques. Les principaux axes de développement sont portés par **les géants des télécommunications, à savoir SK Telecom et Samsung** :

- SK Telecom investit de manière significative dans le domaine quantique depuis une dizaine d'années environ. La société s'est associée à la Florida Atlantic University pour renforcer ses capacités de recherche. De plus, SK Telecom a établi une alliance quantique appelée "**Quantum Alliance**" avec Nokia et l'entreprise allemande Deutsche Telekom, dans le but de développer des télécommunications quantiques sécurisées [AV6].
- Samsung investit également de manière significative dans **les télécommunications quantiques**. Ils ont même intégré un générateur de nombres aléatoires quantiques à l'un de leurs smartphones destinés au marché sud-coréen.

Plusieurs organismes de recherche sud-coréens se consacrent aux technologies et à la physique quantique, **notamment l'Institut coréen de recherche scientifique et technologique avancée (KAIST) et l'Institut coréen de science et technologie (KIST)**. Cependant, la recherche sud-coréenne dans ce domaine est relativement discrète sur la scène internationale.

En ce qui concerne les financements gouvernementaux pour les technologies quantiques, il n'est pas facile d'obtenir des chiffres précis. Cependant, le gouvernement a **récemment annoncé un plan de développement quantique** représentant un financement de **2,6 milliards de \$**. Ce plan s'étalera sur 12 ans, et combinera financements publics et privés. Ces financements privés seront notamment accordés par les entreprises sud-coréennes telles que **Samsung, SK Telecom ou Hyundai**.

## LES CHIFFRES CLÉS



**1 milliard**

De \$ annoncé en 2023 pour le plan quantique de la Corée du Sud



**800 Kms**

De réseau de distribution de clés quantiques regroupant 48 organisations sud-coréennes

## LES FORCES DE LA CORÉE DU SUD

- **Samsung et SK Telekom**, les deux géants du numérique installés en Corée du Sud, poussent la recherche et l'innovation dans le domaine du quantique.
- Le gouvernement **prévoit d'investir massivement** dans la recherche et le développement du quantique.

## LES FAIBLESSES DE LA CORÉE DU SUD

- La volonté du gouvernement de développer et de financer les technologies quantiques est **assez récente**.
- Le réseau de start-ups de la Corée du Sud est **très peu développé**. Le réseau de start-ups de la Corée du Sud est **très peu développé**.

---

# Le Japon, en quête de rattraper les États-Unis et la Chine

À la pointe de la technologie dans de nombreux domaines, mais surtout le numérique, le Japon souhaite développer son expertise quantique pour pouvoir rivaliser avec les grosses puissances mondiales.

## Le Japon, pionnier dans la recherche quantique

Le Japon se distingue par son implication précoce dans la recherche quantique. En 1999, Yasunobu Nakamura et Jaw Shen Tsai ont réalisé une avancée majeure en créant **le premier qubit supraconducteur**. La diversité des organismes de recherche présents dans le pays permet au Japon de se positionner **à la pointe de la technologie quantique**. Parmi les principaux organismes investis dans la recherche quantique, on trouve le **Japan Science and Technology Agency**, qui travaille sur une machine quantique macroscopique regroupant 100 qubits depuis 2016. **Le National Institute of Informatics** se concentre également sur la création de qubits supraconducteurs et les calculs quantiques. **L'Institute of Physical and Chemicals Research**, quant à lui, se consacre aux théories quantiques fondamentales, à la photonique et à la création de qubits en silicium. Le Japon peut s'appuyer sur des chercheurs de renommée internationale tels **que Akira Furusawa, Yoshihisa Yamamoto et Yasunobu Nakamura**, ce qui renforce encore sa position dans le domaine de la recherche quantique.

## Des plans de développement pour rattraper les grandes puissances quantiques

Au Japon, le **projet Q-LEAP** (Quantum Leap Flagship Program) constitue l'initiative majeure de développement quantique. Ce programme ambitieux vise à positionner le Japon en tant que **concurrent face à la Chine et aux États-Unis** dans le domaine quantique. Le projet Q-LEAP est pensé pour s'étendre jusqu'en 2039, ce qui en fait l'un des programmes de développement quantique **les plus longs et les plus étendus**. Il couvre pratiquement tous les aspects des technologies quantiques. En termes de financement, le gouvernement a alloué une enveloppe de plus de **200 millions de dollars** sur une période de dix ans. Cette initiative démontre l'engagement du Japon à investir dans le développement de la recherche et de l'industrie quantiques.

## Une industrie spécialisée dans le « software »

L'industrie japonaise se concentre principalement sur **les logiciels quantiques**, et de nombreuses start-ups se spécialisent dans le calcul quantique en utilisant soit les **recycleurs quantiques D-Wave**, soit **les recycleurs numériques Fujitsu**. Les grands groupes tels que **Toshiba** jouent un rôle important dans le domaine de la cryptographie et de la communication quantique sécurisée. Par ailleurs, l'entreprise américaine IBM a investi au Japon et a établi un laboratoire quantique en partenariat avec l'université de Tokyo en 2019. Récemment, un autre partenariat a été signé **entre IBM, l'université de Chicago et l'université de Tokyo** afin de développer l'informatique quantique. D'autres grandes entreprises travaillent sur les technologies quantiques et sont très actives dans le domaine de la recherche, comme **Hitachi, Fujitsu ou NEC**. C'est d'ailleurs cette dernière (NEC) qui avait pour la première fois réussi à créer le premier qubit solide capable de réaliser des opérations.

Dans le secteur de la cryptographie et de la communication quantique sécurisée, les entreprises japonaises sont à l'avant-garde, cherchant à **développer des solutions de chiffrement quantique robustes et fiables** pour renforcer la sécurité des communications. Ces avancées technologiques renforcent la position du Japon en tant que leader dans le domaine de la sécurité quantique.

### LES CHIFFRES CLÉS



**1999**

*Année de création du premier qubit supraconducteur japonais*



**276 millions**

*De \$ annoncés de 2019 à 2027 par le gouvernement dans le cadre du projet Q-LEAP*

### LES FORCES DU JAPON

- Le Japon se concentre **sur la partie software du quantique**, et sera sûrement en avance quand les technologies arriveront à maturité.
- Le gouvernement japonais a annoncé un **plan important de développement du quantique (Q-LEAP)**

### LES FAIBLESSES DU JAPON

- Le Japon **finance moins les technologies quantiques** que la plupart des pays développés

# LE POSITIONNEMENT INTERNATIONAL DE LA FRANCE

## Synthèse du positionnement des principaux pays impliqués dans la course aux technologies quantiques <sup>[AV7]</sup>

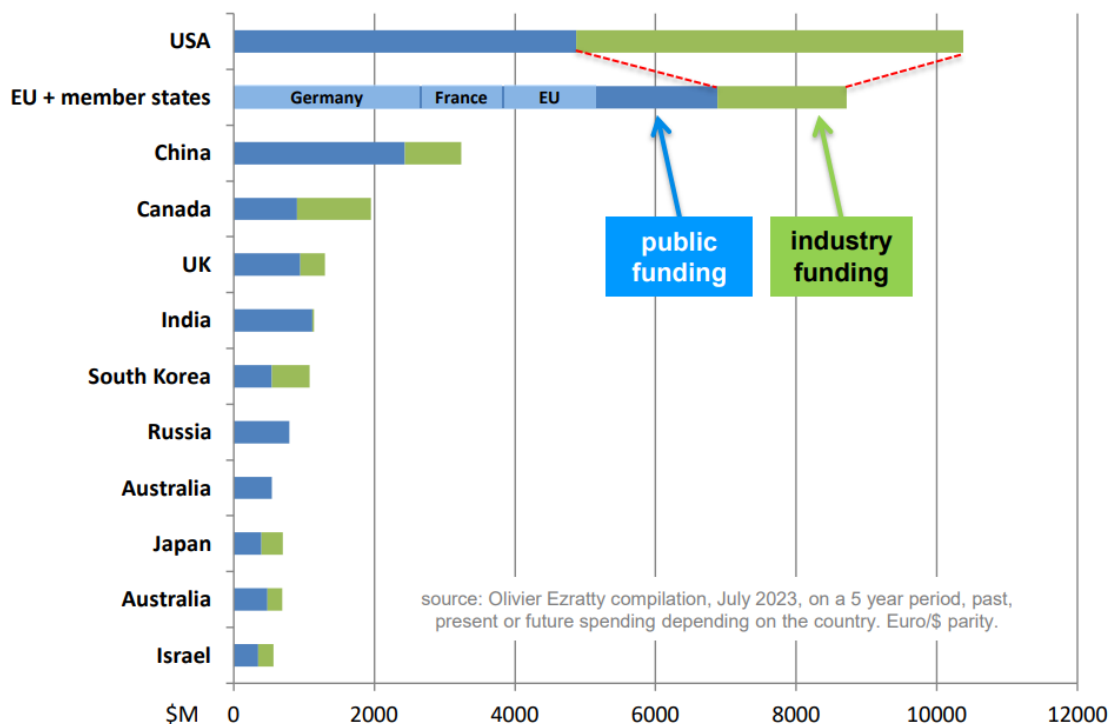
	Technologies				Développement national		Recherche	Industrie	
	Informatique	Métrologie	Communication	Cryptographie	Plan national	Financements publics récents	Recherche	Ecosystème de startup	Multinationale
USA	✓	✓	✓	✓	✓	918 millions de \$ en 2022	✓	✓	✓
Chine	✓	≈	✓	≈	✓	960 millions de \$ de 2016 à aujourd'hui	≈	✗	≈
Royaume-Uni	✓	≈	✓	≈	✓	620 millions depuis 2013	✓	✓	≈
Allemagne	✓	≈	≈	≈	✓	>2 milliards d'€ de 2018 à 2025	✓	✓	≈
Finlande	✓	✗	✗	✗	✗	10 millions d'€ de 2022 à 2025	≈	≈	✗
Italie	≈	✗	✓	≈	✗	NA	✓	✗	✗
Canada	✓	✓	✓	✓	✓	360 millions de \$ CAN de 2021 à 2028	✓	✓	✗
Australie	✓	✓	✓	✗	✓	19 millions de \$ de 2015 à 2020	✓	≈	✗
Corée du Sud	≈	✗	✓	✓	✓	2,6 milliards de \$ de 2023 à 2035	≈	✗	✓
Japon	✓	≈	✓	✓	✓	276 millions de \$ de 2019 à 2027	✓	✗	✓
France	✓	✓	≈	✓	✓	1,8 milliard d'€ de 2021 à 2025	✓	✓	≈

**Note** : les montants des financements publics récents correspondent aux **montants annoncés** par les gouvernements dans le cadre de stratégie de développement et sont **répartis sur des périodes différentes**. Un **décalage** entre les annonces gouvernementales et la mise en place effective de ces plans de financement est possible.

**Figure 22 : Positionnement des principaux pays impliqués dans la course aux technologies quantiques**

Source : KYU Associés





**Figure 23 : Investissements publics et privés consolidés dans les technologies quantiques sur les 5 dernières années**  
 Source : Olivier Ezratty

L'Union européenne s'affirme comme un acteur de premier plan dans la production de technologies quantiques, se positionnant juste après les États-Unis et devant la Chine et le Royaume-Uni. L'écosystème français se distingue par son dynamisme dans la recherche quantique, en étant l'un des pays les plus actifs en la matière, avec des centres de recherche de renom tels que le CNRS et le CEA. Cet écosystème de laboratoires est en synergie avec un réseau de start-ups qui jouent un rôle actif sur la scène internationale.

Le gouvernement français apporte un soutien substantiel à la recherche et au développement des technologies quantiques. Cependant, la France n'est pour l'instant pas une grande consommatrice de ces technologies, en raison du faible nombre de multinationales ou de grands groupes s'appropriant et exploitant ces avancées. Néanmoins, la France conserve un fort potentiel pour évoluer dans ce domaine et tirer pleinement parti des possibilités qu'offre la révolution quantique.



## A RETENIR

- Alors que certaines entreprises de la branche sont des acteurs majeurs des technologies quantiques (conception et fabrication d'équipement, édition de logiciel, prestations d'intégration...), d'autres sont indirectement impactées par le développement de ces technologies (cryptographie, algorithmie...)
- L'écosystème des technologies quantiques pourrait représenter 3000 emplois dont 900 dans la Branche.
- Ces emplois sont aujourd'hui concentrés dans la recherche, et, dans une moindre mesure, dans la conception et la fabrication des équipements.
- Les technologies quantiques mobilisent de nombreux métiers très qualifiés de la branche dont certains sont émergents (ingénieurs et chercheurs en quantique...).
- Compte tenu des spécificités des technologies quantiques, les métiers de la branche mobilisés doivent développer de multiples compétences nouvelles.
- Compte tenu de la non-maturité technologique et commerciale du secteur, l'évolution des besoins en recrutement reste fortement conditionnée par l'avantage quantique.
- La filière des technologies quantiques pourrait générer près de 2000 recrutements d'ici 3 à 5 ans, dont 500 recrutements dans la branche.
- A horizon 2030-2040, 4 scénarios d'évolution des besoins en recrutement peuvent être posés :
  - Scénario 1 : la stratégie nationale quantique et la création de 16 000 emplois d'ici 2030
  - Scénario 2 : Des avancées technologiques continues, sans pour autant atteindre l'avantage quantique. L'évolution et la structure de l'emploi restent alors similaires à celles observées actuellement.
  - Scénario 3 : L'atteinte de l'avantage quantique en France et une croissance forte des besoins en emploi. Le volume et la structure de l'emploi devraient profondément évoluer, avec une concentration des besoins sur l'ingénierie, les outils logiciels et le développement applicatif.
  - Scénario 4 : L'atteinte de l'avantage quantique à l'étranger et des besoins en emploi dont la structure dépend des financements et de la performance des startups françaises

# **5. L'IMPACT DES TECHNOLOGIES QUANTIQUES SUR LES ACTIVITÉS, LES MÉTIERS ET LES COMPÉTENCES DE LA BRANCHE DES BUREAUX D'ÉTUDES**

# LES ENTREPRISES DE LA BRANCHE, DES ENTREPRISES CLÉS POUR LE DÉVELOPPEMENT DES TECHNOLOGIES QUANTIQUES

---

## Des entreprises de la branche directement impliquées dans le développement des technologies quantiques

Les entreprises de la branche sont majoritairement positionnées sur la fabrication des équipements (à la fois hardware et software) et sur l'acculturation et la préparation des usagers au quantique.

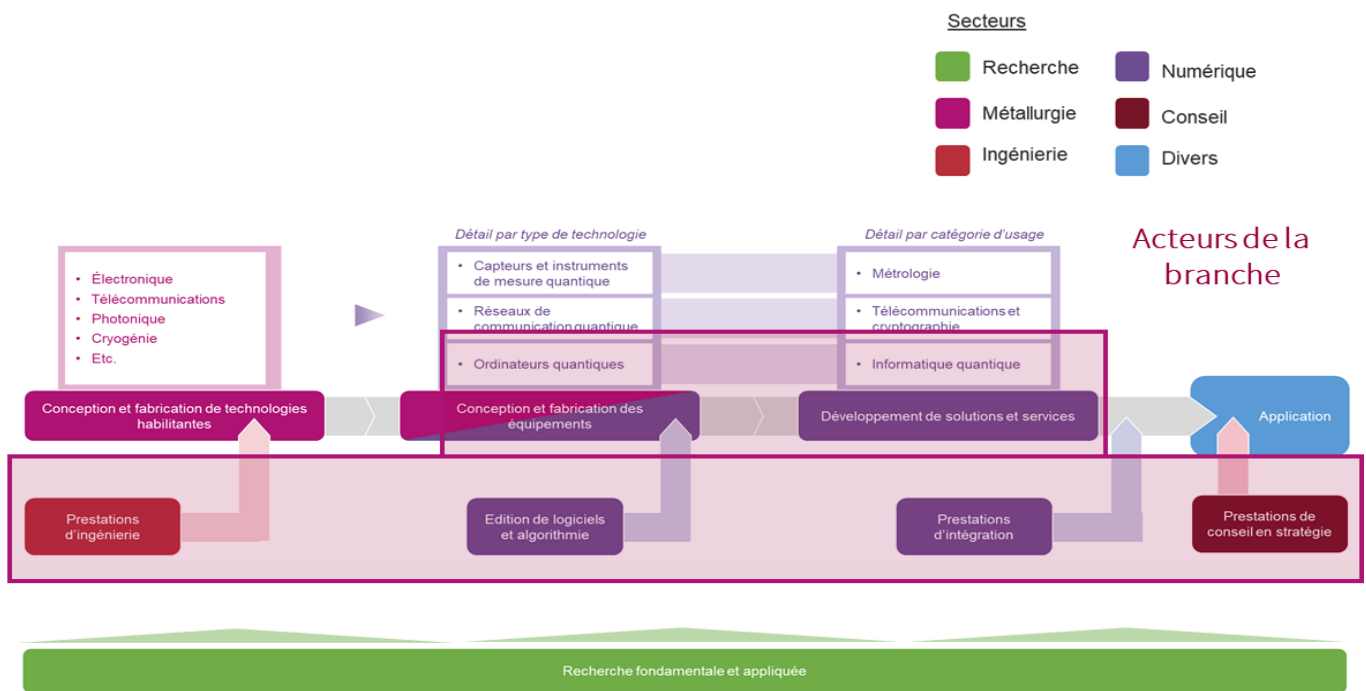
Les entreprises de la branche BETIC (Bureaux d'études techniques, cabinets d'ingénieurs-conseils sociétés de conseils) sont des acteurs clés pour le développement des technologies quantiques. Celles-ci interviennent tout au long de la chaîne de valeur des technologies quantiques. On retrouve ainsi :

- **Les sociétés d'ingénierie** en amont de la chaîne de valeur : bien que très peu d'entreprises aient été identifiées, celles-ci pourraient se positionner dans la prestation d'ingénierie au service des entreprises qui conçoivent et fabriquent les technologies habilitantes ;
- **Les entreprises du numérique qui se positionnent :**
  - Au cœur de la chaîne de valeur dans l'édition de logiciels et l'algorithmie ainsi que dans la conception et la fabrication des équipements quantiques ;
  - En aval de la chaîne de valeur dans le développement de solutions et de services ainsi que dans les prestations d'intégration. Elles ont alors pour rôle d'acculturer les utilisateurs finaux ;
- **Les entreprises du conseil** en aval de la chaîne de valeur : celles-ci orientent et conseillent les utilisateurs finaux dans l'utilisation et la sélection des technologies quantiques sur lesquelles se positionner.

---

## Des entreprises de la branche dont les technologies quantiques favorisent indirectement leur activité

Le développement des solutions d'algorithmie dans l'informatique « classique » pour concurrencer les technologies quantiques



**Figure 24 : Positionnement des entreprises de la branche BETIC sur les technologies quantiques**

Source : KYU Associés

Compte tenu de la promesse de l'informatique quantique de dépasser les capacités de l'informatique classique, les technologies quantiques représentent un risque pour les solutions de calculs traditionnelles. Face à cette nouvelle concurrence technologique, les activités du secteur du numérique spécialisées dans la conception d'outils d'aide à la décision (méthodes de prévision, recherche opérationnelle) et dans la conception d'outils fondés sur l'intelligence artificielle cherchent à optimiser leurs algorithmes (en termes de consommation énergétique, de capacités de traitement...) et à étendre leurs cas d'usage. Cette **concurrence de l'informatique quantique permet ainsi, indirectement, de développer les activités de l'informatique classique** spécialisées sur les méthodes de calcul en renforçant le besoin d'expertise en mathématiques (algorithmie, optimisation combinatoire, optimisation multidisciplinaire, méthodes de prévision...) et en expertise métier.

#### **Le développement de solutions hybrides et *quantum inspired* parmi les acteurs des technologies quantiques et les autres acteurs d'édition de logiciel**

Des acteurs de l'écosystème des technologies quantiques et des acteurs de l'édition de logiciel développent des solutions qui reposent sur :

- **Des démarches logicielles hybrides** : elles associent une connaissance métier, les algorithmes associés et leur exécution sur des machines classiques et sur ordinateurs quantiques. D'après Olivier Ezratty, toutes les solutions de calcul quantique sont ou seront hybrides d'une manière ou d'une autre via l'association d'algorithmes traditionnels et d'algorithmes hybrides.
- **Des algorithmes hybrides classiques-quantiques** : ce type d'algorithme consiste à exécuter la partie principale du code sur un processeur hôte classique et de déléguer à un accélérateur QPU (Quantum Processing Unit) certaines tâches spécifiques qui peuvent bénéficier d'une accélération potentielle ;
- **Des démarches *quantum inspired*** : elles associent des algorithmes inspirés des algorithmes utilisés dans le cadre des technologies quantiques à des ordinateurs classiques permettant de simuler le comportement d'ordinateurs quantiques<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> D'après Olivier Ezratty, Comprendre l'informatique quantique (édition 2021)

Ces démarches permettent aux acteurs qui les développent :

- **De proposer des solutions matures sur le plan économique** - puisqu'elles ne sont pas matures (en particulier l'informatique quantique), les solutions qui reposent sur les technologies quantiques ne permettent pas de développer un modèle économique solide. Les acteurs de l'écosystème quantique peuvent ainsi, à travers les technologies *quantum inspired*, proposer des solutions commercialisables.
- **De se positionner et se préparer à l'arrivée des technologies quantiques** – pour les acteurs du numérique qui ne font pas partie de l'écosystème des technologies quantiques, le développement de telles solutions permet à la fois de développer des compétences relatives aux technologies quantiques (fonctionnement, usages, algorithmes...) et d'être identifiés auprès des futurs usagers des technologies quantiques.

### **Le développement de la cryptographie post-quantique pour répondre aux risques des technologies quantiques**

Une fois mature, l'informatique quantique représentera un risque important pour la sécurité informatique. En effet, le fonctionnement actuel de la cryptographie qui garantit la confidentialité des communications repose sur des algorithmes à clé publique qui peuvent être cassés par l'informatique quantique. Face à ce risque, **de nouvelles constructions cryptographiques reposant sur des algorithmes cryptographiques dits « post-quantiques »** fonctionnant à partir d'ordinateurs classiques ont émergé. Parmi ceux-ci, quatre sont candidats à une standardisation<sup>5</sup> : CRYSTALS-Kyber, CRYSTALS-Dilithium, Falcon et SPHINCS+. **Les activités de cryptographie reposant sur ces quatre schémas devraient ainsi se développer.**

---

<sup>5</sup> NIST, PQC Standardization Process: Announcing Four Candidates to be Standardized, Plus Fourth Round Candidates, 2022

# PRÈS DE 900 EMPLOIS DIRECTEMENT IMPLIQUÉS DANS LA BRANCHE

---

## Un écosystème français de plus de 3 000 personnes, essentiellement porté par la recherche fondamentale et appliquée

Une estimation des emplois difficile qui nécessite de mobiliser différentes sources

**Compte tenu de la faible maturité du secteur des technologies quantiques, il est difficile d'en évaluer le nombre d'emplois.**

- Il n'existe pas de nomenclature statistique permettant d'isoler les emplois et/ou les activités liés aux technologies quantiques ;
- Les chiffres communiqués par les acteurs du secteur sont rapidement obsolètes du fait du dynamisme du secteur ;
- Dans les grandes entreprises utilisatrices de ces technologies, l'identification des responsables d'équipe est complexe ;
- Compte tenu de la concurrence dans le secteur, certaines entreprises ne souhaitent pas communiquer de chiffres ;
- Dans les entreprises travaillant sur les technologies habilitantes, il est difficile de déterminer le nombre de personnes travaillant réellement sur les technologies liées au quantique.

**L'estimation du nombre d'emplois liés au domaine quantique repose sur 3 sources de données différentes :**

- Une enquête en ligne auprès d'une vingtaine d'entreprises de l'écosystème ;
- Près de 25 entretiens avec des entreprises de l'écosystème quantique ;
- La consolidation des travaux d'Olivier Ezratty portant sur le nombre d'emplois dans les entreprises, les laboratoires et les acteurs publics.

Pour faire face à cette complexité **ont été réalisées :**

- Un recensement des emplois issus de l'enquête et des entretiens ;
- Un redressement des résultats précédents en fonction du taux de représentativité estimé de l'enquête et des entretiens et de l'expertise d'Olivier Ezratty.

Malgré cette méthodologie, les **emplois liés au quantique pourraient être plus importants :**

- Compte tenu de la difficulté d'identifier les interlocuteurs qualifiés parmi les fabricants de technologies habilitantes et la faible part que représente le quantique dans ces activités, celles-ci n'ont pas été intégrées à l'analyse ;
- Des emplois indirectement liés au quantique, notamment sur la cryptographie post-quantique n'ont pas été comptabilisés compte tenu de leur intégration dans une offre de service souvent beaucoup plus large (cybersécurité, cryptographie classique...).

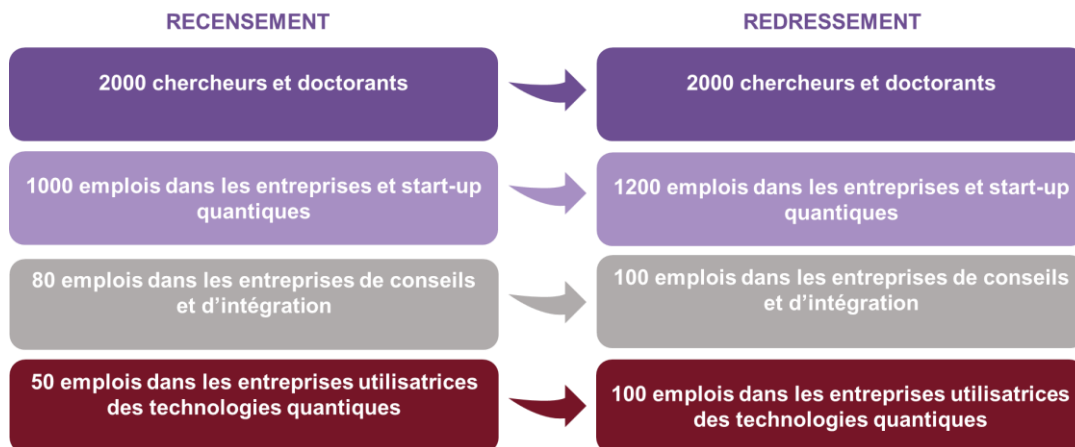


Figure 25 – Estimation du nombre d'emplois par grands domaines d'activité

Source : KYU Associés

### Plus de la moitié des emplois aujourd'hui concentrée dans les laboratoires et les instituts de recherche

Selon Olivier Ezratty, on compte **environ 1 000 chercheurs dans le quantique en France, auxquels s'ajoutent plus de 1000 doctorants et chercheurs en postdoctorat**. Une majorité d'entre eux font aujourd'hui de la recherche fondamentale et appliquée dans les différents types de branches de la physique quantique. En volume, les chercheurs et physiciens quantiques sont concentrés dans trois écosystèmes : Paris intra-muros, Paris-Saclay et Grenoble.

### Environ un tiers des emplois parmi les entreprises et start-ups positionnées au cœur de la chaîne de valeur du quantique

Alors que **1 000 emplois ont été recensés** parmi les entreprises et les start-ups spécialisées dans le quantique, celles-ci pourraient regrouper **jusqu'à 1 200 emplois** au regard de l'échantillon interrogé. Ces emplois sont essentiellement composés d'ingénieurs de recherche, d'ingénieurs de conception et de développeurs, qui, associés aux chercheurs, travaillent sur le développement de prototypes et la fabrication d'équipements quantiques. Paradoxalement, **les plus gros recruteurs** sur le marché des technologies quantiques sont **les start-ups**, et non pas les grosses entreprises comme Eviden. Il y a une vraie différence entre **les entreprises dédiées aux technologies quantiques (pure player)**, comme Pasqal ou Alice & Bob et les entreprises intégrant les technologies quantiques dans leur offre de prestation, **exception faite pour IBM**, qui emploie plus de 1 200 personnes à travers le monde sur les technologies quantiques.

### Entre 80 et 100 emplois dans les entreprises qui participent à l'acculturation des futurs usagers des technologies quantiques

Parmi les fournisseurs de services informatiques et les cabinets de conseil et de stratégie, environ 100 personnes pourraient être salariées dans le domaine du quantique. Ces derniers emploient essentiellement, des **développeurs d'outils de développement, des développeurs d'application et des consultants et chefs de projet spécialisés** sur les problématiques quantiques.

### De grandes entreprises qui commencent à structurer des équipes dédiées à l'utilisation (future) des technologies quantiques et qui totalisent entre 50 et 100 personnes.

Quelques entreprises, notamment dans le domaine de la finance, de l'énergie et de l'industrie pharmaceutique, commencent à structurer des équipes dont l'objectif est de **préparer leurs collaborateurs à la future utilisation des technologies quantiques**. Ces dernières emploient essentiellement des experts quantiques, souvent spécialisés sur des problématiques métiers telles que la finance ou la science des matériaux. On estime que le nombre de personnes dédiées au quantique pour ces acteurs est compris **entre 50 et 100 personnes**.

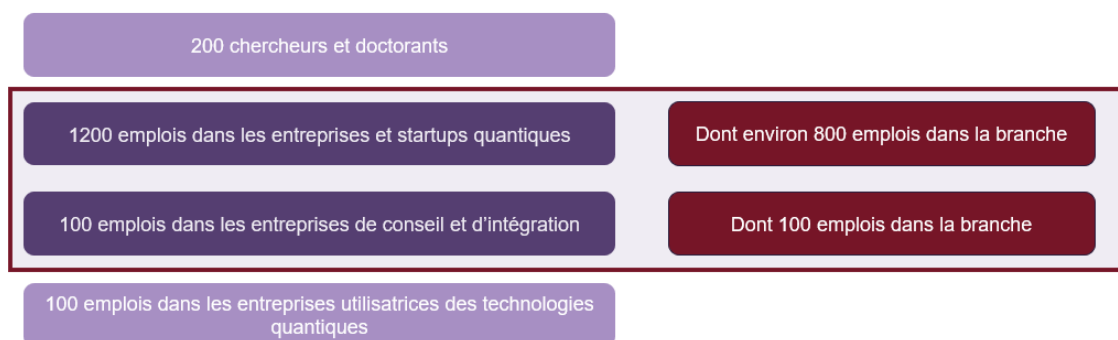
### Une structure des emplois spécifique au niveau de maturité des technologies quantiques



La structure des emplois est fortement conditionnée par la maturité des technologies quantiques. Le **secteur est encore émergent** et n'a pas réellement entamé de phase d'industrialisation. C'est pourquoi **la recherche fondamentale et la recherche appliquée polarisent la majorité des emplois** (plus de 50% des emplois). En revanche, de plus en plus de personnes travaillent sur l'application des technologies quantiques et le développement de prototypes. Ces acteurs regroupent ainsi près d'un tiers des emplois. À l'inverse, compte tenu de la non-maturité technologique du quantique, les emplois sont moins nombreux parmi les fournisseurs de solutions (moins de 10% des emplois actuels).

## Avec près de 900 emplois recensés, la branche totalise aujourd'hui un peu moins d'un tiers des emplois de l'écosystème quantique

D'après le recensement réalisé, **les entreprises de la branche représentent environ 40% des acteurs de l'écosystème quantique**. La branche concentre la totalité des entreprises d'édition de logiciel, de conseil et d'intégration ainsi qu'une majorité de start-ups quantiques, qui représentent aujourd'hui les plus gros recruteurs dans la filière. Compte tenu de cette structure de l'écosystème, sur les quelque 3 000 emplois recensés dans l'écosystème quantique, **la branche pourrait compter près de 900 emplois** aujourd'hui. Ces emplois sont majoritairement **concentrés dans les entreprises et start-ups quantiques spécialisées dans la conception et la fabrication d'équipements**. Les entreprises de conseil et d'intégration totalisent elles près d'une centaine d'emplois dans la branche.



**Figure 26 : Estimation du nombre d'emplois dans la branche BETIC**  
Source : KYU Associés

# DE NOUVELLES COMPÉTENCES AU SEIN DE LA BRANCHE

## Des métiers hautement qualifiés, positionnés sur l'ensemble de la chaîne de valeur

Des métiers divers, positionnés sur l'ensemble de la chaîne de valeur de la filière.

En amont de la chaîne de valeur, on trouve essentiellement des physiciens en physique fondamentale et des chercheurs en technologies quantiques. Les ingénieurs sont eux davantage positionnés sur la conception et la fabrication des équipements ainsi que sur la fabrication et la conception des technologies habilitantes. Les développeurs et informaticiens sont concentrés sur l'édition de logiciel et l'algorithmie, le développement de solutions et de services et les prestations d'intégration. Enfin, la création des applications métiers et les prestations de conseil en stratégie demandent des compétences à la croisée des chemins entre l'ingénierie, l'informatique et des compétences sectorielles (science du vivant, science des matériaux, calculs de risques ou problèmes d'optimisation...).

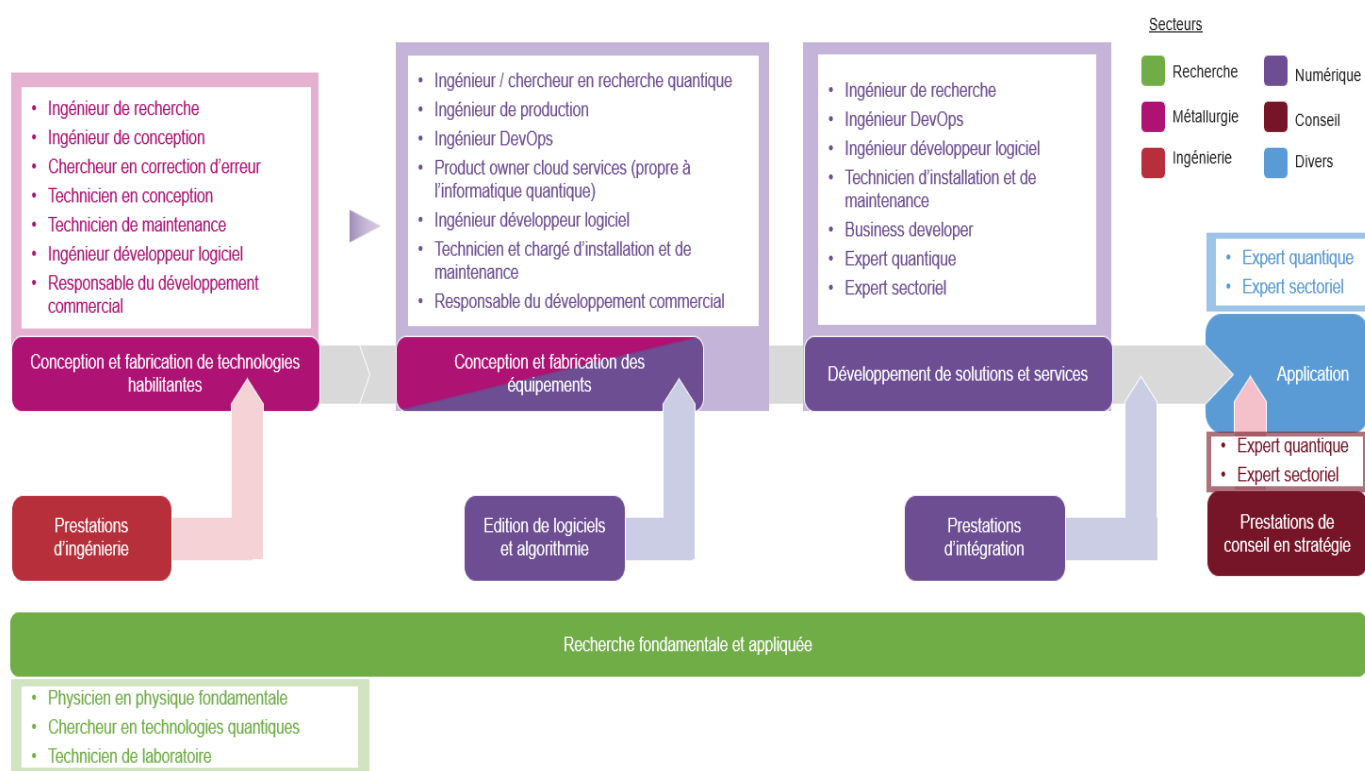


Figure 27 : Répartition des métiers sur la chaîne de valeur de la filière quantique

Source : KYU Associés

---

## Des métiers spécifiques hors de la branche pour la recherche et la fabrication des technologies habilitantes



### Recherche fondamentale et appliquée

La recherche fondamentale et appliquée regroupe essentiellement des **physiciens en physique fondamentale, des chercheurs en technologies quantiques et des techniciens de laboratoire**.

- **Physiciens en physique fondamentale** : les physiciens en physique fondamentale se concentrent sur les recherches amont au développement des technologies quantiques. Une grande partie de ces recherches relève de la matière condensée, ou plus généralement de la matière quantique ou topologique, via la micro et la nanostructuration des matériaux. Les physiciens en physique fondamentale associent approches théoriques et expérimentales pour comprendre des phénomènes à bas niveau et développent de nouveaux dispositifs à partir de modèles. Les physiciens en physique fondamentale ont pour la plupart un doctorat en physique, science des matériaux ou nanotechnologies et se spécialisent sur une technologie en particulier.
- **Chercheurs en technologies quantiques** : ils transforment les découvertes fondamentales en premières preuves de concept en laboratoire. Ces postes requièrent une expérience de recherche de niveau doctorat. Les équipes de recherche combinent généralement des chercheurs en physique, qui manipulent et mesurent une grande variété de systèmes quantiques préparés à l'aide d'atomes, d'ions, de photons ou d'électrons pris individuellement ou collectivement, et des chercheurs en technologie et ingénierie, qui eux réalisent des algorithmes de simulation de calcul quantique et travaillent à l'optimisation de ces algorithmes.
- **Techniciens de laboratoire** : ils installent et pilotent les manipulations expérimentales. Les missions des techniciens de laboratoire comprennent, entre autres, la préparation technique des expérimentations, la conception des montages, la tenue de l'inventaire du matériel, la préparation des demandes d'approvisionnement et la veille au respect des directives en vigueur sur la sécurité des lieux, la santé des personnes et la gestion des produits utilisés.



### Conception et fabrication de technologies habilitantes et prestations d'ingénierie

Ce domaine des technologies quantiques regroupe des **ingénieurs de recherche, des ingénieurs de conception, des chercheurs en correction d'erreur, des techniciens, des développeurs et des chefs de projet et responsables du développement commercial**. Chaque entreprise étant spécialisée sur une technologie (lasers, cryogénie...) ces métiers ont également des spécificités en fonction de la technologie développée.

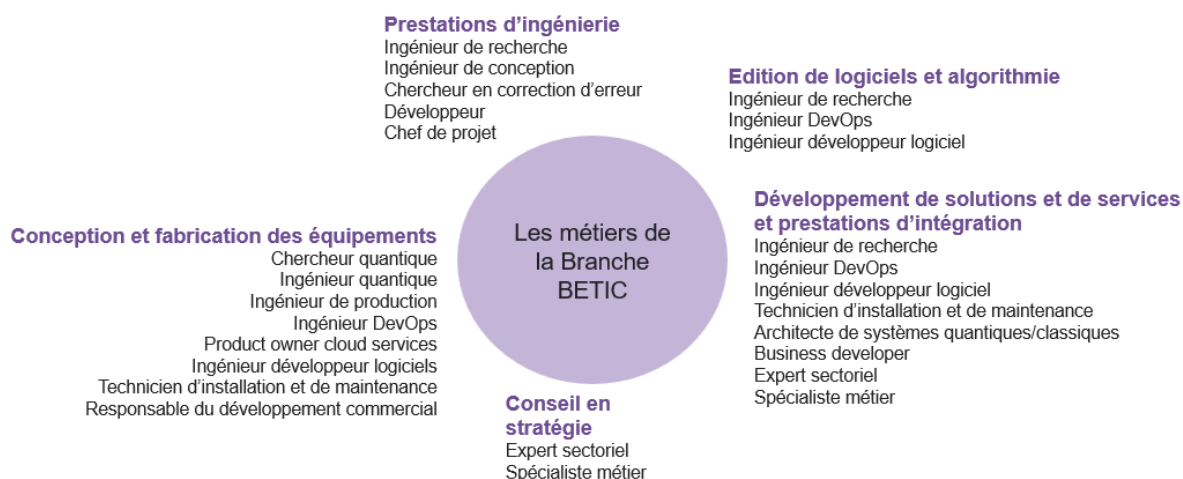
- **Ingénieurs de recherche** : leur rôle est de concevoir de nouvelles méthodes de recherche et de développement, analyser un cahier des charges et **encadrer la conception d'un nouveau produit et organiser des phases de test de prototypes**. Les ingénieurs de recherche sont des experts de leur domaine. Il existe par exemple de nombreux ingénieurs de recherche en photonique silicium.
- **Ingénieurs de conception** : ils élaborent l'**architecture d'ensemble des technologies quantiques**, choisissent les solutions techniques les plus adaptées et procèdent à des simulations afin de soumettre les pièces à différentes contraintes (dimensionnement, résistance des matériaux...). De nombreux ingénieurs de conception travaillent sur la création de sous-ensembles techniques d'ordinateurs quantiques, notamment sur des puces quantiques supraconductrices ou des processeurs quantiques. L'automatisation des processus de conception est également une composante essentielle du métier et requiert de solides compétences en programmation (Python).
- **Chercheurs en correction d'erreur** : la plupart travaillent sur des codes LDPC quantiques à haut débit et **évaluent la performance de ces codes dans le cadre de contexte d'erreurs réalistes**. La correction d'erreur quantique protège les informations en les codant sur plusieurs qubits physiques pour former un « qubit logique ». La correction d'erreur requiert un doctorat en physique, informatique ou mathématiques, ainsi que de solides connaissances en théorie de l'informatique

quantique ou de solides connaissances en correction d'erreur classique et un intérêt marqué pour le quantique.

- **Techniciens spécialisés sur les technologies développées** : comme les laboratoires, les entreprises et start-ups spécialisées dans la conception et la fabrication de technologies habilitantes et les prestations d'ingénierie recrutent des techniciens spécialisés sur les différentes technologies produites. Par exemple, les techniciens en systèmes photoniques participent à la conception, la fabrication et la maintenance de systèmes intégrant des technologies optiques et photoniques. Le métier nécessite un niveau Bac+2 ou Bac+3 en fonction des spécialités, un intérêt marqué pour les technologies quantiques et une volonté de se former en interne.
- **Ingénieurs développeurs logiciels** : ils **développent des environnements de simulation informatique quantique** et **étudient des algorithmes avancés de l'informatique quantique**. De formation scientifique supérieure (école d'ingénieur ou doctorat en informatique ou en physique), ils justifient d'un niveau avancé en programmation objet et en scripting, notamment en C++ et Python. Ils ont également un haut niveau en algorithmie et en mathématiques, en particulier en algèbre linéaire.
- **Responsables du développement commercial** : en vue d'une future industrialisation et commercialisation de technologies habilitantes dans le quantique, les entreprises et start-ups du secteur emploient des **personnes en charge de leur développement commercial** dont les compétences couvrent le marketing produit, le marketing opérationnel, le lancement de partenariats, la création d'écosystèmes et la vente en mode B2B. S'y ajoutent les compétences génériques de la création de start-ups dans l'univers des deep techs (organisation, business planning, recrutement, financements...).

---

## De nouveaux métiers spécialisés dans les technologies quantiques au sein de la branche



**Figure 28 : Les métiers de la branche BETIC liés aux technologies quantiques**

Source : KYU Associés

### Conception et fabrication des équipements

La conception et la fabrication des équipements recouvrent les domaines des simulateurs et accélérateurs, de l'ordinateur quantique, des capteurs quantiques, de la cryptographie post-quantique et des systèmes de communications quantiques. Ce secteur rassemble ainsi des métiers très diversifiés, spécialisés sur chacun des équipements développés. On y retrouve essentiellement des **chercheurs et ingénieurs quantiques** (quantum engineer), **des informaticiens** (développeurs d'outils de développement, algorithmie...), **des techniciens, des chargés de développement commercial et des chefs de projet**.

- **Ingénieurs et chercheurs en recherche quantique** : ils ont un rôle et un profil **similaire à ceux travaillant dans les laboratoires** et sont également experts dans leur domaine. Dans le quantique, Pasqal recrute par exemple des ingénieurs en correction d'erreurs quantiques, qui développent des protocoles de correction d'erreur et simulent des processus d'erreur dans des systèmes quantiques complexes. Ces simulations et protocoles sont utilisés par les équipes de R&D pour mieux comprendre les systèmes existants et trouver des algorithmes quantiques tolérants au bruit et à la décohérence quantique. Les postes d'ingénieurs de recherche quantique requièrent un doctorat en physique quantique, en optique quantique, en physique atomique ou en physique du solide et une bonne connaissance de la modélisation analytique et des simulations numériques.
- **Ingénieurs de production** : ils jouent un rôle crucial dans **l'expansion des capacités de production** des entreprises spécialisées dans la conception et la fabrication des équipements. Ils mettent en place une ligne de production à partir de prototypes déjà fabriqués, garantissent le respect des coûts, des délais et des normes de sécurité et de qualité des produits. Le métier ne nécessite pas nécessairement de connaissances préalables en quantique et requiert un niveau ingénieur Bac+5. En revanche, il nécessite une formation continue en physique et informatique quantique ainsi qu'un niveau avancé en algorithmie.
- **Ingénieurs DevOps ou Développeurs d'outils de développement** : Une partie des services mobilisant les technologies quantiques repose sur le cloud. Le cloud fournit un environnement de développement quantique en simulant, avec des ressources IT « classiques » le comportement de futurs ordinateurs quantiques. Il permet également d'accéder à distance aux ordinateurs quantiques actuellement disponibles. **Le développement des technologies quantiques dans le cloud repose sur des ingénieurs DevOps ou Développeurs d'outils de développement**. Les ingénieurs DevOps introduisent des processus, des outils et des méthodes pour équilibrer les besoins tout au long du cycle de développement de logiciels, du code et du déploiement, jusqu'à la maintenance et à la mise à jour.
- **Product owner cloud services (propres à l'informatique quantique)** : les entreprises spécialisées dans la conception et la fabrication des équipements **recrutent également des Product Owner, qui viennent renforcer leur équipe cloud**. Leur rôle est de définir les interfaces de l'équipe cloud avec d'autres équipes ou partenaires, par le biais de documents de conception fonctionnelle ou de spécifications d'API et d'animer les réunions de l'équipe cloud en utilisant la méthode agile.
- **Ingénieurs développeurs logiciels** : cf. description ci-dessus.
- **Techniciens et chargés d'installation et de maintenance** : les entreprises spécialisées dans la conception et la fabrication des équipements emploient des techniciens d'installation et de maintenance afin d'installer les équipements dans leurs locaux ou les mettre à disposition à des clients externes ou dans des centres de calcul. Les techniciens d'installation et de maintenance organisent et supervisent l'installation et la mise en service des équipements quantiques ainsi que les mises à jour ultérieures. Ils développent également les moyens et procédures de diagnostic de panne, réparation et maintenance et organisent les modes d'implémentation et d'exécution, en collaborant étroitement avec les équipes de développement et de production.
- **Responsable du développement commercial** : cf. description ci-dessus.



### Édition de logiciels et algorithmie

Quelques start-ups se spécialisent aujourd'hui sur l'édition de logiciels et le développement d'algorithmes quantiques. Ces entreprises emploient essentiellement des :

- Ingénieurs de recherche
- Ingénieurs DevOps

- Ingénieurs développeurs logiciels

(cf. description ci-dessus).



### Développement de solutions et de services et prestations d'intégration

Les entreprises de développement de solutions et de services et de prestations d'intégration emploient essentiellement des :

- Ingénieurs de recherche,
- Ingénieurs DevOps,
- Ingénieurs développement logiciel
- Techniciens d'installation et de maintenance
- Business developer

(cf. description ci-dessus).

Elles emploient également des :

- **Architectes de systèmes quantiques et classiques** : notamment pour les infrastructures de calcul haute performance (comme GENCI), pour le cloud (comme OVHcloud) et pour le on-premise (entreprises utilisatrices des technologies quantiques, notamment dans les secteurs sensibles de la défense et de l'aérospatial). Les architectes de systèmes élaborent les plans informatiques et les optimisent (logiciels, systèmes d'exploitation). En fonction des projets et des cas d'usage, ils sélectionnent les outils les plus adaptés pour concevoir leurs systèmes.
- **Experts sectoriels et spécialistes métiers** : Ces entreprises recrutent également de plus en plus de spécialistes sectoriels et spécialistes métier, dont les compétences sont à la croisée des compétences techniques et des compétences applicatives. Ce sont en général des consultants, qui développent à la fois des solutions et des prestations d'intégration requérant des compétences en algorithmie et en informatique quantique et conseillent les entreprises utilisatrices des technologies quantiques sur les domaines d'application envisageables et le développement de cas d'usage.
- **Experts quantiques** : ces acteurs ont également recours à des experts quantiques, qui forment et conseillent les entreprises dans l'élaboration de leurs stratégies d'innovation autour des technologies quantiques. Ils apportent une vision scientifique, technologique et marketing, ainsi qu'une connaissance approfondie des écosystèmes dans les industries numériques. Les experts quantiques réalisent des missions d'accompagnement stratégique qui couvrent des conférences, séminaires et formations ainsi que l'assistance à la définition de stratégies produits, d'innovation ouverte et de promotion d'écosystèmes.



### Prestations de conseil en stratégie

**Enfin les cabinets de conseil en stratégie développent aujourd'hui de petites équipes de consultants dédiées à l'application des technologies quantiques.** Tout comme pour le développement de solutions et de services et les prestations d'intégration, les consultants se spécialisent sur des domaines d'application particuliers, et développent des compétences transverses, entre le développement logiciel et les compétences métier. Les cabinets de conseil ont également recours à des **experts quantiques**.

---

## Un secteur interdisciplinaire et des compétences diverses

La filière quantique requiert un niveau d'expertise élevé et recrute des profils très qualifiés et interdisciplinaires.

La grande majorité des personnes qui travaillent sur les technologies quantiques sont des doctorants en physique ou mathématiques appliquées, qui maîtrisent parfaitement les fondamentaux scientifiques de ces domaines. De plus, travailler dans la filière quantique requiert des **compétences extrêmement diverses**. **Le quantique est avant tout caractérisé par son interdisciplinarité** (à la fois scientifique et applicative) et les profils doivent en général avoir une bonne maîtrise de l'ensemble des compétences listées ci-dessous.

Peuvent être distinguées trois grandes familles de compétences liées au domaine quantique : des **compétences scientifiques** (physique, mathématique et informatique), des **compétences techniques** (mathématiques et logiciel) et des **compétences sectorielles** liées aux domaines d'application du quantique. Les compétences scientifiques sont essentiellement liées à la recherche fondamentale et appliquée, les compétences techniques et logiciel à la fabrication des équipements et des technologies habilitantes et au développement de solutions et de services et les compétences sectorielles aux prestations de conseil en stratégie et à la partie applicative.

### Des technologies qui mobilisent une grande diversité de domaines scientifiques (physique, mathématique, informatique)

**Au niveau de la physique fondamentale**, la filière quantique comporte plusieurs branches, réparties en **trois grandes catégories** : la manipulation d'atomes, la manipulation d'électrons dans des matériaux supraconducteurs ou semi-conducteurs et la manipulation de photons. D'autres filières quantiques spécialisées existent dans les télécommunications et la cryptographie quantiques et s'appuient sur de la photonique ou de la métrologie.

En lien avec la physique fondamentale, **l'ingénierie de systèmes** permet de créer de véritables machines qui fonctionnent de bout en bout. **Cela nécessite de faire dialoguer les disciplines et de rapprocher les physiciens des ingénieurs**. Les technologies mises en jeu sont variées et incluent la photonique et les lasers, l'électronique analogique et numérique, la thermodynamique, la mécanique des fluides, l'ingénierie de production de composants divers et la conception de systèmes complets.

### Dans les domaines mathématiques et logiciels, plusieurs disciplines entrent en jeu pour créer des solutions quantiques

Les disciplines **informatiques sont intimement liées à la partie physique et technologique des systèmes quantiques**. Dans les domaines mathématiques et logiciels, **plusieurs disciplines entrent en jeu pour pouvoir créer des solutions quantiques de bout en bout** :

- **Les théories de la complexité** pour la conception d'algorithmes efficaces et leur classification ainsi que l'estimation de leurs gains opérationnels par rapport à des algorithmes classiques.
- **La création de ces algorithmes classiques** requiert une grande capacité d'abstraction et des compétences en algèbre linéaire. Elle concerne aussi le champ spécifique des codes de correction d'erreurs ainsi que celui des algorithmes hybrides qui associent du calcul classique et du calcul quantique. Les créateurs d'algorithmes doivent ainsi avoir une double compétence associant les méthodes traditionnelles et les méthodes quantiques.
- **La création de firmwares**, qui servent à piloter les outils de contrôle des qubits.
- **La création et l'amélioration d'outils de développement visuels** pour faciliter le travail des développeurs.

**Toutes ces disciplines informatiques doivent évoluer de concert avec la partie physique et technologique des systèmes quantiques**. En l'état actuel de l'art, on ne peut pas isoler le matériel du logiciel comme on le fait dans l'informatique traditionnelle. Les ingénieurs logiciels quantiques doivent donc avoir des connaissances dans la physique quantique et les ordinateurs quantiques. Réciproquement, les concepteurs d'ordinateurs quantiques devront appréhender la manière dont ils sont pilotés et programmés.

### La création des applications métiers demande des compétences à la croisée des chemins entre les domaines mathématiques et logiciels et les compétences sectorielles.

La création de cas d'usage et d'applications métiers demande des **compétences à la croisée des chemins entre les compétences mathématiques et informatiques, et des compétences sectorielles**, souvent elles-mêmes scientifiques comme dans les sciences du vivant (chimie organique, repliement des

protéines, photosynthèse...), les sciences des matériaux (comme dans la chimie des batteries au niveau des protéines, photosynthèse...) ou d'autres branches comme les calculs de risques dans la finance ou les problèmes d'optimisation dans la logistique et les transports.

	Toutes technologies	Ordinateurs quantiques et Informatique quantique (édition de logiciel, développement de solutions, prestations d'intégration)	Communications quantiques et télécommunications	Capteurs quantiques et solutions de métrologies
Prérequis théoriques	<b>Concepts de la physique quantique</b> : Concepts de base de la physique quantique, Formalisme mathématique, Dynamique des qubits <b>Fondements physiques des technologies quantiques</b> : Physique atomique pour les technologies quantiques, Optique quantique pour les technologies quantiques, Physique du solide pour les technologies quantiques			
Conception et la fabrication d'équipements	Physique du solide / Physique de la matière condensée / Photonique et lasers / Électronique des micro-ondes / Thermodynamique / Cryogénie / Mécanique des fluides / Techniques de production / Création de systèmes quantiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dispositifs supraconducteurs</li> <li>Dispositifs à spin</li> <li>Atome neutre et ions</li> <li>Qubits</li> <li>Systèmes photoniques</li> <li>Hardware pour l'initialisation, la manipulation et la mesure d'un qubit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cryptographie quantique</li> <li>Cryptographie post-quantique</li> <li>Réseaux quantiques</li> <li>Infrastructure pour la communication quantique</li> <li>Hardware pour les communications quantiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Capteurs quantiques (champs électromagnétiques, températures, particules et pression, gravitationnels, horloges quantiques)</li> <li>Imagerie quantique</li> <li>Champs d'application des capteurs quantiques</li> </ul>
Édition de logiciels, développement de solutions et de services et prestations d'intégration		<ul style="list-style-type: none"> <li>Théories de la complexité</li> <li>Algorithmie quantique</li> <li>Firmware et middleware</li> <li>Programmation, langages et compilateurs quantiques</li> <li>Orchestration et cloud</li> <li>Simulation quantique</li> <li>Correction d'erreurs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cryptographie quantique</li> <li>Cryptographie post-quantique</li> <li>Réseaux quantiques</li> <li>Infrastructure pour la communication quantique</li> <li>Hardware pour les communications quantiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Capteurs quantiques (champs électromagnétiques, températures, particules et pression, gravitationnels, horloges quantiques)</li> <li>Imagerie quantique</li> <li>Champs d'application des capteurs quantiques</li> </ul>
Applications		<ul style="list-style-type: none"> <li>Chimie inorganique</li> <li>Chimie des batteries</li> <li>Chimie organique</li> <li>Biologie moléculaire</li> <li>Optimisation</li> <li>Logistique et transports</li> <li>Mathématiques financières</li> <li>Quantum Machine Learning</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sécurisation d'infrastructures cloud</li> <li>Sécurisation du stockage de données</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Industrie 4.0</li> <li>Défense</li> <li>Métrologie</li> <li>Transports</li> <li>Géodésie</li> <li>BTP</li> </ul>

**Figure 29 – Compétences diverses requises dans la branche BETIC par les technologies par type d'acteur et par technologies**

Sources: Olivier Ezratty, *The Quantum Curriculum Transformation Framework for the development of Quantum Information Science and Technology Education*, traitement KYU Associés



# LES BESOINS EN RECRUTEMENT DANS LA BRANCHE

## Une évolution des besoins en recrutement conditionnée par l'atteinte de l'avantage quantique

Compte tenu de la non-maturité technologique et commerciale du secteur des technologies quantiques, les **besoins en recrutement de ces prochaines années seront conditionnés à par l'évolution de cette maturité** et par **l'évolution des capacités de financement des entreprises de l'écosystème.**

L'atteinte de l'avantage quantique (moment où un ordinateur quantique est en mesure de faire aussi bien ou mieux que les supercalculateurs actuels, que ce soit en termes de rapidité de calcul, de coût financier, de qualité des résultats ou encore de consommation énergétique, **cf. Les technologies quantiques – Des technologies qui ne sont pas encore matures sur le plan scientifique et applicatif**) apparaît comme un élément déterminant pour l'évolution des besoins en recrutement, du moins pour le calcul quantique, pour au moins trois raisons :

- Les usagers passeront d'une phase d'acculturation à une phase d'exploitation de ces technologies ;
- L'informatique quantique représentera alors le principal marché des technologies quantiques<sup>6</sup> ;
- La conception et la fabrication des ordinateurs quantiques pourraient entrer dans une phase d'industrialisation accrue de leurs équipements ;
- L'édition de logiciels, le développement de services et les prestations d'intégration pourront alors s'appuyer sur une technologie mature pour développer leurs activités.

Par ailleurs, l'emploi est aujourd'hui essentiellement porté par les laboratoires et par les startups spécialisées dans le quantique. **Or, ces deux types d'acteurs dépendent du soutien public** (financement public de la recherche, participation publique aux levées de fonds des start-ups). Ces modes de financement n'étant pas nécessairement garantis dans la durée, ils dépendent de la confiance que les pouvoirs publics continueront de placer dans les startups quantiques à l'avenir.

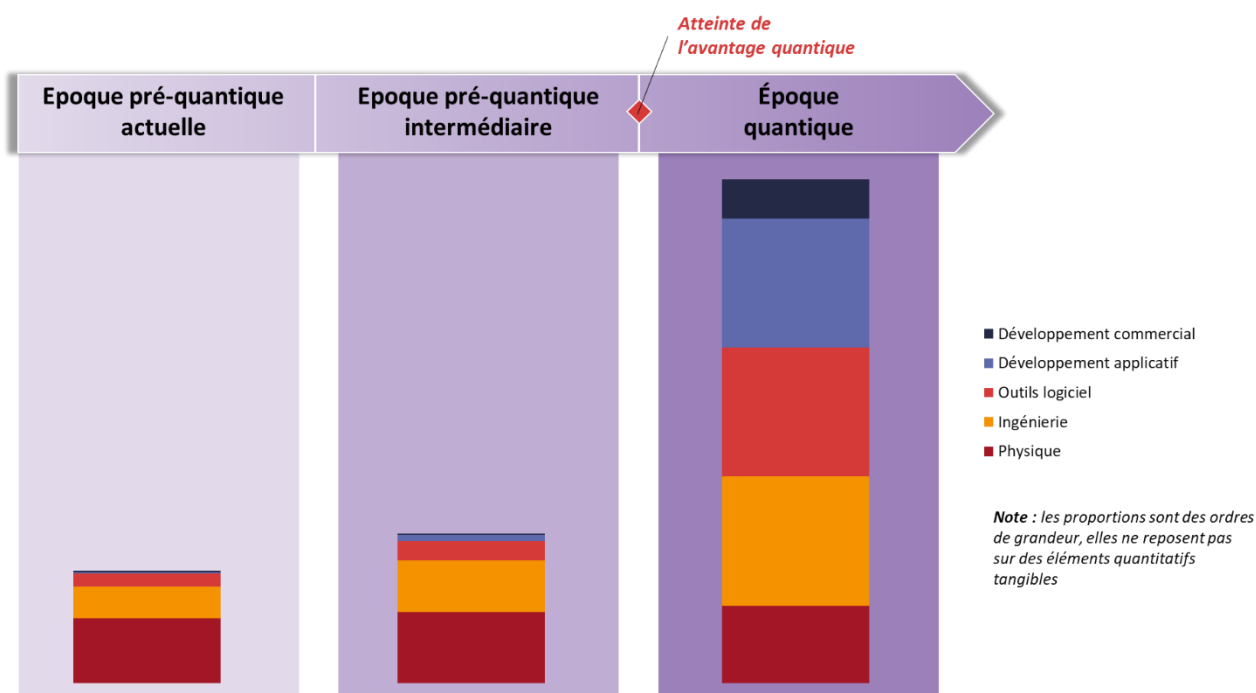
En faisant l'hypothèse d'une capacité de financement continue des acteurs de l'écosystème des technologies quantiques, il est possible de distinguer **trois étapes dans l'évolution des besoins en recrutement** :

- **L'époque actuelle** : l'avantage quantique n'a pas été atteint. Les besoins en recrutement sont concentrés sur les activités de physique en amont de la chaîne de valeur des technologies quantiques.
- **L'époque pré-quantique intermédiaire** : l'avantage quantique n'est toujours pas atteint. Les efforts relatifs à la conception et à la fabrication d'équipements quantiques se poursuivent. Les besoins en recrutement demeurent concentrés sur les activités de physique et d'ingénierie, toujours en amont de la chaîne de valeur des technologies quantiques.
- **L'époque quantique** : l'avantage quantique a été atteint. Cette avancée technologique ouvre le champ à une industrialisation accrue des équipements quantiques qui génère des besoins en ingénierie, mais aussi au développement des activités aval de la chaîne de valeur quantique (édition de logiciel, prestation d'intégration...) générant d'importants besoins en recrutement sur les outils logiciels, le développement applicatif et le développement commercial.

Il est à noter si l'avantage quantique est atteint, celui-ci arrivera progressivement, de manière dispersée et différenciée selon les types d'acteurs et les technologies. Par ailleurs, compte tenu du délai incertain avant

<sup>6</sup> Yole Development

l'atteinte de l'avantage quantique (cf. *Les technologies quantiques, Des promesses, mais des échéances encore floues*), **aucune information temporelle précise ne peut aujourd'hui être estimée.**



**Figure 30 : Evolution de la structure des besoins en recrutement dans les technologies quantiques en fonction des activités de l'écosystème**

Source : KYU Associés

## Plus de 2 000 recrutements d'ici 3 à 5 ans dans la filière des technologies quantiques dont 500 dans la branche

Près de la totalité des entreprises de la filière prévoient de recruter dans les prochaines années

Selon un rapport publié en septembre 2022 par le Forum économique mondial, plus de la moitié des entreprises spécialisées dans l'informatique quantique embauchent actuellement<sup>7</sup>. **Sur l'échantillon des entreprises françaises interrogées** dans le cadre de l'étude, **la totalité d'entre elles recrutent actuellement ou prévoient de recruter d'ici les prochaines années.**

Alors que les entreprises interrogées dans le cadre de cette étude comptent près de 1 600 emplois, elles prévoient de recruter environ 600 personnes d'ici 3 à 5 ans. Ainsi, le **nombre d'emplois pourrait augmenter de près de 40% sur la période**. Ces recrutements sont répartis de la manière suivante entre les grandes catégories d'acteurs :

- Environ 500 recrutements dans les entreprises et start-ups spécialisées dans la conception et la fabrication de technologies quantiques et l'algorithmie quantique (+50% sur la période) ;
- Environ 50 recrutements dans les entreprises de conseil et d'intégration (+62% sur la période) ;
- Une cinquantaine de recrutements dans les entreprises utilisatrices des technologies quantiques (+100% sur la période).

<sup>7</sup> World Economic Forum, State of Quantum Computing: Building a Quantum Economy, 13 Septembre 2022

- Les recrutements sur les chercheurs et doctorants ne sont pas recensés par notre étude, car le panel de laboratoires interrogés n'est pas représentatif de l'écosystème de recherche quantique. Nous préférons donc ne pas communiquer de chiffres pour cette catégorie d'acteurs.

Rapporté aux 3 400 emplois de la filière après redressement, **le nombre de recrutements pourrait s'élever à près de 2 000 d'ici 3 à 5 ans.**

- **Plus de 1200 recrutements sur les doctorants et postdoc** (la stratégie nationale pour les technologies quantiques prévoit l'ouverture de 100 bourses de thèse, 50 postdocs et 10 bourses jeunes talent en plus, par an, pendant au moins les 5 années à venir). <sup>8</sup>Ce volume indicatif de recrutements ne comprend pas les chercheurs et les techniciens de laboratoires (pas de panel représentatif).
- **Environ 600 recrutements dans les entreprises et start-ups spécialisées** dans la conception et la fabrication de technologies quantiques et l'algorithmie quantique ;
- Un peu plus de 60 recrutements dans les entreprises de conseil et d'intégration ;
- Une centaine de recrutements dans les entreprises utilisatrices des technologies quantiques.

**L'essentiel des recrutements serait tiré par les start-ups et petites entreprises** qui bénéficient de financements importants pour soutenir leurs efforts de R&D.



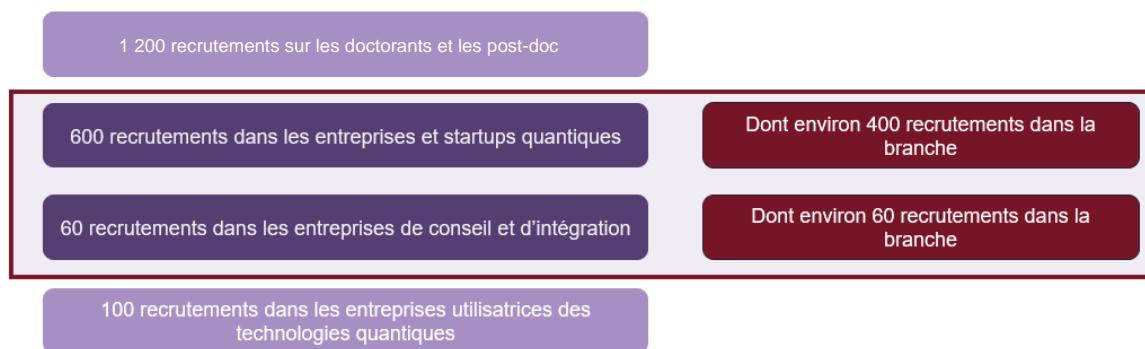
**Figure 31 : Estimation du nombre de recrutements dans la filière quantique d'ici 3 à 5 ans**  
Source : KYU Associés

**La Branche BETIC totaliserait près de 500 recrutements sur la filière quantique d'ici 3 à 5 ans**

Concernant la branche BETIC, celle-ci pourrait totaliser **près de 500 recrutements sur la filière d'ici 3 à 5 ans**, soit près de la moitié des recrutements anticipés. Ces 500 recrutements sont répartis comme suit entre les deux grandes catégories d'acteurs qui composent la branche :

- **Environ 400 recrutements** dans les entreprises et start-ups spécialisées dans la conception et la fabrication de technologies quantiques et l'algorithmie quantique ;
- **Environ 60 recrutements** dans les entreprises de conseil et d'intégration.

<sup>8</sup> Gouvernement, Stratégie nationale sur les technologies quantiques, 2021



**Figure 32 : Estimation du nombre de recrutements dans la branche d'ici 3 à 5 ans**

Source : KYU Associés

### Des besoins en recrutement concentrés sur les métiers positionnés en amont de la chaîne de valeur

Les besoins en recrutement seront portés par les acteurs de la recherche et par les acteurs positionnés sur la construction et la fabrication des équipements quantiques. De ce fait, ces besoins devraient se porter majoritairement sur les métiers de ces acteurs.

- **Pour les laboratoires** : les besoins en recrutement se porteront sur des doctorants en physique fondamentale et sur des doctorants spécialisés sur les technologies quantiques ;
- **Pour les entreprises spécialisées dans la conception et la fabrication des équipements** : les besoins se porteront sur les profils déjà présents dans les entreprises. Les entreprises seront ainsi amenées à recruter des profils très spécialisés sur les métiers de chercheur et ingénieur quantiques (quantum engineer), d'ingénieur de production, d'ingénieur DevOps, d'ingénieur développeur logiciel et dans une moindre mesure sur des techniciens et chargés d'installation et de maintenance et des chargés de développement commercial.

Les recrutements parmi les acteurs positionnés plus en aval de la chaîne de valeur devraient être moindres. Ils concerneront des métiers déjà existants.

- **Pour les entreprises spécialisées dans l'édition de logiciels et le développement d'algorithmes quantiques** : les recrutements porteront sur des profils de mathématiciens et d'informaticiens pour occuper des postes d'ingénieur de recherche, d'ingénieur DevOps et d'ingénieur développeur logiciels.
- **Pour les entreprises de développement de solutions et de services et de prestations d'intégration** : les besoins en recrutement serviront à la fois à consolider les équipes techniques en place (ingénieurs de recherche, ingénieurs DevOps, ingénieurs développement logiciel) et à développer les équipes commerciales pour continuer l'effort commercial auprès des usagers potentiels des technologies quantiques (business developer). Ces entreprises seront également amenées à recruter des experts sectoriels et des spécialistes métiers dont les compétences sont à la croisée des compétences techniques et des compétences applicatives.
- **Pour les cabinets de conseil en stratégie** : les quelques recrutements contribueront au développement de petites équipes de consultants dédiées à l'application des technologies quantiques. Les cabinets seront amenés à recruter des consultants qui se spécialisent dans des domaines d'application particuliers et qui développent des compétences transverses, entre le développement logiciel et les compétences métiers.

---

## À horizon 2030-2040, 4 scénarios d'évolution de la filière des technologies quantiques et des besoins en recrutements

Compte tenu de la forte incertitude de l'évolution de l'écosystème des technologies quantiques (conditionnée à l'évolution de la maturité scientifique des technologies), plusieurs scénarios peuvent être posés à horizon 2030-2040.

- **Un premier scénario** relève des objectifs de création d'emplois posés dans le cadre de la **stratégie nationale sur les technologies quantiques**<sup>9</sup>. Ce scénario correspond avant tout à un objectif politique et industriel : faire de la France un acteur incontournable sur la scène quantique internationale.
- **Trois scénarios « technologiques »** reposant sur la vitesse de maturation des technologies, de l'atteinte ou non de l'avantage quantique et de la capacité de la France à se positionner comme productrice de technologies quantiques :
  - À horizon 2030-2040, des avancées technologiques continues (calcul, simulation, capteur et communication) sans pour autant atteindre un avantage quantique ;
  - À horizon 2030-2040, le passage à l'avantage quantique, le développement de cas d'usage, l'industrialisation des technologies et la capacité des entreprises françaises de fabrication d'équipements quantiques à se positionner sur l'échiquier mondial.
  - A horizon 2030-2040, l'atteinte de l'avantage quantique porté par des entreprises étrangères au détriment des entreprises françaises de fabrication d'équipements quantiques.

### Scénario 1 : Une stratégie nationale sur les technologies quantiques qui prévoit la création de 16 000 emplois d'ici 2030

La stratégie nationale sur les technologies quantiques prévoit la création de 16 000 emplois d'ici 2030 et la formation de 5 000 talents sur les trois piliers technologiques : la communication (notamment les réseaux quantiques), le calcul et les capteurs quantiques.

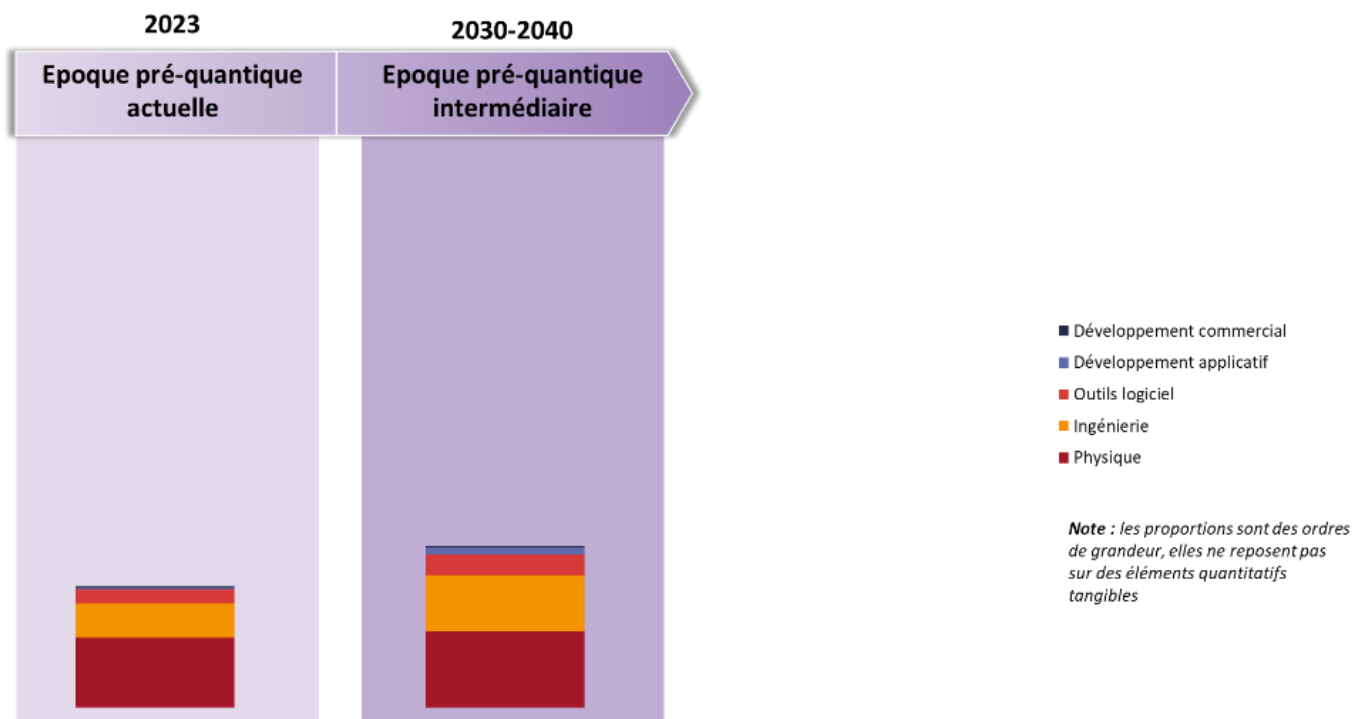
Au vu du nombre d'emplois évalués aujourd'hui, la **filière quantique pourrait ainsi compter un peu moins de 20 000 emplois en 2030**, soit une **multiplication par 5 en moins de 10 ans**. Compte tenu du fait que la dynamique prévue pour ces 3 à 5 prochaines années par les acteurs interrogés est plus faible, ce **premier scénario semble surestimer** le potentiel du volume d'emplois possible dans les prochaines années.

### Scénario 2 : Des avancées technologiques continues sans toutefois atteindre l'avantage quantique

Dans le cadre de ce scénario, nous nous situerions dans une période pré-quantique intermédiaire, l'avantage quantique n'ayant pas encore été atteint (cf. *Les besoins en recrutement dans la branche – Une évolution des besoins conditionnée par l'atteinte de l'avantage quantique*). La croissance des besoins en recrutement ainsi que l'évolution de la structure de l'emploi en 2030-2040 devraient alors rester similaires à celles observées actuellement. Les recrutements se concentreront sur la recherche et sur l'ingénierie (cf. *schéma ci-dessous*).

---

<sup>9</sup> Gouvernement, Stratégie nationale sur les technologies quantiques, 2021



**Figure 33 : Estimation de la structure et du volume de recrutements par activité d'ici 2030-2040 dans le cadre d'avancées technologiques continues sans atteindre l'avantage quantique**  
 Source : KYU Associés

Les besoins en recrutement par technologie devraient poursuivre leur dynamique actuelle :

- Les produits de la **métrologie quantique** commencent à être commercialisés sur un marché de niche. Ce marché pourrait rapidement devenir un marché de volume, comme l'envisage Thales avec les capteurs de position. De nombreux autres capteurs quantiques sont en développement à base de cavités de diamants, de lumière quantique ou de résonateurs optomécaniques qui arriveront sur le marché dans la prochaine décennie<sup>10</sup>. **Toutefois compte tenu de la taille toujours relative du marché de ces technologies, les besoins en recrutements devraient continuer à être limités.**
- Les **télécommunications quantiques** devraient continuer à se développer en restant toutefois encore peu matures et en ne mobilisant qu'un nombre limité d'acteurs de l'écosystème quantique. De ce fait, les **besoins en recrutement devraient également demeurer limités** sur ces technologies.
- **L'informatique quantique** évoluera progressivement et verra son champ applicatif s'élargir au gré de l'augmentation du nombre de qubits de qualité disponibles dans les calculateurs quantiques. Ce processus devrait être continu et passera par différentes étapes transitoires (comme le NISQ « Noisy intermediate-scale quantum », les ordinateurs quantiques qui utilisent des qubits « bruités » imparfaits<sup>11</sup>.
  - Alors que les efforts pour développer les ordinateurs quantiques se poursuivront, les recrutements sur l'informatique quantique continueront de se **concentrer sur l'ingénierie et la physique.**
  - Les acteurs de l'édition de logiciel, du développement de solutions et des prestations d'intégration verront leur activité et leurs recrutements **limités par la non-maturité de l'informatique quantique.**

<sup>10</sup> Olivier Ezratty, Comprendre l'informatique quantique, 2021

<sup>11</sup> Olivier Ezratty, Comprendre l'informatique quantique, 2021

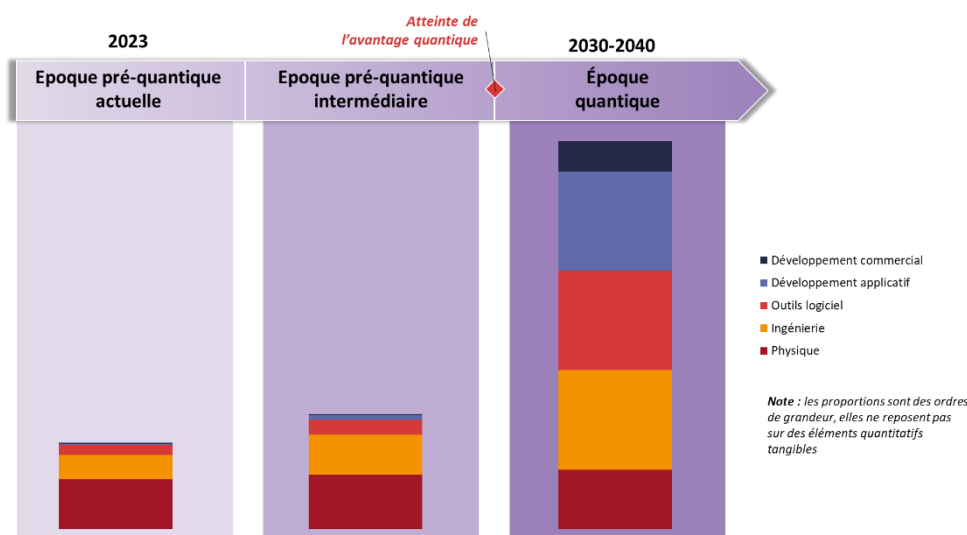
En revanche, les besoins en recrutement sur les activités connexes aux technologies quantiques pourraient continuer à se développer. Ainsi les **besoins en recrutement en algorithmie et en cryptographie post-quantique devraient croître parmi les entreprises de la branche.**

D'après Olivier Ezratty, ce scénario d'évolution semble être le plus probable aujourd'hui.

Les startups spécialisées dans le quantique représentent l'essentiel de l'emploi aujourd'hui. **Or les startups dépendent beaucoup de levées de fonds et du soutien public.** Par exemple, 40% des financements dont Quandela bénéficie sont des financements publics. Ce mode de financement n'est pas nécessairement garanti dans la durée et dépend de la confiance que les pouvoirs publics continueront de placer dans les startups quantiques à l'avenir. Les financements publics sont donc un élément d'incertitude à prendre en compte dans l'évaluation des besoins en emploi.

### Scénario 3 : L'atteinte de l'avantage quantique porté par des acteurs nationaux et une croissance forte des besoins en emplois

Dans le cadre de ce scénario, nous nous situerions dans une période quantique où l'avantage quantique a été atteint en France (cf. *Les besoins en recrutement dans la branche – Une évolution des besoins conditionnée par l'atteinte de l'avantage quantique*). Les entreprises de fabrication d'équipements quantiques françaises, et notamment les start-ups, ont atteint cet avantage et se positionnent comme des acteurs clés à l'échelle mondiale. La croissance des besoins en recrutement devrait significativement s'intensifier. La structure de l'emploi et des besoins en recrutement devrait, elle aussi, profondément évoluer en 2030-2040. Les recrutements se seront alors tirés par l'ingénierie, les outils logiciels et le développement applicatif (cf. schéma ci-dessous).



**Figure 34 : Estimation de la structure et du volume de recrutements par activité d'ici 2030-2040 dans le cadre de l'atteinte de l'avantage quantique en France en 2030-2040**

Source : KYU Associés

Du fait de l'atteinte de l'avantage quantique, les besoins en recrutement devraient profondément évoluer

- **Sur les technologies des capteurs et des communications quantiques**, les besoins en recrutement seront similaires à ceux observés dans le cadre du scénario 2. Ces technologies ne seront en effet pas concernées par l'atteinte de l'avantage quantique. Les **besoins en recrutement seront ainsi limités sur ces technologies.**
- **Sur l'informatique quantique :**
  - Les **acteurs de la conception et de la fabrication des ordinateurs quantiques** pourraient voir leurs **besoins en recrutement fortement augmenter** pour répondre à la demande croissante de la part des secteurs utilisateurs (finance, transport...). Les besoins en recrutement sur les métiers de l'ingénierie seront alors conséquents.

- Les **acteurs de l'édition de logiciels, du développement de solutions et de services** ainsi que les **prestataires d'intégration** verront **leurs besoins croître fortement**. Ils pourront en effet s'appuyer sur des équipements quantiques matures à la fois pour concevoir et développer des solutions logiciel et pour accompagner leurs clients dans l'intégration des ordinateurs quantiques à leurs process et dans l'identification des cas d'usage pertinents. Les recrutements chez ces acteurs se porteront alors sur les profils liés aux outils logiciels, au développement applicatif et dans une moindre mesure au développement commercial.
- Les usagers des technologies quantiques verront également leurs besoins augmenter, mais de manière moins importante. Ils s'appuieront à la fois sur les équipes d'experts constitués en amont et sur les acteurs de la branche pour intégrer l'informatique quantique à leurs activités.

Les besoins en recrutement sur les activités de la branche connexes aux technologies quantiques devraient également bénéficier de l'atteinte de l'avantage quantique. En effet, la sécurisation des communications à travers la cryptographie post-quantique sera d'autant plus importante une fois l'avantage quantique atteint. Les entreprises spécialisées en algorithmie et dans les solutions *quantum inspired* pourraient se positionner sur les solutions quantiques et continuer à optimiser leurs algorithmes en vue de développer la complémentarité entre les solutions informatiques classiques et les solutions quantiques.

**Les besoins en recrutement ne devraient cependant pas dépasser les quelques milliers d'emplois.**

Cela reste un volume bien en deçà des besoins en compétences dans le numérique, qui se chiffrent en dizaines de milliers de spécialistes. Cela s'explique notamment par la complexité de trouver des cas d'usage et des domaines applicatifs, des efforts développements coûteux et une concurrence accrue. <sup>12</sup>

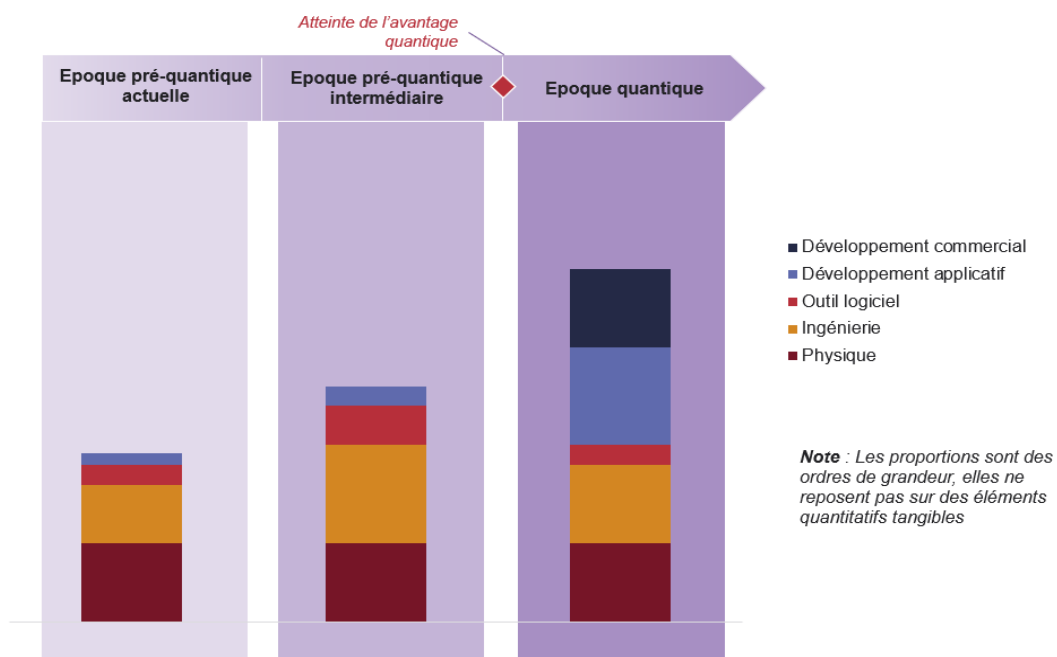
**Scénario 4 : L'atteinte de l'avantage quantique porté par des acteurs étrangers**

Dans le cadre de ce scénario, nous nous situerions dans une période quantique où l'avantage quantique a été atteint par des fournisseurs étrangers (type IBM). Cela aurait une incidence sur la structure de l'emploi entre l'offre et la demande.

- Si les startups françaises sont bien différenciées et ne sont pas en retard par rapport à leurs concurrents étrangers, alors on assistera à une croissance des besoins en recrutement côté offre (ingénierie et outils logiciels) et côté demande (développement applicatif et développement commercial) tel que décrit dans le cadre du scénario 3 (*cf. schéma ci-dessus*).
- Si les startups françaises ne parviennent pas à rester compétitives face à la concurrence des géants étrangers comme IBM (d'un point de vue technologique ou financier), la partie aval de l'écosystème français des technologies quantiques pourrait être fragilisé. Les acteurs positionnés sur l'offre (physique, ingénierie et outils logiciels) pourraient alors enregistrer une baisse des emplois. A l'inverse les acteurs positionnés sur la partie applicative en aval de la chaîne de valeur pourraient tout de même s'appuyer sur les technologies étrangères pour développer l'usage des technologies quantiques (*cf. schéma ci-dessous*).

<sup>12</sup> Olivier Ezratty, Comprendre l'informatique quantique, 2021





**Figure 35 : Estimation de la structure et du volume de recrutements par activité d'ici 2030-2040 dans le cadre de l'atteinte de l'avantage quantique à l'étranger en 2030-2040**

Source : KYU Associés



## A RETENIR

- Des formations encore peu nombreuses et relativement récentes
- Un soutien public pour accompagner le développement de l'offre de formation
- Une offre de formation initiale qui regroupe une trentaine de formations réparties entre des formations dédiées au quantique, des mentions relatives au quantique et des formations intégrant des cours relatifs au quantique
- Un appareil de formation initiale centrée autour des diplômes de niveau 7 et 8, capables de former près de 1000 étudiants et près de 175 thésards.
- Une offre de formation continue dominée par les écoles d'ingénieurs et les universités mais stratégique pour les acteurs privés de l'écosystème.

# 6. L'OFFRE DE FORMATION SUR LES TECHNOLOGIES QUANTIQUES

# L'OFFRE DE FORMATION EN FRANCE

## Une offre de formation en développement et soutenue par les pouvoirs publics

Un recensement mettant en relief le caractère émergent de la formation sur les technologies quantiques

Afin d'analyser l'offre de formation relative aux technologies quantiques, un recensement de ces formations a été réalisé. Compte tenu du nombre réduit et du caractère récent des formations relatives aux technologies quantiques, les bases de données publiques (ministère de l'Education nationale, ministère de l'Enseignement supérieur, ONISEP...) n'ont pu être mobilisées. **Le recensement se fonde donc sur une analyse documentaire et sur les entretiens réalisés dans le cadre de cette mission.** S'il vise l'exhaustivité, il est possible que certaines formations n'aient pas été intégrées à l'analyse.

Ce recensement permet de mettre en lumière :

- **Le nombre encore limité de formations** relatives aux technologies quantiques : compte tenu de la non-maturité technique et commerciale des technologies quantiques, les formations demeurent peu nombreuses. Ainsi, une cinquantaine de formations ont pu être recensées en France.
- **Le caractère récent des formations disponibles** : de nombreuses formations recensées ont moins de 2 ans d'ancienneté et certaines formations identifiées ont connu leur première promotion en 2023.

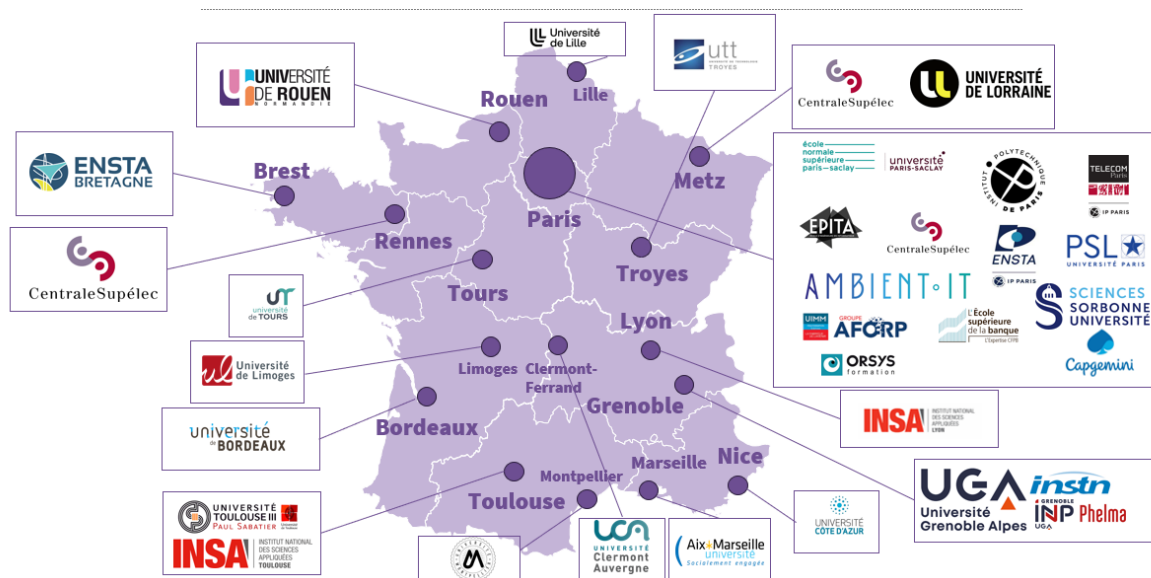


Figure 36 : Cartographie des établissements de formation initiale et continue en France

Source : KYU Associés

## Un développement des formations soutenu par le plan Quantédu

**Lauréat de l'appel à manifestation d'intérêt Compétences et métiers d'avenir**, le projet Quantédu réunit des acteurs de la formation initiale et continue, ainsi que des acteurs industriels et de l'innovation dans les technologies quantiques. Porté par l'Université de Grenoble Alpes, et soutenu par un consortium de 21 établissements académiques, ce plan bénéficie d'un soutien financier de 56 millions d'euros sur cinq années.

Quantédu a pour **ambition de répondre aux objectifs fixés** en matière d'emploi et de formation **par la stratégie nationale** pour les technologies quantiques. Ce plan vise à soutenir la formation, du niveau pré-universitaire à la formation doctorale, en mettant en œuvre des actions pour répondre aux besoins émergents en matière de compétences quantiques, mais également en soutenant l'apparition de nouveaux métiers comme les ingénieurs-docteurs quantiques<sup>13</sup>. En pratique, QuantEdu **financera à la fois des bourses de thèses, la création et le développement de nouveaux enseignements de niveau Master, ainsi que des MOOC** (Massive Open Online Course) afin de faciliter l'apprentissage initial et continu concernant les technologies quantiques. Il comprend également des **initiatives de sensibilisation** destinées aux étudiants, ainsi que des interventions auprès des lycéens, visant à instaurer un premier contact avec le domaine de la physique quantique et les technologies qui en découlent<sup>14</sup>.

---

## Une diversité des approches relatives à la formation initiale portée par les universités et les écoles

### Une trentaine de formations initiales recensées uniquement sur des niveaux master et doctorat

Le recensement des formations relatives aux technologies quantiques a permis d'identifier **une trentaine de formations** accessibles en formation initiale sur le territoire **réparties dans environ 24 établissements** (écoles d'ingénieurs et universités). Ces formations visent **toutes une certification de 7** (master ou équivalent). À raison d'une trentaine d'étudiants par formation, l'offre de formation initiale sur le territoire pourrait permettre de former **près d'un millier d'étudiants**. D'après les chiffres du gouvernement, 1 000 étudiants ont intégré un cursus niveau Master/2A/3A dans des formations à forte dominante quantique<sup>15</sup>. Les promotions de la filière sont tout de même assez réduites aujourd'hui : environ 60 étudiants pour la formation ARTEQ de Paris-Saclay, une quinzaine d'étudiants pour le parcours quantique de l'EPITA ou encore moins de 10 étudiants à l'Université de Tours.

Parmi les établissements de formation les plus importants sur les technologies quantiques se trouve le **groupement Quantum Paris-Saclay** qui compte plusieurs établissements (Institut d'Optique, CentraleSupélec, Ecole Normale Paris Saclay, universités de Versailles saint Quentin-en-Yveline, Institut Polytechnique de Paris, ENSTA). Ce groupement compte **près de 20 formations** dédiées aux technologies quantiques ou intégrant des cours relatifs aux technologies quantiques ainsi **que 3 écoles doctorales**.

Outre ces formations, il convient également de mettre en avant le nombre croissant de thèses dédiées aux technologies quantiques. **Environ 450 thèses**<sup>16</sup> liées au quantique ont été **soutenues depuis 2019**, dont près de 170<sup>17</sup> en 2022.

**Si les acteurs interrogés mettent avant le nombre relativement limité de formations adressant les technologies quantiques, ils soulignent aussi le besoin d'avoir un certain recul avant de se prononcer sur la nécessité de créer de nouvelles formations.** En effet, alors que les formations actuelles sont récentes, la création de nouvelles formations est complexe (rareté des formateurs, besoin d'actualisation continue des programmes compte tenu des avancées scientifiques, recherche de débouchés pour les diplômés...). **L'offre de formation initiale est donc encore dans une phase de structuration et de développement.**

### Une intégration hétérogène des domaines relatifs aux technologies quantiques dans les formations initiales

---

<sup>13</sup> (Ministère de l'enseignement supérieur, 2023)

<sup>14</sup> (Bourgogne, 2022)

<sup>15</sup> Ministère de l'économie, des finances et de la souveraineté industrielle et numérique, 2023

<sup>16</sup> Recensement KYU

<sup>17</sup> QuantEdu

Toutefois, ces chiffres masquent une **forte disparité du niveau de spécialisation des formations recensées autour des technologies quantiques**. Ainsi, si certaines formations sont dédiées aux technologies quantiques, d'autres n'intègrent que quelques cours permettant d'aborder les technologies quantiques dans une formation plus généraliste. Se trouvent ainsi :

#### Des formations centrées sur les technologies quantiques :

Les **technologies quantiques sont au cœur de ces formations** qui visent à former de futurs doctorants ou des ingénieurs souhaitant intégrer les centres R&D d'industriels ou de start-ups spécialisées dans les technologies quantiques. Ces formations **sont peu nombreuses** dans le paysage de la formation initiale. **Une dizaine de formations initiales** dédiées aux technologies quantiques ont ainsi été recensées. Ces formations s'adressent à des étudiants disposant d'un master 1 voir d'un master 2 dans les domaines de la physique, de la physique appliquée, de l'informatique ou encore des mathématiques.

Quelques exemples de formations initiales spécialisées sur les technologies quantiques :

- **Diplôme ARTeQ** (année de recherche en technologie quantique) **de l'ENS Paris-Saclay et de l'Université Paris-Saclay** : ce diplôme d'établissement (DE) est ouvert depuis 2020 et accessible entre un M1 et un M2. Il forme une soixantaine d'étudiants par an au calcul et aux algorithmes quantiques, à la simulation quantique, aux communications quantiques et aux capteurs quantiques. Ce parcours est avant tout destiné aux normaliens et commence à s'ouvrir aux étudiants d'écoles d'ingénieurs.
- **Parcours Sciences et technologies quantiques de l'Ecole Polytechnique** de Paris : ce parcours accessible en 3<sup>ème</sup> année vise à faire découvrir aux étudiants les principes sous-tendant les technologies quantiques, les dispositifs quantiques et les applications possibles de ces technologies ;
- **Majeure Quantum** du cycle d'ingénieur **de l'EPITA** : cette majeure récente (2023) vise à former des ingénieurs ayant une compréhension des technologies et architectures d'ordinateurs quantiques. Elle comprend 650 heures d'enseignement purement quantique et professionnalise les étudiants grâce aux plateformes de C12, Quandela, Alice&Bob et Pasqal et à un plan de formation Ecole & Entreprise ;
- **Master Ingénierie quantique de l'université PSL** de Paris : ce master en deux ans s'articule dans un programme de PhD de 5 ans (2 ans de master et 3 ans de doctorat). Il vise à former des professionnels capables de concevoir et d'implémenter des technologies quantiques.
- **Master d'Informatique – Information quantique de Sorbonne Université** : ce master ouvert depuis 2021 vise à enseigner les derniers résultats en algorithmique quantique, en cryptographie quantique, en informatique photonique quantique et en théorie de l'information quantique.
- Parmi les autres formations recensées se trouvent notamment : le Master Nanosciences et technologies Quantiques (NanoQuant) de **l'Université de Montpellier**, le Master Européen de Technologies Quantiques accessible à **l'université de Strasbourg**, le Master en Ingénierie en Technologies Quantiques de **l'université de Tours**, les master Physique - parcours matière quantique et Nanosciences et nanotechnologies parcours Quantum information and quantum engineering de **l'Université Grenoble Alpes**, le Master in fundamental physics: nanotechnologies and quantum devices (nanoquad) de **l'Université Paris Cité** et le master Physique fondamentale ingénierie quantique et matière condensée (PFIQMC) de **l'Université de Toulouse III Paul Sabatier**.

#### Des formations avec des mentions relatives aux technologies quantiques :

Ces mentions spécialisées sur les technologies quantiques **s'insèrent dans des parcours plus généraux et permettent à certains étudiants de découvrir les technologies quantiques**. Ces formations sont surtout présentes dans les écoles d'ingénieurs proposant un parcours d'ingénieur généraliste avec la possibilité de choisir des mentions.

Quelques exemples de formations initiales avec des mentions relatives aux technologies quantiques :

- **Mention Ingénierie quantique de CentraleSupélec** : cette formation vise à former des physiciens généralistes qui soient avant tout des ingénieurs sensibilisés aux technologies quantiques ;
- **Option Quantum Engineering de Télécom Paris** : cette option accessible en 3<sup>ème</sup> année permet d'acquérir les bases théoriques et expérimentales des technologies quantiques ;

- **Option Sciences et Technologies quantiques de Télécom Physique Strasbourg** : accessible en 2<sup>ème</sup> année cette option forme les étudiants aux fondamentaux de la physique quantique, ainsi qu'aux enjeux technologiques et industriels qui en découlent.

#### Des formations avec des cours relatifs aux technologies quantiques :

Ces formations ne sont pas spécifiques aux technologies quantiques. Toutefois, elles **intègrent certains cours** permettant de **faire découvrir aux étudiants ces technologies**.

Quelques exemples de formations initiales proposant des cours relatifs aux technologies quantiques :

- Master Nanosciences et nanotechnologies, parcours : non-ingénierie et dispositifs quantiques **d'Aix-Marseille Université** ;
- Cours de Physique quantique au sein du cursus d'ingénieur de **l'INP Grenoble** ;
- Cours au sein de la spécialité Génie Physique des Matériaux de **l'INSA Rennes** ;
- Cours de physique quantique et statistique au sein de **l'INSA Toulouse** ;
- Se trouve aussi des cours relatifs aux technologies quantiques au sein du master Informatique des **Université de Lorraine et de Rouen**, de plusieurs masters de **l'Université Paris Saclay** (Master 1 physique, Master 2 Concepts fondamentaux de la physique, Master 2 Molecular nano bio photonics...) ou encore du parcours « De l'atome au matériau : matière condensée, matière molle, matériaux fonctionnels » de **l'École Polytechnique de Paris**.

#### Une haute spécialisation des formations

Les formations en technologies quantiques sont souvent hautement spécialisées, reflétant la diversité des domaines que recouvre le quantique. Certaines formations mettent l'accent sur des domaines particuliers, tels que la photonique, les nanotechnologies, ou l'informatique quantique. Cette diversité permet aux étudiants de choisir des parcours correspondant à leurs intérêts et objectifs de carrière. On retrouve ainsi plusieurs dominantes au sein des établissements suivants :

- **Physique fondamentale** : Institut Polytechnique, ENSTA, Université Toulouse III, Grenoble INP, Université de Grenoble, INSA Toulouse, INSA Rennes
- **Informatique quantique** : EPITA, Sciences Sorbonne Université, Université de Rouen, Université de Lorraine
- **Algorithmie et statistiques quantiques** : CentraleSupélec, INSA Toulouse
- **Ingénierie quantique** : ENSTA, Telecom Paris, PSL, Université Toulouse III, INSA Lyon

---

## Une offre de formation continue partagée entre les acteurs de la formation initiale et des acteurs de l'écosystème des technologies quantiques

#### Une offre de formation continue dominée par les écoles d'ingénieurs et les universités

Parmi la **vingtaine d'acteurs proposant des formations accessibles en formation continue** près de **la moitié sont des acteurs de la formation initiale**. Ces formations sont réparties entre des formations longues (1 à 2 ans) permettant de former des ingénieurs en technologies quantiques et des formations plus courtes (1 à 5 jours) qui ont davantage pour objectif de sensibiliser aux technologies quantiques ;

Deux modèles se dessinent :

- **Les acteurs et les formations qui ouvrent leurs formations initiales à la formation continue.** Presque l'intégralité des formations mentionnées ci-dessus est également accessible en formation continue.
- **Les acteurs qui ouvrent des formations spécifiquement accessibles en formation continue** visant à faire **découvrir et acculturer les acteurs aux technologies quantiques**. C'est notamment le cas de :
  - l'ENSTA Bretagne - « Introduction aux technologies quantiques pour les sciences de l'information » (positionnée sur les capteurs et les communications quantiques)
  - l'Ecole polytechnique de Paris - « Introduction à la physique quantique » accessible sous format MOOC ;
  - l'Institut Polytechnique de Paris qui propose d'adapter son offre Executive Education aux technologies quantiques ;
  - Télécom Paris – « Comprendre l'informatique quantique ».

### Une offre de formation continue stratégique proposée par des acteurs de l'écosystème des technologies quantiques

Proposer une offre de formation continue aux technologies quantiques est stratégique pour les acteurs de l'écosystème des technologies quantiques à deux titres :

- Elle permet de **se positionner comme un acteur essentiel dans l'acculturation aux technologies quantiques** auprès des futurs utilisateurs ;
- Elle permet également de **promouvoir une technologie spécifique** (au détriment de celles utilisées par des concurrents) auprès des acteurs de l'écosystème.

La formation par les acteurs de l'écosystème peut passer par :

- **La proposition de formations structurées sur catalogue** - C'est notamment le cas de Capgemini qui propose une formation « Explorer le potentiel de l'informatique quantique » et de Microsoft qui propose un programme de formation « Démarrage avec Azure quantum »
- **L'accompagnement et l'acculturation des clients aux technologies quantiques** – La formation est alors indirecte et intégrée à l'offre de services proposés aux clients. Des acteurs de la branche comme Eviden ou Capgemini participent à ce mode de formation.
- **La mise à disposition de plateformes** – Elle permet d'explorer les possibilités des technologies quantiques (codage, paramétrage, simulation, test d'algorithme...) en autoformation. Alors qu'IBM propose depuis quelques années IBM Quantum Platform, Pasqal a récemment ouvert au public une plateforme permettant d'accéder à un ordinateur quantique via le Cloud<sup>18</sup>.
- **La mise en place de partenariats entre acteurs de l'écosystème** – Compte tenu de la rareté des compétences, les partenariats mis en place entre les différents acteurs de l'écosystème permettent également de former les salariés de la branche sur des aspects techniques de pointe sur les technologies quantiques.

### Des acteurs de la formation continue « traditionnels » peu nombreux et davantage positionnés sur la sensibilisation aux technologies quantiques

Un peu moins d'une dizaine d'organismes de formation traditionnels proposant des formations sur les technologies quantiques ont été identifiés. Parmi les formations recensées, la grande majorité d'entre elles sont des formations courtes de quelques jours (1 à 3 jours). Elles **s'apparentent plus à des séminaires de présentation et des journées de sensibilisation qu'à de véritables formations**. Permettant de former sur des métiers ou des compétences des technologies quantiques.

Parmi les formations proposées **se trouvent des formations généralistes** permettant de présenter les technologies quantiques :

- **Ambient IT** qui propose une formation « Introduction à la physique quantique »

<sup>18</sup> Le Monde Informatique, 10/05/2022



- **CPE Lyon Formation continue** qui propose la formation « Les fondamentaux de l'informatique quantique – algorithmes et programmation »
- **ESBanque** qui propose la formation « Informatique quantique et finance »
- **INSTN** qui propose la formation « Les fondamentaux de l'informatique quantique »
- **Orsys formation** qui propose la formation « Informatique quantique, les nouveaux enjeux métiers »

Se trouvent également **des formations plus techniques** avec notamment :

- Le **groupe AFORP** qui propose une formation visant le CQPM (certification de qualification professionnelle de la métallurgie) « Développeur informatique d'applications quantiques » de niveau 7 ;
- **Udemy** qui propose des MOOC sur diverses thématiques relatives à l'informatique quantique ;
- **Qureca** qui propose des formations en ligne et des formations pour l'industrie allant de la découverte des technologies quantiques jusqu'à des formations dites « quantum master » de plus haut niveau.

### Une offre de formation qui n'apparaît aujourd'hui pas encore comme un enjeu pour les acteurs de l'écosystème interrogés

L'offre de formation continue proposée en France a commencé à se déployer entre 2016-2020. Parmi les acteurs de l'écosystème interrogés, y compris les entreprises de la branche, **l'offre de formation continue sur les technologies quantiques n'apparaît pas comme un enjeu majeur**. En effet, parmi ceux déjà positionnés sur les technologies quantiques, **la formation continue passe essentiellement par des partenariats avec d'autres acteurs de l'écosystème ou de l'autoformation**. Compte tenu du haut niveau de technicité des sujets et des avancées scientifiques et industrielles constante dans le domaine, l'offre de formation « sur catalogue » n'apparaît pas comme un format adapté pour la formation de ces acteurs.

En revanche, **les formations plus généralistes peuvent permettre aux acteurs qui souhaiteraient s'acculturer aux technologies quantiques de découvrir ce domaine, ses enjeux et les défis techniques existants**.

# BENCHMARK INTERNATIONAL DE L'OFFRE DE FORMATION QUANTIQUE

## Le Quantum Flagship, le projet QuanTEdu et le Quantum Technologies Courses for Industry

Afin d'identifier des pistes d'action pour la branche (présentées ci-après), nous avons réalisé un benchmark international de l'offre de formation quantique. A première vue, l'offre de formation en France des caractéristiques et des modalités similaires à celles des grands acteurs internationaux. Les formations sont encore peu nombreuses et relativement récentes et sont pour la plupart dispensées par des écoles d'ingénieurs, des universités ou des centres de recherche. Nous avons fait le choix de nous focaliser sur certains **projets intégrés dans le plan QuanTEdu du Quantum Flagship**, qui pourraient répondre aux enjeux identifiés ci-après.

### Le Quantum Flagship

Le **Quantum Flagship** est une initiative de recherche et de développement lancée par la Commission européenne dans le cadre du programme de financement de la recherche et de l'innovation de l'Union Européenne, appelé Horizon 2020. L'objectif du Quantum Flagship est de stimuler la recherche et le développement dans le domaine de la technologie quantique en Europe.

### Le projet QuanTEdu

Le **projet QuanTEdu** réunit lui des acteurs de la formation initiale et continue et des acteurs majeurs de l'industrie et de l'innovation dans les technologies quantiques, avec l'ambition de répondre aux objectifs fixés par la stratégie nationale pour les technologies quantiques dans le cadre de l'accélération du développement des compétences et du capital humain. L'idée est de préserver le caractère généraliste des enseignements disciplinaires et fondamentaux, tout en favorisant l'interdisciplinarité, l'esprit d'innovation et l'insertion sur le marché du travail. L'objectif du projet est de consolider les interactions entre les universitaires de toutes disciplines, les chercheurs et les acteurs économiques locaux et nationaux.

**Le projet rassemble 6 types d'interventions, pour 4 types d'acteurs :**

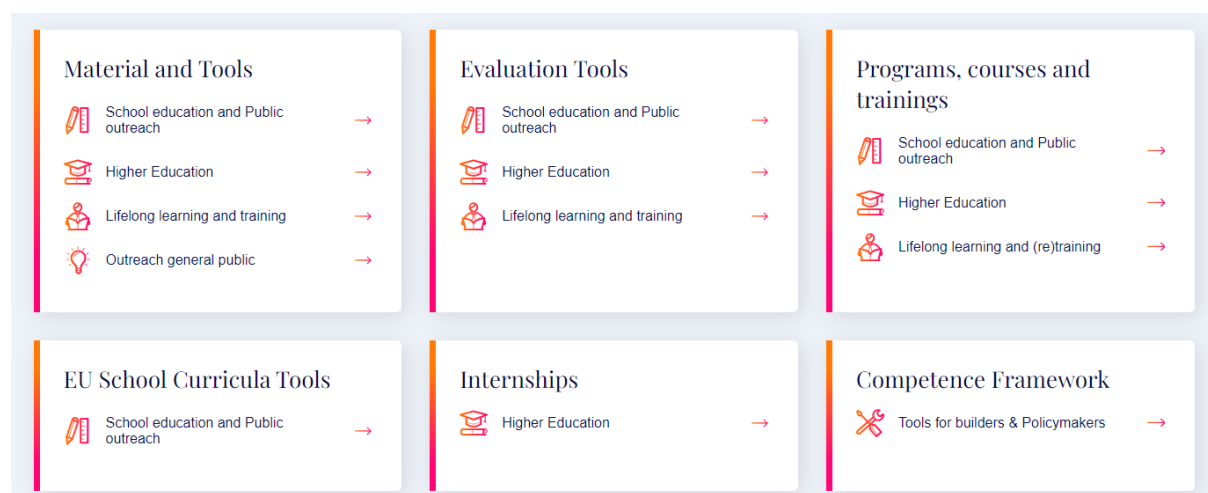


Figure 37 : Cartographie des initiatives du plan QuanTEdu

Source : Quantum Flagship

# Des formations permettant l'acculturation des entreprises et des salariés du numérique au quantique

Trois types d'initiatives permettent d'acculturer les salariés et les entreprises du numérique au quantique :

- Les outils d'acculturation au quantique basés sur la gamification
- Les ressources d'autoformation en ligne
- Le Quantum Technologies Courses for Industry

## Les outils d'acculturation au quantique basés sur la gamification

Ces outils permettent de vulgariser les concepts de la physique et de l'informatique quantique et d'acculturer les utilisateurs à leurs usages.

**Qplaylearn - [qplaylearn](http://qplaylearn.com)**

Outil interactif permettant de vulgariser les concepts de la physique et de l'informatique quantique. La formation s'adapte aux différents modes d'apprentissage des utilisateurs et à leur niveau de connaissance préalable. L'outil comprend également plusieurs dictionnaires, des jeux interactifs (the photonic trail) et un jeu de cartes.

**Quantum Tour – ICFO (Institut des sciences pour la photonique)**

Plongez dans le monde fascinant de la physique quantique grâce à cette plateforme unique ! Cette visite virtuelle se déroule sur une plateforme segmentée en zones inspirées du bâtiment de l'ICFO. On y trouve des animations et des vidéos auxquelles plusieurs chercheurs de l'ICFO ont participé, qui donnent une idée sur les développements majeurs de la recherche dans ce domaine.

**Quantum Moves 2 – Aarhus University**

Dans Quantum Moves 2, les joueurs aident les chercheurs à résoudre et à comprendre de véritables problèmes dans la recherche quantique de pointe, le but étant d'optimiser les solutions aux problèmes proposés.

**LearnQM – Georgia Institute of Technology**

LearnQM est un site web qui propose des jeux numériques et des visualisations interactives pour apprendre la physique quantique et la physique des semi-conducteurs. Il héberge actuellement trois plateformes : « Particle in a Box », « Psi and Delta » et « Semiconductor Visualizations ».

Figure 38 : Exemples d'outils d'acculturation au quantique basés sur la gamification

Source : KYU Associés, QuantEdu

## Les ressources d'autoformation en ligne

Parmi les ressources d'autoformation en ligne les plus matures et les plus utilisées dans le monde, on trouve :

- **IBM Quantum Expérience** : Accès gratuit à des ordinateurs quantiques via le cloud, tutoriels en ligne et ressources pédagogiques.
- **Microsoft Quantum Development Kit** : Outils de développement quantique et tutoriels interactifs
- **Rigetti Quantum Computing** : Cours en ligne gratuits sur l'informatique quantique, ainsi qu'un accès à leur processeur quantique via le cloud.
- **Qskit (IBM)** : Qiskit est un framework open-source pour la programmation quantique.
- **PennyLane (Xanada Quantum Technologies)** : Bibliothèque de programmation quantique open-source s'intégrant à des Frameworks tels que TensorFlow et PyTorch. Elle offre une approche unique pour les développeurs familiarisés avec le machine learning, en permettant l'intégration des techniques quantiques dans des applications d'apprentissage automatique.

## La QUTECH ACADEMY, une offre de formation originale proposée par l'Université de Delft (Pays-Bas)

Rattaché à l'institut de recherche Qutech, la Qutech Academy est un organisme de formation qui se veut pionnier dans le domaine de l'informatique quantique. Il propose une offre de formation très complète, allant du Bachelor au Phd. La Qutech Academy met également à disposition des étudiants des cours en ligne, des MOOC et des plateformes interactives.

QuTech participe activement au développement du « Quantum Initiative for Business », une initiative européenne dont la mission est d'accroître l'adoption des technologies quantiques sur le marché en transférant des connaissances académiques aux entreprises. QFB est une plateforme collaborative à but non lucratif qui offre de multiples ressources et possibilités d'échange au sein de la communauté quantique.

## Le Quantum Technologies Courses for Industry

Le **Quantum Technologies Courses for Industry** est également une initiative financée par la Commission européenne. Cette initiative a trois objectifs :

- Offrir un programme de formation court en technologies quantiques à travers toute l'Europe
- Développer des formations spécifiques aux besoins en compétences des entreprises du secteur et leurs différents cas d'usage
- Favoriser le développement de connaissances et de compétences quantiques à travers l'Europe

**Les programmes de formation élaborés dans le cadre de cette initiative seront alignés sur le Cadre de compétences en technologie quantique et conforme aux compétences émergentes identifiées par le Quantum Flagship.** Ces programmes de formation, axés sur les PME, seront adaptés à différents secteurs d'activité et aux besoins de l'industrie. Alors que la future main-d'œuvre quantique sera formée à travers de nouveaux programmes académiques, QTIndu permettra le perfectionnement des professionnels, créant ainsi un nouveau vivier de talents sur les technologies quantiques.

## Des formations permettant le développement de compétences indirectement concernées par les technologies quantiques

Quelques modules de formation sur les technologies annexes au quantique (cryptographie post-quantique, quantum-inspired, modèles hybrides... commencent à voir le jour en France et à l'international.

**TensorFlow Quantum (TQP) - Google** — TensorFlow Quantum

TensorFlow Quantum est une bibliothèque de machine learning quantique sur Python, permettant un prototypage rapide des modèles de machine learning hybrides quantiques/classiques. Cette solution permet le développement de compétences en algorithmie hybride et en quantum [embedding](#) via l'accès aux ordinateurs développés par Google.

[TensorFlow Quantum](#)

**Cryptographie pour la protection des données – Telecom Paris**

Ce stage interentreprise présente les principaux systèmes cryptographiques indispensables pour la réalisation des services de confidentialité des données, de contrôle d'intégrité et d'authentification. Le programme couvre l'ensemble des enjeux liés à la cryptographie classique, avec un focus sur les implications des ordinateurs quantiques et l'importance de la cryptographie post-quantique. Le public cible est les ingénieurs techniques, DSI (des connaissances générales en mathématiques et en algorithmie sont souhaitables).

[La cryptographie pour la protection des données | Formation \(telecom-paris.fr\)](#)

**Quantum Programming – D-Wave** — D-Wave Learn

D-Wave propose une formation en ligne d'une semaine, donnant accès au service cloud quantique Leap de D-Wave pendant toute la durée de la formation (accès en temps réel aux ordinateurs quantiques « Advantage » et aux **services de solveurs hybrides** pendant un mois, permettant le développement de compétences en algorithmie hybride également).

[Learn Quantum Programming with D-Wave Training \(dwavesys.com\)](#)

Figure 38 : Exemples d'outils d'acculturation au quantique basés sur la gamification

Source : KYU Associés, QuanTEdu



## A RETENIR

- Des formations encore peu nombreuses et relativement récentes
- Un soutien public pour accompagner le développement de l'offre de formation
- Une offre de formation initiale qui regroupe une trentaine de formations réparties entre des formations dédiées au quantique, des mentions relatives au quantique et des formations intégrant des cours relatifs au quantique
- Un appareil de formation initiale centrée autour des diplômes de niveau 7 et 8, capables de former près de 1000 étudiants et près de 175 thésards.
- Une offre de formation continue dominée par les écoles d'ingénieurs et les universités mais stratégique pour les acteurs privés de l'écosystème.

# 7. CONCLUSIONS, ENJEUX POUR LA BRANCHE ET PISTES D'ACTION

# CONCLUSIONS ET CONSTATS DE L'ETUDE

**Cette étude permet de mettre en lumière quelques grands constats sur l'écosystème des technologies quantiques en France :**

- Les technologies quantiques restent un secteur peu mature technologiquement et commercialement ;
- La branche joue un rôle clé dans le développement des technologies quantiques car elle est positionnée sur l'ensemble de la chaîne de valeur des technologies quantiques
- Les métiers du quantique sont des métiers qui existent déjà au sein de la branche, mais dont les compétences sont amenées à fortement évoluer (développement de nouvelles compétences propres au quantique) ;
- La croissance des besoins en recrutement dans les prochaines années est importante. Toutefois, à court terme ces besoins demeurent limités au regard du secteur de niche que représente le quantique. Les besoins en recrutement pourraient se porter davantage sur des activités connexes aux technologies quantiques. A long terme, les besoins en recrutement devraient croître, toutefois la structure de l'emploi à cet horizon dépend de multiples facteurs (maturité technologique, concurrence internationale, capacité de financement).
- L'appareil de formation (initiale et continue) sur le domaine est récent et encore en construction. L'autoformation et les partenariats demeurent des modalités de formation particulièrement importantes dans le secteur.

## **Les technologies quantiques restent un secteur peu mature technologiquement et commercialement**

**Les besoins en recrutement existent, mais restent relativement limités à court et moyen terme (environ 2 000 recrutements d'ici 3 à 5 ans, essentiellement portés par la recherche fondamentale et appliquée et par les start-ups positionnées sur la fabrication des ordinateurs quantiques). Les besoins sont concentrés sur des métiers hautement qualifiés, qui doivent disposer de compétences nouvelles.**

Les besoins étant limités, les **entreprises ne rencontrent pas de problématiques particulières pour recruter**. Les seules tensions pourraient s'expliquer par un besoin en profils très qualifiés et ayant des compétences diverses et souvent rares. Toutefois, à court et moyen terme, ces tensions pourraient s'intensifier du fait du temps de formation relativement long des étudiants aux technologies quantiques, de l'intensification de la concurrence internationale au recrutement et de la concurrence au recrutement d'autres secteurs requérant des compétences spécialisées mobilisées par le quantique (électronique, mathématiques...).

## **La branche joue un rôle clé dans le développement des technologies quantiques**

**Les entreprises de la branche sont positionnées sur l'ensemble de la chaîne de valeur des technologies quantiques.** Elles interviennent dès la fabrication des équipements quantiques jusqu'au cœur de l'acclimatation des futurs usagers, en passant par l'édition de logiciel et les prestations d'intégration.

**Les métiers du quantique sont des métiers déjà existants au sein de la branche, mais dont les compétences sont amenées à évoluer (développement de nouvelles compétences propres au quantique)**

**Les technologies quantiques ne sont pas génératrices de nouveaux métiers. En revanche, les besoins en compétences parmi les métiers de la branche sont nouveaux et extrêmement pointus.** Les salariés impliqués sur ces technologies devront notamment combiner des connaissances en physique, en informatique et en mathématiques en plus d'avoir une compréhension générale des technologies quantiques et de leur fonctionnement.

## Position sur la chaîne de valeur des technologies quantiques

	Conception et fabrication des équipements	Prestations d'ingénierie	Edition de logiciels et algorithmie	Développement de solutions et de services et prestations d'intégration	Conseil en stratégie et applications
<b>Métiers</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Chercheur quantique</li> <li>Ingénieur quantique</li> <li>Ingénieur de production</li> <li>Ingénieur DevOps</li> <li>Product Owner cloud services</li> <li>Ingénieur développeur logiciels</li> <li>Technicien d'installation et de maintenance</li> <li>Responsable du développement commercial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ingénieur de recherche</li> <li>Ingénieur de conception</li> <li>Chercheur en correction d'erreur</li> <li>Développeur</li> <li>Chef de projet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ingénieur de recherche</li> <li>Ingénieur DevOps</li> <li>Ingénieur développeur logiciel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ingénieur de recherche</li> <li>Ingénieur DevOps</li> <li>Ingénieur développeur logiciel</li> <li>Technicien d'installation et de maintenance</li> <li>Architecte de systèmes quantiques / classiques</li> <li>Business developer</li> <li>Expert sectoriel</li> <li>Spécialiste métier</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Expert sectoriel</li> <li>Spécialiste métier</li> </ul>
<b>Prérequis théoriques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Concepts de la physique quantique</b> : Concepts de base de la physique quantique, Formalisme mathématique, Dynamique des qubits</li> <li><b>Fondements physiques des technologies quantiques</b> : Physique atomique pour les technologies quantiques, optique quantique pour les technologies quantiques, physique du solide pour les technologies quantiques</li> </ul>				
<b>Compétences mobilisées par type de technologie</b>	<b>Compétences Ordinateurs quantiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dispositifs supraconducteurs</li> <li>Dispositifs à spin</li> <li>Atome neutre et ions</li> <li>Qubits</li> <li>Systèmes photoniques</li> <li>Hardware pour l'initialisation, la manipulation et la mesure d'un qubit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Théorie de la complexité</li> <li>Algorithme quantique</li> <li>Firmware et middleware</li> <li>Programmation, langages et compilateurs quantiques</li> <li>Orchestration et cloud</li> <li>Simulation quantique</li> <li>Correction d'erreurs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Chimie inorganique</li> <li>Chimie des batteries</li> <li>Chimie organique</li> <li>Biologie moléculaire</li> <li>Optimisation</li> <li>Logistique et transports</li> <li>Mathématiques financières</li> <li>Quantum Machine Learning</li> </ul>	
	<b>Compétences Communications quantiques et télécommunications</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cryptographie quantique</li> <li>Cryptographie post-quantique</li> <li>Réseaux quantiques</li> <li>Infrastructure pour la communication quantique</li> <li>Hardware pour les communications quantiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sécurisation d'infrastructures cloud</li> <li>Sécurisation du stockage des données</li> </ul>		
	<b>Compétences Capteurs quantiques et solutions de métrologie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Capteurs quantiques (champs électromagnétiques, températures, particules et pression, gravitationnels, horloges quantiques)</li> <li>Imagerie quantique</li> <li>Champ d'application des capteurs quantiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Industrie 4.0</li> <li>Défense</li> <li>Métrologie</li> <li>Transports</li> <li>Géodésie</li> <li>BTP</li> </ul>		

Figure 39 : Métiers et nouvelles compétences dans le Branche sur le quantique

Source : KYU Associés

L'appareil de formation sur le domaine est encore en construction

Sur la formation initiale, l'offre de formation est en développement mais les organismes de formation ont besoin de recul pour appréhender la demande future. Sur la formation continue, l'offre existe, mais la demande reste relativement faible (beaucoup d'autoformation...).



# ENJEUX IDENTIFIES POUR LA BRANCHE ET PISTES D'ACTION

## Deux grands enjeux identifiés pour les entreprises de la branche

**Au regard du niveau de maturité actuel des technologies quantiques et de ses perspectives d'évolution, deux enjeux importants apparaissent pour la branche à court terme :**

- Acculturer les entreprises et les salariés du numérique au quantique
- Développer des compétences indirectement concernées par les technologies quantiques (cryptographie post-quantique, solution quantum-inspired, algorithmie...)

### Acculturer des entreprises et des salariés du numérique au quantique

Aujourd'hui, l'écosystème des technologies quantiques compte un nombre limité d'acteurs notamment sur la partie édition de logiciel / algorithmie. **Or, quel que soit le scénario d'évolution envisagé, la partie logicielle devrait être amenée à se développer ces prochaines années.** La préparation des entreprises du numérique à cette évolution est donc importante.

Les profils traditionnels de la branche sont un vivier potentiel de recrutement pour les entreprises de l'écosystème quantique qui les forment ensuite pour développer des compétences complémentaires. **Leur acculturation aux technologies quantiques pourrait faciliter les évolutions professionnelles vers le quantique.**

### Développer des compétences indirectement concernées par les technologies quantiques

Les besoins en recrutement sur des profils et des compétences directement liés aux technologies quantiques sont limités. Par ailleurs, les entreprises du secteur s'organisent pour trouver et former ces profils. L'enjeu apparaît moins prioritaire au regard du périmètre d'activité de l'OPIIEC et d'ATLAS.

**Les besoins en recrutement pourraient en revanche être importants sur d'autres activités de la branche indirectement liées aux technologies quantiques** (cryptographie post-quantique, algorithmie, solutions hybrides, solutions quantum-inspired etc...).

## Trois pistes d'action à court terme pour la branche

**Action 1 – Initier une coopération entre les académiques et les professionnels d'un secteur applicatif afin de concevoir une offre de formation verticale pouvant servir de démonstrateur pour d'autres secteurs**

### Constat de l'étude

Alors que l'écosystème des technologies quantiques est essentiellement concentré en amont de la chaîne de valeur (recherche, conception et fabrication d'équipements), le développement de la maturité de ces technologies devrait favoriser les activités en aval de cette chaîne (prestations de services, édition de logiciels, usages...).

L'offre de formation se concentre actuellement sur la physique quantique, le calcul et les technologies quantiques. Ces dernières sont au cœur des formations dispensées, qui visent à former de futurs doctorants ou des ingénieurs souhaitant intégrer les centres R&D d'industriels ou de start-up spécialisées dans les technologies quantiques. En revanche, l'appareil de formation n'intègre pas encore de modules dédiés aux domaines d'application du quantique, ce qui ne permet pas de couvrir les futurs besoins en compétences des entreprises utilisatrices des technologies quantiques, notamment ceux des grands groupes bancaires et financiers.

De ce fait, un rapprochement entre les acteurs amont et aval de la chaîne de valeur autour de la formation permettrait de renforcer l'acculturation des acteurs aval de la chaîne de valeur.

Aujourd'hui, La finance s'avère être un des domaines d'application de l'informatique quantique les plus mûres. Les banques doivent optimiser de nombreuses facettes de leurs activités, notamment celles de la gestion de leurs portefeuilles, des risques de change, des produits dérivés... L'optimisation d'actifs est ainsi la principale application imaginée pour les technologies quantiques. Les banques ont également besoin de détecter au plus près les risques de fraudes, ce que permettra potentiellement de faire la cryptographie quantique. En 2019, BNP Paribas a créé une communauté interne d'une cinquantaine de personnes investiguant les usages du calcul quantique dans la banque et a organisé un événement autour des technologies quantiques, en partenariat avec IBM, Cryptonext et QuantiFi. Le Crédit Mutuel et le Crédit Agricole ont également lancé des initiatives de même nature.

### **Description de l'action préconisée**

Il s'agit d'initier et de déployer une coopération entre les académiques et les professionnels d'un des secteurs applicatifs du quantique (ex : la finance) afin de concevoir une offre de formation verticale, permettant d'acculturer les étudiants et futurs professionnels aux technologies quantiques et à leurs cas d'usage dans un domaine précis. Cette action consiste à faire intervenir une ou deux entreprises dans un établissement proposant des formations en lien avec un secteur applicatif du quantique. Le secteur de la finance semble être le plus pertinent pour déployer cette action (périmètre OPCO ATLAS, établissements de formation de pointe, applications multiples...). A terme, cette action pourrait être déployée dans d'autres secteurs applicatifs.

### **Action 2 – Développer un MOOC « Quantique et sécurité : menaces et opportunités » en partenariat avec une ou deux entreprises spécialisées du domaine, afin d'acculturer les salariés du numérique à ses enjeux**

#### **Constat de l'étude**

D'ici 3 à 5 ans, il apparaît que les besoins en recrutement seront importants sur les activités de la branche indirectement liées aux technologies quantiques (cryptographie post-quantique, algorithmie, solutions hybrides, solutions quantum inspired...), notamment sur la cryptographie post-quantique.

La cryptographie est une technologie à fort enjeu, car la sécurisation des données intervient à chaque instant dans de très nombreux domaines de la vie privée ou publique. Elle représente également un enjeu stratégique pour les entreprises, les grands groupes industriels ou les états.

La cryptographie post-quantique représente aujourd'hui une clé d'entrée dans le domaine du quantique et devrait mobiliser assez rapidement les entreprises. Il semble donc important d'acculturer les salariés du numérique au quantique et aux enjeux de la cryptographie post-quantique.

### **Description de l'action préconisée**

Il s'agit de développer une formation à distance de type MOOC, permettant d'acculturer les salariés de la branche aux enjeux du quantique, de leur donner des premiers éléments de définition, et de leur présenter de manière plus détaillée l'intérêt et le fonctionnement de la cryptographie post-quantique. Ce MOOC pourrait être réalisé en partenariat avec une ou deux entreprises spécialisées sur le sujet (CryptoExperts, CryptoNext Security...). Cette action devrait permettre de déployer un module de formation similaire sur le quantum-inspired et les modèles hybrides. Ces modèles sont aujourd'hui matures technologiquement et représentent également une clé d'entrée dans le quantique pour les entreprises et les salariés de la branche.

### **Action 3 – Créer une table d'orientation destinée aux salariés et aux entreprises du numérique, leur permettant d'identifier les formations pertinentes pour évoluer vers le quantique, compte tenu de leurs compétences et des compétences que requiert le métier qu'ils visent**

#### **Constats de l'étude**

Les métiers des technologies quantiques existent déjà dans la branche avec des compétences qui peuvent être remobilisées par des entreprises du quantique (IA, données...). Toutefois, les compétences à développer pour intégrer le secteur du quantique restent nombreuses et pointues.

Il existe aujourd'hui une diversité de formations, de bootcamps et de MOOC permettant de s'acculturer au quantique ou de se former sur ses aspects techniques. Ces parcours sont de niveaux différents et destinés à différents usages (algorithmie, cryptographie, capteurs, usage du quantique...). Face à la diversité des programmes, il semble toutefois difficile pour les salariés souhaitant s'orienter vers le quantique de baliser des parcours de formation répondant précisément à leurs besoins en compétence.

### **Description de l'action préconisée**

Il s'agit de construire et de déployer une table d'orientation destinée aux salariés du numérique en réorientation, leur permettant d'identifier les formations pertinentes pour évoluer vers le quantique, compte tenu de leurs compétences actuelles et des nouvelles compétences que requiert le métier qu'ils visent. Le déploiement de cette action s'appuiera d'une part sur le recensement des formations continues existantes dans le domaine du quantique et d'autre part sur la liste des compétences propres au quantique, recensées dans le cadre de l'étude. L'idée sera d'établir des passerelles entre métiers, à partir des fiches métiers existantes de la branche, afin d'identifier de manière précise les formations permettant aux salariés du numérique de monter en compétences sur certains sujets.

# ANNEXES

## GLOSSAIRE

**Algorithmie** : domaine d'étude de la résolution de problèmes par la mise en œuvre de suites d'opérations élémentaires selon un processus défini aboutissant à une solution.

**Atome** : constituant fondamental de la matière.

**Capteurs quantiques** : instruments de mesure extrêmement précis exploitant les lois de la physique quantique. Ils reposent sur la manipulation parfaite d'objets microscopiques (photons, atomes, électrons), sensibles à la moindre perturbation de l'environnement.

**Chipset quantique** : comprend les registres quantiques, les portes quantiques et les dispositifs de mesure lorsqu'il s'agit de qubits à supraconducteurs ou à quantum dots.

**Commandes de portes quantiques** : dispositifs physiques agissant sur les qubits des registres quantiques, à la fois pour les initialiser et pour y effectuer des opérations de calcul.

**Communications quantiques** : technologies permettant de transférer des informations quantiques sur de longues distances et de connecter des dispositifs quantiques entre eux.

**Cryogénie** : étude et la production des basses températures (inférieures à  $-150\text{ °C}$  ou  $120\text{ K}$ ) dans le but de comprendre les phénomènes physiques qui s'y manifestent.

**Cryptographie quantique** : technologie quantique reposant sur la transmission de qubits générés aléatoirement qui assure l'inviolabilité des échanges en toutes circonstances. Ces qubits constituent des clés, qui sont ensuite utilisées dans des protocoles de chiffrement classiques.

**Cryptographie post-quantique** : discipline visant à créer des méthodes de cryptographie résistantes aux calculateurs quantiques à même de « craquer » les clés de cryptage actuellement utilisées.

**Dispositifs physiques de mesure de l'état des qubits** : dispositifs permettant d'obtenir le résultat des calculs à la fin du processus d'exécution séquentielle des portes quantiques.

**Enceinte cryogénisée** : dispositif permettant le maintien d'une température voisine du zéro absolu à l'intérieur de l'ordinateur à une température.

**Électron** : un des composants de l'atome avec les neutrons et les protons.

**Électronique de contrôle** : dispositif électronique qui, dans le cas du quantique, pilote les dispositifs physiques qui servent à initialiser, modifier et lire l'état des qubits.

**Informatique quantique** : une branche de l'informatique qui utilise des propriétés de la physique quantique pour résoudre des problèmes complexes que des ordinateurs classiques ne pourraient résoudre dans un délai acceptable. On distingue au sein de l'informatique quantique : les ordinateurs quantiques et les simulateurs quantiques.

**Intrication quantique** : phénomène par lequel deux particules forment un système lié, et présentent des états quantiques dépendants l'un de l'autre, quelle que soit la distance qui les sépare.

**Ordinateur quantique** : ordinateurs qui reposent sur l'utilisation de qubits et de portes quantiques. Quatre types d'ordinateurs peuvent être distingués (émulateurs quantiques, à recuit simulé, simulateur quantique analogique, ordinateurs quantiques universels). Les ordinateurs quantiques expérimentent un large spectre de technologies (supraconducteurs, spins d'électrons, centres NV, ions piégés, atomes froids, photons).

**Ordinateur quantique - émulateurs quantiques** : ordinateur quantique utilisé pour réaliser des simulations de l'exécution d'algorithmes quantiques dans des ordinateurs traditionnels.

**Ordinateur quantique - à recuit simulé** : ordinateur quantique adapté à l'exécution d'une partie seulement des algorithmes quantiques connus.

**Ordinateur quantique - simulateur quantique analogique** : ordinateur qui sert de simulateur de phénomènes quantiques. Ils fonctionnent de manière analogique et non numérique, à savoir que les paramètres reliant les qubits entre eux sont continus.

**Ordinateur quantique - universel** : ordinateur qui utilise des qubits avec des portes quantiques capables d'exécuter tous les algorithmes quantiques et avec un gain de vitesse optimum par rapport aux supercalculateurs.

**Ordinateur quantique - supraconducteurs** : les supraconducteurs prennent la forme de l'état d'un courant supraconducteur qui traverse une barrière très fine.

**Ordinateur quantique - spins d'électrons** : les spins d'électrons sont une sorte de polarisation magnétique, que l'on retrouve dans les ordinateurs à base de quantum dots (particules semi-conductrices, ex : zinc, sélénium...).

**Ordinateur quantique - centres NV** : les centres NV sont des structures de diamant artificiel dans lesquelles un atome de carbone a été remplacé par un atome d'azote.

**Ordinateur quantique - ions piégés** : les ions piégés sont des ions d'atomes maintenus sous vide et suspendus par suspension électrostatique. Un laser sert à la mesure et exploite le phénomène de fluorescence des ions excités par le laser.

**Ordinateur quantique - atomes froids** : Les atomes froids sont des atomes refroidis à très basse température.

**Ordinateur quantique - photons** : les photons sont des particules élémentaires médiatrices de l'interaction électromagnétique.

**Quantum dots** (points quantiques) : nanostructures cristallines de semi-conducteurs contenant seulement quelques centaines ou quelques milliers d'atomes. Ils sont utilisés pour la fabrication de certains types d'écrans plats, de cellules photovoltaïques à haut rendement et de transistors.

**Quantum inspired** (d'inspiration quantique) : technologies classiques où des aspects de la physique quantique sont appliqués à une question ou un modèle.

**Qubits** : unité élémentaire pouvant porter une information quantique. Comme le 1 et le 0 sont les deux états d'un bit classique ordinaire, un qubit est la superposition cohérente d'au moins deux états de base quantiques.

**Qubits logiques** : regroupent des qubits physiques pour permettre une mise en œuvre de correction d'erreurs à l'échelle physique de l'ordinateur.

**Photon** : particule élémentaire (ou corpuscule) qui porte une « énergie lumineuse » élémentaire.

**Photonique** : la science et la technologie relatives à la lumière. La photonique est l'une des technologies mobilisées pour la fabrication de certaines technologies quantiques et notamment les ordinateurs quantiques.

**Porte quantique** : un circuit quantique élémentaire opérant sur un petit nombre de qubits. Les portes quantiques sont les briques de base des circuits quantiques, comme le sont les portes logiques classiques pour des circuits numériques classiques.

**Registres quantiques** : collections de qubits. Ils stockent l'information manipulée dans l'ordinateur et exploitent le principe de superposition permettant de faire cohabiter un grand nombre de valeurs dans ces registres et d'opérer des opérations dessus simultanément.

**Simulateur quantique** : système quantique permettant de simuler certains problèmes quantiques. Ils sont conçus pour étudier un sujet spécifique.

**Superposition quantique** : en mécanique quantique, un même état quantique peut posséder plusieurs valeurs pour une certaine quantité observable.

**Transistor** : composant électronique à semi-conducteur permettant de contrôler ou d'amplifier des tensions et des courants électriques.

# BIBLIOGRAPHIE

## ARTICLES DE PRESSE

- Albert, L. (2021). Formation – Les écoles se mettent à l'heure du quantique. Les Echos.
- Caulier, S. (2021). Technologie quantique : « Une telle rupture impose de préparer l'écosystème au changement ». Le Monde.
- Barbot, L. (2021). Paris et Saclay deviennent des places fortes de la recherche quantique. Les Echos.
- Dèbes, F. (2021). Les challenges d'industrialisation du quantique seront probablement résolus d'ici quelques années ». Les Echos.
- Dèbes, F. (2021). L'informatique quantique, un pari encore très incertain. Les Echos.
- Emmanuel Macron veut mettre la France dans le trio de tête mondial des technologies quantiques. (2021). Le Monde.
- Dèbes, F. (2021). IBM veut laisser la concurrence sur la place dans le quantique. Les Echos.
- Guibert, N. (2022). La Chine peut miser sur les technologies quantiques pour surpasser les États-Unis. Le Monde.
- Larousserie, D. (2019). La nécessaire formation des ingénieurs et des informaticiens aux bizarreries quantiques. Le Monde.
- Larousserie, D. (2020). La suprématie quantique ou la nouvelle frontière des géants de l'informatique. Le Monde.
- Larousserie, D. (2022). L'université surfe sur la vague quantique. Le Monde.
- Larousserie, D. (2022). La mémoire quantique bat des records. Le Monde.
- Larousserie, D. (2022). Une nouvelle vague de start-ups françaises déferle dans la technologie quantique. Le Monde.
- Larousserie, D. (2023). Antennes électromagnétiques, navigation sans GPS... La physique quantique révolutionne nos capteurs du quotidien. Le Monde.
- Laurent, B. (2023). L'Australie veut faire naviguer ses sous-marins grâce à des senseurs quantiques. GEO.
- Manens, F. (2019). Le pari fou du fonds français Quantonation, l'un des spécialistes mondiaux du quantique. La Tribune.
- Naveh, Y. (2022). Le développement de logiciels quantiques n'en est qu'à ses prémices. La Tribune.
- Petit, T. (2021). L'écosystème quantique francilien accélère sa croissance. Institut Paris Région.
- Poulain-Maubant, A. (2019). L'avantage quantique – Enjeux industriels et de formation. Fondation IMT Mines Télécom.
- Serra, Y. (2023). Quantique : Eviden (Atos) passe du simulateur à la plateforme. LeMagIT.
- Virol, G. (2022). Le logiciel, face cachée du calcul quantique. Usine Nouvelle.
- Virol, G. (2023). Avec sa nouvelle offre, Atos démocratise le quantique. Usine Nouvelle.
- Witt, S. (2022). The World-Changing Race to Develop the Quantum Computer. The New-Yorker.

## SOURCES WEB

- Auffray, C. (2023). Docaposte dégage de l'archivage résistant aux attaques quantiques. Récupéré sur Zdnet: Zdnet.com
- Auffray, C. (2023). La Banque de France explore l'informatique quantique. Récupéré sur Zdnet: Zdnet.com
- Branco, A. (2022). Comment IBM devrait ouvrir la voie révolutionnaire de l'avantage quantique dès 2023. Récupéré sur 01net: 01net.com
- Fabron, M. (2023). SiQuance devient Quobly et lève 19 millions d'euros. Récupéré sur maddyness: Zdnet.com
- Hughes, O. (2021). Quantum computing skills are hard to find. Here's how companies are tackling the shortage. Récupéré sur Zdnet: Zdnet.com
- Hughes, O. (2022). Les entreprises d'informatique quantique cherchent leurs talents. Récupéré sur Zdnet: Zdnet.com
- Leprince-Ringuet, D. (2021). Quantum computing's next big challenge: A quantum skills shortage. Récupéré sur Zdnet: Zdnet.com
- Serries, G. (2023). OVHcloud : acquisition de sa première machine quantique. Récupéré sur Zdnet: Zdnet.com

## RAPPORTS, LIVRES ET ARTICLES

- Bobier, J.-F. (2021). What Happens When 'If' Turns to 'When' in Quantum Computing? BCG Consulting.
- Chow, J. (2022). State of Quantum Computing: Building a Quantum Economy. World Economic Forum.
- Damiano, J.-P. (2021). Les technologies quantiques. Contexte et enjeux, applications et perspectives;.
- Ezratty, O. (2020). Comprendre l'informatique quantique (3ème édition).
- Ezratty, O. (2021). Ecosystème quantique en France et dans le monde. Bulletin de la Société informatique de France.
- Ezratty, O. (2022). Understanding Quantum Technologies (6ème édition, 3<sup>ème</sup> en anglais).
- Forteza, P. (2020). Quantique : le virage technologique que la France ne ratera pas.
- Lau, F. (2021). Informatique quantique : Comprendre le Quantum Computing pour se préparer à l'inattendu. CIGREF.
- Longuet, G. (2022). La stratégie quantique française. Parlement Français.
- RAGUET, H. (2021). Les technologies quantiques au CNRS. CNRS.
- Stratégie nationale sur les technologies quantiques. (2021). Gouvernement.





**OPIIEC**

## CONTACT :

Boubacar DIALLO  
Chef de projets Prospective  
OPIIEC  
25, quai Panhard et Levassor  
75013 PARIS  
[opiiec@opiiec.fr](mailto:opiiec@opiiec.fr)

## RÉALISATION :

KYU Associés, en collaboration avec Olivier  
Ezratty  
136 Boulevard Haussmann  
75008 Paris  
[www.kyu.fr](http://www.kyu.fr)



ÉTUDE RÉALISÉE AVEC LE SOUTIEN DE L'OPCO ATLAS