



# L'AVENIR QUANTIQUE COMMENCE MAINTENANT

Quelle feuille de route pour les entreprises ?

Livre Blanc 2025

**le lab**  
quantique

**BAIN & COMPANY** 



## Auteurs



**Laurent-Pierre Baculard,**  
Digital, Tech &  
Innovation EMEA  
Senior Partner,  
Bain & Company



**Siméon Valdman,**  
Directeur Général,  
Le Lab Quantique



**Guillaume Lerouge,**  
Head of Industrial  
Relationships,  
Le Lab Quantique

## Sounding Board / Comité Scientifique



**Jean-Christophe Gougeon**



**Michel Kurek**



**Fanny Bouton**



**Valerian Giesz**



**Vincent Martin**



**Olivier Tonneau**



ALICE & BOB

**Elie Girard & Cécile Perrault**

**Olivier Ezratty**

Remerciements particuliers pour la préparation de ce Livre Blanc à Pauline Monnot, Gabriel Charmeil, Naomi Cohen et Yasmin Aboulwafa, sans qui ce travail n'aurait pas été possible.



## Table des matières

Executive Summary .....	6
Introduction .....	10
<b>PARTIE 1</b>	
<b>Le quantique, une rupture technologique majeure .....</b>	<b>11</b>
La promesse du calcul quantique .....	11
Les limites actuelles du calcul quantique .....	12
<b>PARTIE 2</b>	
<b>De l'avantage quantique computationnel à l'avantage quantique business .....</b>	<b>14</b>
L'avènement prochain de l'avantage quantique computationnel ...	14
Vers un avantage business .....	16
<b>PARTIE 3</b>	
<b>La bascule technologique se précise, l'impératif d'anticiper .....</b>	<b>18</b>
Une rupture technologique qui n'est plus théorique.....	18
Anticiper maintenant pour éviter l'effet falaise.....	20
Des entreprises déjà en mouvement dans un écosystème à soutenir.....	20
<b>PARTIE 4</b>	
<b>Comment lancer sa préparation dès aujourd'hui pour être prêt pour demain ? .....</b>	<b>22</b>
Présentation de l'index de maturité .....	23
Positionnement des acteurs interviewés .....	26
Présentation de la feuille de route quantique.....	30
Grille de priorisation des cas d'usage .....	36
<b>PARTIE 5</b>	
<b>Le quantique en France : un écosystème riche et dynamique à défendre .....</b>	<b>40</b>
Conclusion.....	42
Méthodologie .....	43
Annexes .....	44

## Executive Summary

### **Le quantique, une rupture technologique majeure**

Le calcul quantique ne constitue pas une simple évolution technique, mais une véritable rupture technologique, ouvrant la voie à la résolution de problèmes complexes jusqu'ici hors de portée des approches classiques. Parmi ces défis, l'optimisation de tournées logistiques, la planification industrielle, la simulation moléculaire pour la conception de nouveaux matériaux ou encore le calcul optimisé des trajectoires satellitaires. En somme, il ouvre de nouveaux champs d'innovation dans des secteurs où la complexité et la dimension multiparamètres dépassent les capacités des technologies actuelles. Il convient néanmoins de souligner que l'émergence du quantique ne remettra pas en cause l'ensemble des technologies actuelles. Les usages quotidiens, qu'il s'agisse des applications bureautiques, de la navigation ou encore du traitement massif de données par l'intelligence artificielle, continueront de s'appuyer sur les infrastructures classiques. À ce stade, le quantique ne vise pas à remplacer ces technologies éprouvées, mais plutôt à apporter des réponses ciblées à des problématiques qui, à notre connaissance, restent aujourd'hui hors de portée des approches classiques.

### **De l'avantage quantique computationnel à l'avantage quantique business**

Face à ces défis, où le nombre de variables explose, le calcul quantique promet des avancées décisives : accélérer les temps de calcul, accroître la précision et explorer des solutions inaccessibles par les technologies classiques. Cet avantage technique ou « avantage computationnel » procuré par le quantique, dont l'émergence est attendue à moyen terme, se traduira rapidement en avantage économique pour les entreprises qui auront su l'anticiper et s'y préparer dès aujourd'hui. Pour ces acteurs, le quantique offrira bien plus qu'un simple saut technologique, permettant non seulement d'optimiser les structures de coûts, mais aussi d'ouvrir de nouvelles sources de revenus, améliorant ainsi directement la performance métier, opérationnelle et financière des organisations. Autant d'opportunités qui se traduisent déjà par des cas d'usage concrets, comme l'amélioration du design industriel d'un moteur, la simulation de molécules pour accélérer la découverte de nouveaux traitements, l'optimisation fine de portefeuilles financiers, la planification dynamique de réseaux logistiques ou encore la réduction de la consommation énergétique dans les procédés industriels.

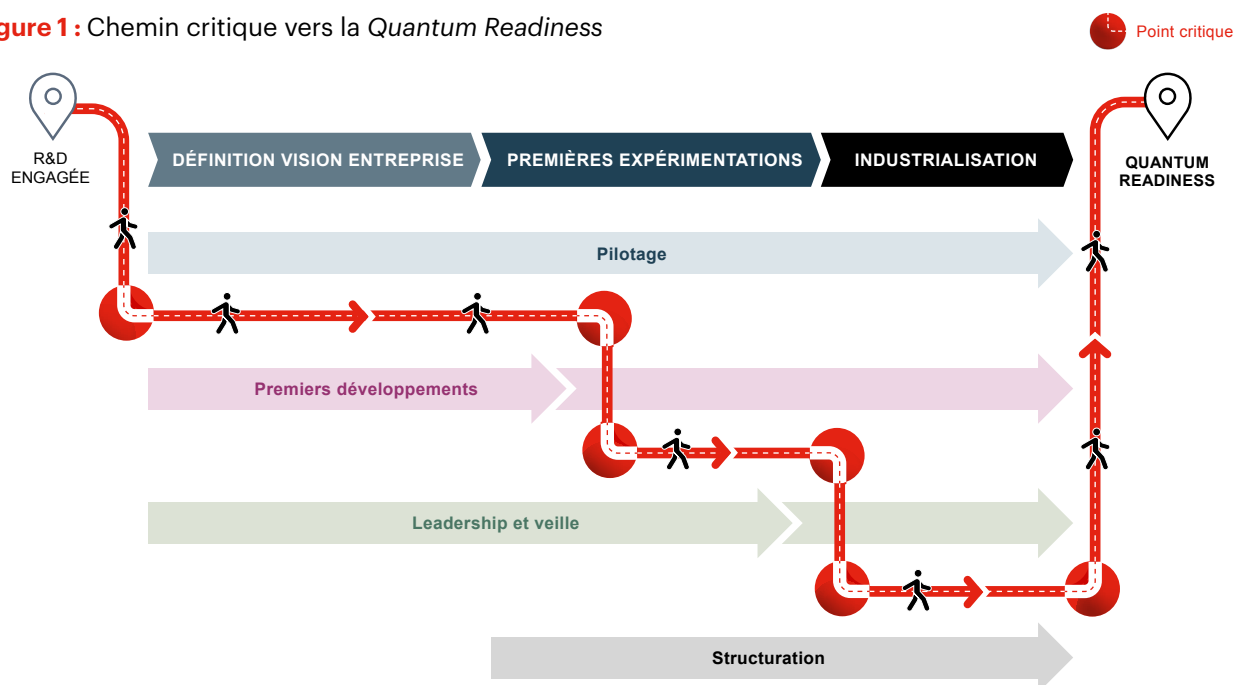
### **La bascule technologique se précise : l'impératif d'anticiper**

Force est de constater qu'aucune des grandes technologies quantiques aujourd'hui en course — qu'il s'agisse des supraconducteurs, des atomes neutres ou de la photonique — n'a encore réussi à s'imposer comme référence incontestée. Pourtant, il est non seulement possible, mais nécessaire de se préparer dès maintenant et d'embarquer les équipes et les directions dans ce changement de paradigme.

Car la supériorité du calcul quantique sur certains cas d'usage n'est plus un horizon lointain. Le seuil critique des 100 qubits logiques est souvent évoqué comme le véritable point de bascule par les experts du secteur et, à en croire les feuilles de route des principaux acteurs, cet objectif pourrait être atteint dans les trois prochaines années. IQM prévoit d'y parvenir d'ici 2028, Quantinuum dès 2027, Pasqal vise aussi la fin de la décennie. Le calcul quantique est donc en passe de devenir une réalité opérationnelle bien plus rapidement qu'on ne pouvait l'imaginer il y a encore quelques années. Au-delà de cette première étape, une véritable accélération est attendue après 2028, portée par des progrès en miniaturisation et en industrialisation des architectures, ouvrant la voie à des usages plus larges et à un déploiement à plus grande échelle.

Par ailleurs, il est essentiel de rappeler que, contrairement à l'IA, l'adoption des technologies quantiques s'inscrit dans un temps long. Entre la mobilisation d'experts, l'implication des métiers, la formation des équipes, l'identification des cas d'usage et les premières expérimentations, il faudra compter environ entre 3 et 4 ans avant d'obtenir un avantage concret. Chaque entreprise devra progressivement construire son savoir-faire en explorant les techniques de calcul quantique analogique (réseaux de tenseurs, émulateurs et simulateurs quantiques), en affinant ses choix technologiques et en développant des solutions adaptées à ses enjeux spécifiques. « Quand les capacités de calcul quantique sur machine quantique seront disponibles à l'échelle, cette montée en compétence sera en mesure de se déployer plus rapidement et avec des métiers et des acteurs de l'entreprise déjà aguerris au sujet. » Dès lors, il est impératif d'engager la transformation dès aujourd'hui : lorsque ces technologies auront atteint leur maturité, les entreprises qui auront pris les devants seront en position de force pour capter la valeur créée, tandis que les autres risqueront de devoir faire face à un véritable « effet falaise de compétitivité ».

**Figure 1 :** Chemin critique vers la Quantum Readiness



Source : Enquête Le Lab Quantique et Bain & Company (Janvier - Mai 2025).



## Comment lancer sa préparation dès aujourd'hui pour être prêt pour demain ?

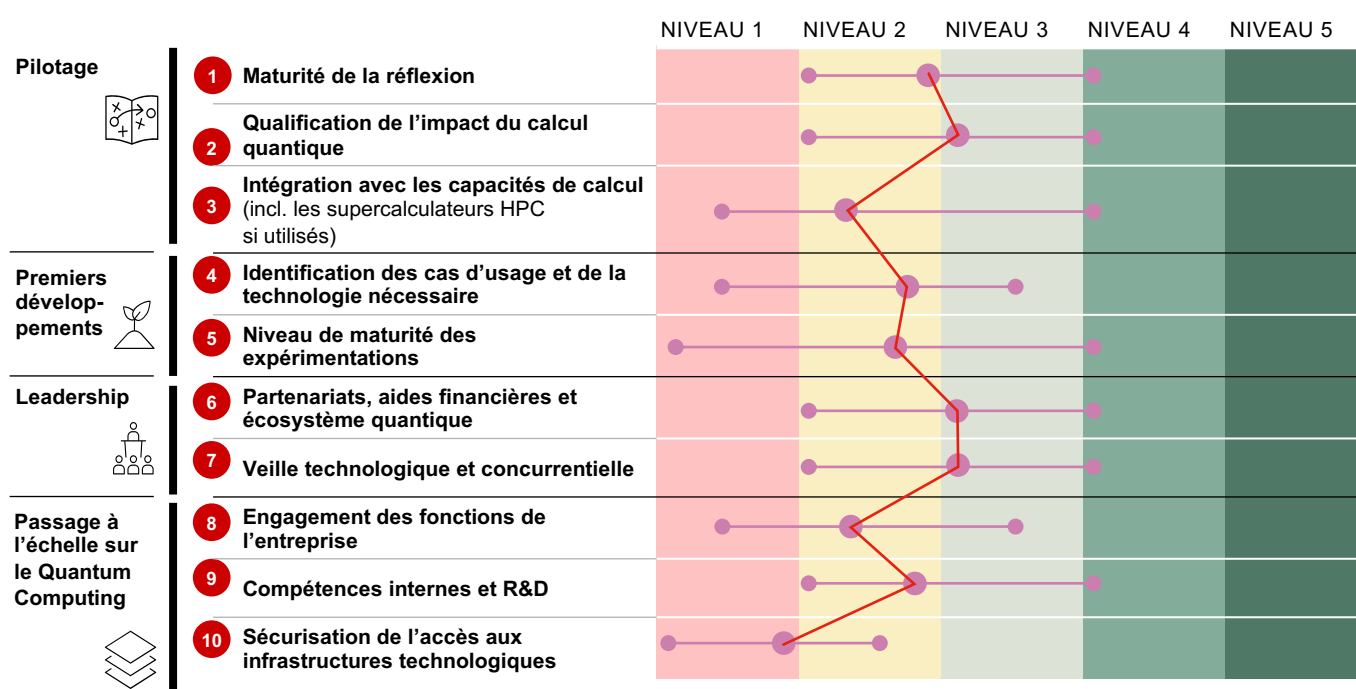
Face à ces enjeux, la question est désormais claire : comment agir concrètement pour ne pas être pris de court ? Se préparer au quantique exige une démarche structurée et progressive.

D'abord, il est essentiel de surveiller attentivement les jalons technologiques et scientifiques — comme l'atteinte du seuil critique de qubits logiques, l'amélioration des taux d'erreur ou les percées sur la mémoire quantique —, mais aussi les jalons concurrentiels, tels que l'usage effectif du quantique par un acteur industriel ou encore le recrutement de talents spécialisés par une société concurrente. Dans cette perspective, l'accès à des benchmarks applicatifs permettant une évaluation objective et multicritères des performances des calculateurs devient un outil clé pour guider les choix technologiques et structurer les investissements.

Pour se préparer à accélérer lorsque ces points de bascule seront successivement atteints, la feuille de route quantique s'articule autour de quatre leviers essentiels. Le pilotage en est le premier, qui aligne la stratégie d'entreprise, calibre les investissements managériaux, analytiques et systèmes, et ajuste le rythme d'exécution en fonction des jalons technologiques et concurrentiels. Le travail sur les cas d'usage ensuite, en qualifiant et en priorisant les opportunités (à l'aide d'une grille d'évaluation), puis en lançant les premières expérimentations pour tester les technologies disponibles. La veille et les partenariats sont indispensables pour rester à l'écoute des avancées scientifiques, des mouvements concurrents et des opportunités dans l'écosystème. Enfin, la structuration interne pour engager progressivement les équipes de la R&D aux métiers et aux opérationnels, pour garantir l'accès aux infrastructures technologiques critiques et construire progressivement les compétences nécessaires.

**Figure 2 :** Tableau de positionnement des acteurs interrogés sur l'index de maturité

● Moyenne — Amplitude



Note 1 : Pour les opportunités, car groupement plus mature sur les mouvements défensifs liés à la cryptographie.

Source : Enquête Le Lab Quantique et Bain & Company (Janvier - Mai 2025).



## **Le quantique en France : un écosystème riche et dynamique à défendre**

Il serait impossible de parler de quantique sans souligner la position particulière de la France dans cet écosystème en pleine accélération. Sur ce sujet, notre pays peut légitimement revendiquer une ambition compétitive et de solides perspectives de souveraineté technologique. La France dispose d'un vivier de startups couvrant l'essentiel des grandes technologies quantiques : Pasqal pour les atomes neutres, Alice & Bob pour les supraconducteurs, Quandela pour la photonique, Quobly pour les qubits silicium et C12 pour les qubits à nanotubes de carbone — autant d'acteurs déjà reconnus à l'international, comme en témoigne l'acquisition récente d'une machine Pasqal par Aramco et l'installation d'une usine Pasqal au Canada, avec le soutien de DistriQ, qui n'est pas sans rappeler le dynamisme nord-américain dans le quantique.

Ce dynamisme est soutenu par une politique publique active, à travers des programmes structurants, tels que HQI (calcul hybride), BACQ (benchmark applicatif des calculateurs quantiques), ProQCima (projets collaboratifs pour expérimenter le quantique par le ministère des Armées), qui font partie du programme d'investissement France 2030, qui mobilise plusieurs centaines de millions d'euros pour faire émerger des leaders technologiques européens. Cependant, pour espérer construire une souveraineté française, et par extension européenne, il est essentiel que les industriels soutiennent l'écosystème et que des budgets adéquats soient alloués au calcul quantique. Plus largement, il est crucial que les acteurs économiques s'engagent dès maintenant dans le développement des technologies quantiques. Les États-Unis disposent de moyens considérables, et attendre reviendrait à laisser échapper toute possibilité de maîtrise technologique ; agir aujourd'hui est la seule manière de préserver demain une autonomie stratégique.

## Introduction

*« Quelque part au milieu de l'océan, novembre 2042. Le commando marine Philippe Hubert, membre des forces spéciales françaises, s'apprête à plonger pour une mission d'infiltration en territoire ennemi. Aux profondeurs visées, aucune lumière naturelle ne l'aidera, mais il n'a pas besoin d'yeux pour voir. Équipé des toutes dernières technologies quantiques, il sait comment rendre l'invisible perceptible et se rendre lui-même imperceptible. »*

C'est par ces quelques lignes de fiction scientifique dans son article *« La guerre du quantique a déjà commencé »* que Charles Antoine, chercheur au laboratoire de physique théorique de la matière condensée et maître de conférences à l'université Pierre et Marie Curie, plonge les lecteurs des *Échos* dans l'univers fascinant du quantique. Défense et sécurité pourraient bien être les premiers grands gagnants – ou les principales victimes – de cette avancée technologique dont on parle depuis plus de dix ans. Si elle alimente fantasmes et débats animés parmi les experts, une chose fait consensus : la révolution quantique est inévitable. La vraie question n'est plus si, mais quand – et surtout, dans quelle mesure elle bouleversera durablement la performance industrielle et accélérera la recherche.

Car cette révolution ne se limite pas au calcul. Certes, les ordinateurs quantiques ouvriront la voie à des avancées majeures en optimisation ou simulation de matériaux, mais d'autres technologies quantiques seront tout aussi porteuses de rupture. Les capteurs quantiques offriront une précision inégalée pour détecter des signaux infimes en santé, en géophysique ou dans la navigation autonome. Les communications quantiques, basées sur l'intrication, visent à renforcer considérablement la sécurité des échanges d'informations, en rendant toute tentative d'interception théoriquement détectable. L'intrication est également exploitée dans certains algorithmes de calcul quantique et en métrologie quantique, notamment pour améliorer la précision des mesures. Enfin, la cryptographie devra évoluer face à la menace des ordinateurs quantiques capables de casser les protocoles actuels, en développant des solutions résistantes à ces nouvelles puissances de calcul.

Ainsi, les entreprises doivent dès aujourd'hui décrypter comment ces technologies redessineront leurs chaînes de valeur, afin d'en exploiter les opportunités, mais aussi pour anticiper les menaces qu'elles font émerger et s'y préparer dans une logique défensive.



## PARTIE 1

# Le quantique, une rupture technologique majeure

## La promesse du calcul quantique

Le calcul quantique ouvre la voie à des avancées majeures en matière de performance de calcul, en s'attaquant à des problématiques jusqu'ici hors de portée des approches classiques. Contrairement à l'intelligence artificielle ou au calcul haute performance (HPC), qui ont permis de franchir des seuils importants dans la capacité à traiter de grands volumes de données ou à modéliser certains phénomènes, le quantique s'attaque à une autre catégorie de défis : ceux qui impliquent une complexité combinatoire, une explosion du nombre de variables ou une interdépendance de paramètres telle qu'aucun algorithme classique ne peut les résoudre dans un temps raisonnable. En effet, comme en témoigne un expert de chez PwC, « *au-delà de 60 à 70 paramètres, la fiabilité des algorithmes classiques commence à diminuer significativement. Lorsqu'on entre dans des problématiques à 1 000 ou 10 000 paramètres, ces approches atteignent clairement leurs limites — c'est là que le quantique peut réellement apporter une réponse.* »

En d'autres termes, le calcul quantique **ne vise pas à remplacer le calcul classique**, mais à le compléter en apportant des solutions à des problèmes mathématiques et physiques aujourd'hui hors de portée. Pour citer Constantin Gonciulea, chef de la cybersécurité IA et Innovation chez Wells Fargo et auteur de *Building Quantum Software* : « *le calcul quantique est comme un hélicoptère, le calcul classique comme une voiture. Un hélicoptère peut faire plein de choses qu'une voiture ne peut pas, mais si vous voulez aller faire vos courses, vous ne prenez pas un hélicoptère.* »<sup>1</sup>

Ainsi, le calcul quantique ouvre la voie à la résolution de problèmes hors de portée des approches classiques (e.g., optimisation combinatoire, simulation de matériaux, sécurisation...). Il pourrait aussi permettre des gains de performance significatifs en temps de calcul et, à terme, offrir une meilleure efficacité énergétique, un avantage qui dépendra fortement des architectures et des cas d'usage mis en œuvre.

---

<sup>1</sup> American Banker (2024). <https://www.americanbanker.com/news/quantum-leap-jpmorgan-chase-wells-fargo-push-ahead-while-most-banks-lag>

## Les limites actuelles du calcul quantique

Malgré des avancées notables et une indéniable accélération de l'écosystème — les cas d'usage se multiplient, les annonces de constructeurs se font plus fréquentes — le calcul quantique reste confronté à plusieurs défis majeurs. En effet, la chaîne de valeur du quantique, depuis les briques matérielles jusqu'aux usages concrets — est encore en construction et aucun standard technologique ne s'est imposé de manière définitive à ce stade.

**Figure 3 :** Présentation de la chaîne de valeur 2025 du calcul quantique des technologies habilitantes aux industries utilisatrices




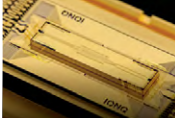

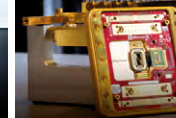














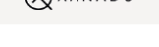
Source : Enquête Le Lab Quantique et Bain & Company (Janvier - Mai 2025)

Au cœur de ces défis se trouve le qubit, unité élémentaire de l'information quantique. Contrairement au bit classique, qui ne peut prendre que deux états (0 ou 1), le qubit peut exister dans une superposition de ces deux états simultanément, ce qui lui confère une puissance de calcul inédite.

Dans la pratique, un qubit physique est la matérialisation de ce concept à l'aide d'un support quantique concret : atomes neutres, photons, circuits supraconducteurs, entre autres. Mais ces qubits physiques sont extrêmement sensibles à leur environnement. Ils sont sujets à des erreurs (de phase, de mesure ou de décohérence) et nécessitent des conditions de stabilité très strictes pour être fiables. Dans les leviers d'amélioration de la performance du quantique, le rendement des qubits logiques par rapport aux qubits physiques est un enjeu central.

Pour contourner cette fragilité, les chercheurs conçoivent des qubits logiques, qui regroupent plusieurs qubits physiques au sein de structures capables de corriger les erreurs. Construire un qubit logique stable peut ainsi nécessiter des dizaines et jusqu'à des milliers de qubits physiques, selon la taille de l'algorithme à exécuter, ce qui rend la tâche particulièrement exigeante en termes d'ingénierie matérielle et de ressources. Tous les constructeurs travaillent donc sur des approches innovantes permettant de réduire le nombre de qubits physiques nécessaires pour faire fonctionner un qubit logique.

**Figure 4 :** Les différents types de qubits pour le calcul quantique universel

	← MASSIF →				← NON MASSIF →
Objet quantique	ATOMES	IONS	ELECTRONS	ANYONS	PHOTONS
Propriété quantique	NIVEAU D'ÉNERGIE		SPIN	MÉMOIRE DE TRESSAGE	POLARISATION
Qubit	<b>Qubit à atome neutre</b> 	<b>Qubit à ions piégés</b> 	<b>Qubit supraconducteur</b> 	<b>Qubit topologique</b> 	<b>Qubit photonique</b> 
Description	Atomes piégés par des lasers, leurs niveaux d'énergie sont manipulés optiquement	Ions en suspension dans un champ électrique, leurs états électroniques sont contrôlés par des lasers pour stocker l'information	Circuits électriques supraconducteurs où des électrons associés en paires de Cooper sont manipulés par des signaux micro-ondes	Anyons en interaction dans un matériau exotique, l'information est stockée dans la manière dont ils sont échangés et entrelacés	Photons voyageant dans des circuits optiques, où l'information est encodée dans leur polarisation ou leur phase
Acteurs clés	 	 	     		  

Source : Enquête Le Lab Quantique et Bain & Company (Janvier - Mai 2025)

Les défis qui se dressent encore devant les technologies quantiques sont nombreux, mais les progrès rapides en matière de correction d'erreurs, notamment, devraient permettre d'atteindre prochainement un avantage quantique technique, dit computationnel, qui pourra, à terme, se transformer en avantage économique tangible pour les entreprises ayant su anticiper.

**NB :** Ces différentes technologies sont présentées en détail dans les annexes du présent document.



## PARTIE 2

# De l'avantage quantique computationnel à l'avantage quantique business

La possibilité d'activer un avantage quantique computationnel, longtemps perçue comme arrivant dans un horizon temporel lointain, s'approche désormais d'un seuil critique. Plusieurs acteurs technologiques annoncent des avancées majeures dans les toutes prochaines années, en particulier autour des fameux 100 qubits logiques, c'est-à-dire des qubits physiques regroupés et stabilisés à l'aide de codes de correction d'erreurs quantiques, une étape essentielle sur la voie de l'informatique quantique tolérante aux fautes (FTQC).

Ce seuil de 100 qubits logiques est souvent cité comme la barre à franchir pour que les ordinateurs quantiques commencent à dépasser les capacités des machines classiques sur des problèmes bien identifiés. Cet avantage, dit computationnel, ne se limite pas à une supériorité théorique ; il signifie la possibilité concrète de résoudre plus vite, ou autrement, des problèmes industriels complexes jusque-là inaccessibles. Pour autant, cet avènement n'est pas garanti et reste conditionné à la levée d'un certain nombre de verrous.

D'autres avantages quantiques sont envisageables, selon les cas, comme la génération de résultats de meilleure qualité, qu'il s'agisse de la précision d'une simulation chimique ou de la résolution d'un problème combinatoire à l'aide d'heuristiques quantiques.

## L'avènement prochain de l'avantage quantique computationnel

### Les futurs défis à relever en hardware

Le développement du hardware quantique reste jalonné d'obstacles techniques qu'il faudra franchir pour rendre cette technologie pleinement exploitable par les industriels.

Tout d'abord, la première difficulté tient à la **fragilité des qubits physiques**, encore fortement soumis aux **effets du bruit** et de la **décohérence**. Aujourd'hui, plusieurs centaines sont nécessaires, en mode NISQ, pour entrevoir des bénéfices concrets sur des cas d'usage réels. Néanmoins, à plus long terme, ce sont des milliers de qubits qui seront requis pour permettre la mise en œuvre de la correction d'erreurs et ouvrir la voie au calcul quantique tolérant aux pannes.

Dans cette perspective, le rendement entre qubits physiques et qubits logiques devient un enjeu central : il détermine la faisabilité industrielle des machines à grande échelle. Un ratio de 1 000:1 reste aujourd'hui trop élevé pour permettre un passage à l'échelle économiquement viable. C'est ce rendement qui conditionne, en pratique, la capacité à « gérer » un nombre significatif de qubits logiques utiles.

En parallèle, la **gestion du nombre de qubits logiques** devient un indicateur central. Atteindre le seuil d'une centaine de qubits logiques représenterait un point de bascule théorique, où l'on pourrait espérer démontrer un avantage quantique sur des problèmes industriels ciblés.

Puis la **réduction des taux d'erreurs** reste un prérequis indispensable. Il est aujourd'hui admis que passer sous la barre des  $10^{-3}$  est un seuil critique pour envisager la correction d'erreurs, mais, pour tirer pleinement parti des dispositifs NISQ, ces taux devront encore diminuer de manière significative.

D'autres défis concernent l'**interconnexion entre cœurs quantiques**, qui devra se faire sans compromettre les niveaux de fidélité atteints localement, afin d'assurer une mise à l'échelle cohérente.

Enfin, l'émergence d'une **mémoire quantique fiable** c'est-à-dire la capacité à conserver un état quantique sans perte de cohérence pendant une durée exploitable, encore largement conceptuelle, constitue une brique technologique stratégique, tant pour le stockage temporaire d'états quantiques que pour l'architecture future de systèmes quantiques distribués.

## Les futurs défis à relever en logiciel

Par ailleurs, plusieurs défis doivent aussi être relevés pour le software quantique.

D'abord, les algorithmes quantiques actuels, peu nombreux et pas toujours matures, ne sont pas nécessairement plus performants que les algorithmes classiques existants. Aussi, il est essentiel de **développer de nouveaux algorithmes quantiques** capables de surpasser les solutions actuelles classiques dans des domaines spécifiques.

Ensuite, l'**absence de standards en matière de langages de programmation quantique et de bibliothèques logicielles** constitue un obstacle significatif. Chaque plateforme quantique propose souvent son propre ensemble d'outils, rendant le développement de logiciels portables et interopérables complexe. L'établissement de normes communes faciliterait la collaboration et accélérerait l'innovation dans le domaine.

Puis l'intégration des ordinateurs quantiques dans les infrastructures de calcul existantes nécessite une préparation adéquate des données et un **couplage efficace avec les systèmes de calcul haute performance**. Cela implique de concevoir des interfaces et des protocoles permettant une communication fluide entre les environnements classiques et quantiques, optimisant ainsi les flux de travail hybrides.

Enfin, pour adapter des problèmes mathématiques complexes et pouvoir les résoudre sur un ordinateur quantique, des **transpositions** lourdes sont nécessaires (une transposition est une reformulation de la problématique qui tient compte des **spécificités physiques des qubits et des portes quantiques**). Une compréhension approfondie de ces domaines est requise pour exploiter pleinement les capacités du calcul quantique et représente un défi majeur pour les prochaines années.



Dans ce contexte, certaines entreprises se positionnent sur la conception automatisée d'algorithmes quantiques, un levier essentiel pour rendre ces technologies plus accessibles. C'est le cas de Classiq, une startup israélienne fondée en 2020, qui développe une plateforme permettant de générer des circuits quantiques optimisés. Elle collabore notamment avec Toshiba, Mitsubishi et Deloitte sur des cas d'usage concrets, tels que la chimie computationnelle, et a démontré la capacité à réduire la complexité de certains circuits jusqu'à 97%, simplifiant considérablement le développement d'applications quantiques avancées.

## Vers un avantage business

L'enjeu pour les entreprises est désormais de comprendre comment cet avantage computationnel peut se transformer en valeur économique réelle pour leur activité. Derrière les promesses techniques se profilent des gains financiers tangibles, à la fois par la réduction de certains coûts, mais aussi par l'ouverture à de nouvelles opportunités de revenus, grâce à des capacités de modélisation, de simulation ou d'optimisation aujourd'hui hors de portée.

Les cas d'usage identifiés, notamment par Alice & Bob, dans de nombreux secteurs — de la finance à la chimie, de l'énergie à la logistique — laissent entrevoir un changement d'échelle dans la manière dont certaines fonctions clés pourront être pilotées demain. La résolution de problèmes combinatoires complexes, la découverte accélérée de matériaux ou de molécules, ou encore la sécurisation de systèmes critiques sont autant d'exemples concrets où le quantique pourrait, à terme, délivrer une valeur mesurable, soit par la création de services différenciants, soit par l'optimisation profonde de l'existant.

**Figure 5 :** 2 grandes familles de cas d'usage pour 8 secteurs principaux

OPTIMISATION							
				SIMULATION			
TRANSPORT & LOGISTIQUE	INDUSTRIE	FINANCE & ASSURANCE	CHIMIE	SANTÉ	AÉROSPATIALE & DÉFENSE	TMT	ÉNERGIE
1	2	3	4	5	6	7	8
Optimisation de tournées de livraison	Planification coordonnée entre lignes de production	Pricing de produits structurés complexes	Simulation de processus réactifs à l'échelle méso scopique	Allocation dynamique des ressources hospitalières	Planification des missions satellites	Routage réseau optimisé en temps réel	Répartition dynamique de charge réseau
Planification dynamique de flotte	Réglage optimal des paramètres machines	Optimisation de portefeuille sous contraintes de risque	Conception de matériaux aux propriétés ciblées (ex: batteries, semi-conducteurs)	Conception accélérée de nouvelles molécules	Conception de moteurs	Antenne/relais placés par calcul quantique	Placement optimal capteurs & batteries
Routage optimal en présence d'aléas et de stress logistique	Planning de maintenance sans arrêt usine	Chiffrement post-quantique des flux bancaires	Amélioration du procédé de production chimique	Prévision de la propagation des épidémies	Sécurisation des communications sensibles	Sécurisation des données échangées sur le réseau	Prévisions météo fine renouvelables
Amélioration de la gestion des stocks		Amélioration de la détection de fraude	Prédiction des propriétés de nouveaux composés chimiques	Protection des données clients		Résolution des champs électro-magnétiques dans la conception d'antennes	Prévision des prix de l'énergie

Source : © Alice & Bob

Les cas d'usage du quantum computing s'articulent aujourd'hui autour de plusieurs grandes familles : l'optimisation (des ressources, des réseaux ou des processus industriels, par exemple), les simulations physiques (de phénomènes complexes, de matériaux ou de réactions chimiques, par exemple), le machine learning et la résolution d'équations aux dérivées partielles (avec de nombreux cas d'usages dans les services financiers et l'ingénierie). Ces logiques transversales irriguent l'ensemble des secteurs précédemment cités, chacun explorant des applications spécifiques en lien avec ses enjeux opérationnels. Cette structuration permet de mieux appréhender le potentiel concret du quantique et de construire des feuilles de route adaptées aux priorités sectorielles.

Chaque cas d'usage peut être analysé à travers **trois grandes métriques : la quantité d'énergie requise, le nombre de paramètres à optimiser et le volume de données à traiter**. Ces critères permettent de mieux distinguer les apports respectifs des différents paradigmes de calcul (classique, IA, HPC, quantique) et de guider le choix technologique en fonction des besoins. Les CPU restent adaptés aux tâches généralistes du quotidien, l'IA excelle sur les traitements de données massives, le high performance computing s'impose pour les simulations physiques complexes, tandis que le quantique se positionne comme une solution différenciante pour des **problèmes fortement paramétriques, faiblement data-driven et très consommateurs en puissance de calcul**.

À ce titre, la **réduction de la consommation énergétique** pourrait devenir, dans certains cas, un **levier stratégique** du quantique face aux limites croissantes des approches classiques.

Ainsi, la question de l'avantage quantique technique n'est désormais plus qu'une affaire de temps. Les derniers verrous technologiques devraient être levés dans les années à venir, ouvrant la voie à une nouvelle phase, celle de la transformation de cet avantage computationnel en levier économique. Une fois la maturité atteinte, les entreprises disposeront d'opportunités concrètes pour améliorer à la fois leur *top line* et leur *bottom line*, en optimisant leurs processus et en explorant de nouveaux leviers de création de valeur. Néanmoins, une anticipation est nécessaire pour adopter cette technologie qui est plus difficile à appréhender que l'IA, nécessitant à ce titre un travail de fond en amont.

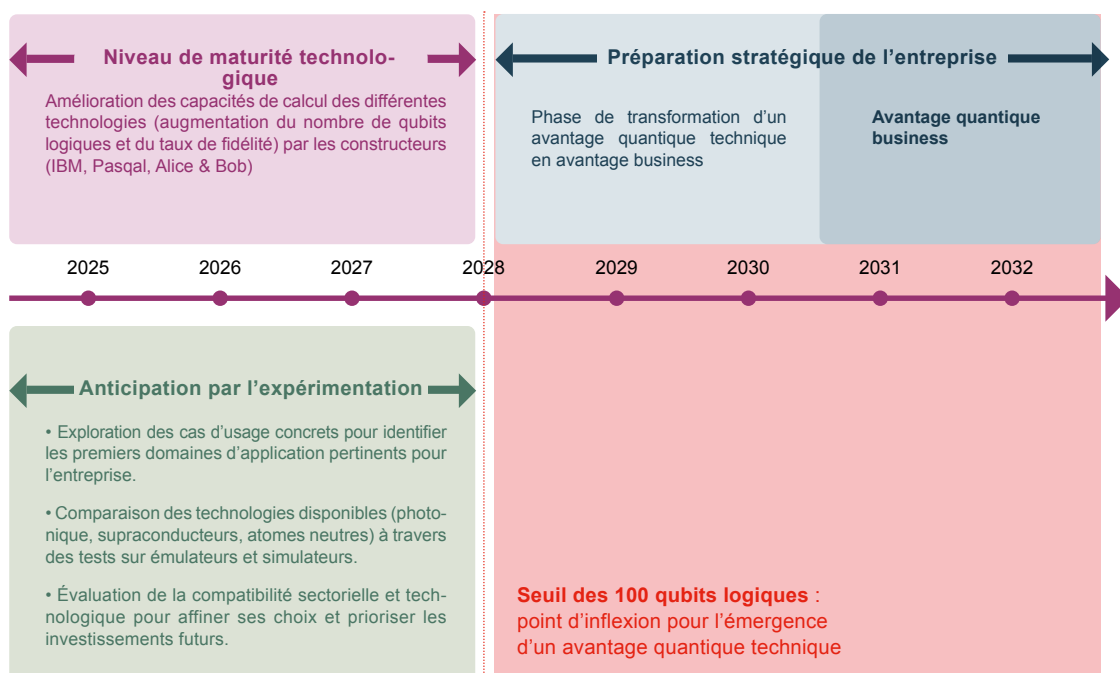
## PARTIE 3

# La bascule technologique se précise : l'impératif d'anticiper

## Une rupture technologique qui n'est plus théorique

L'idée d'un avantage quantique computationnel, longtemps confinée aux laboratoires, est en passe de devenir une réalité. Plusieurs constructeurs — Quantinuum, IQM, Pasqal, Alice & Bob — annoncent l'atteinte prochaine du seuil critique des 100 qubits logiques, considéré comme la condition d'un basculement technologique majeur. Ce jalon ouvrirait la voie à une supériorité computationnelle réelle sur certaines classes de problèmes que les machines classiques ne peuvent pas traiter efficacement. Et cette échéance n'est plus lointaine : les premières démonstrations sont attendues entre 2027 et le début de la prochaine décennie.

**Figure 6 :** Rétroplanning de montée en puissance du quantique : préparation stratégique et technologique



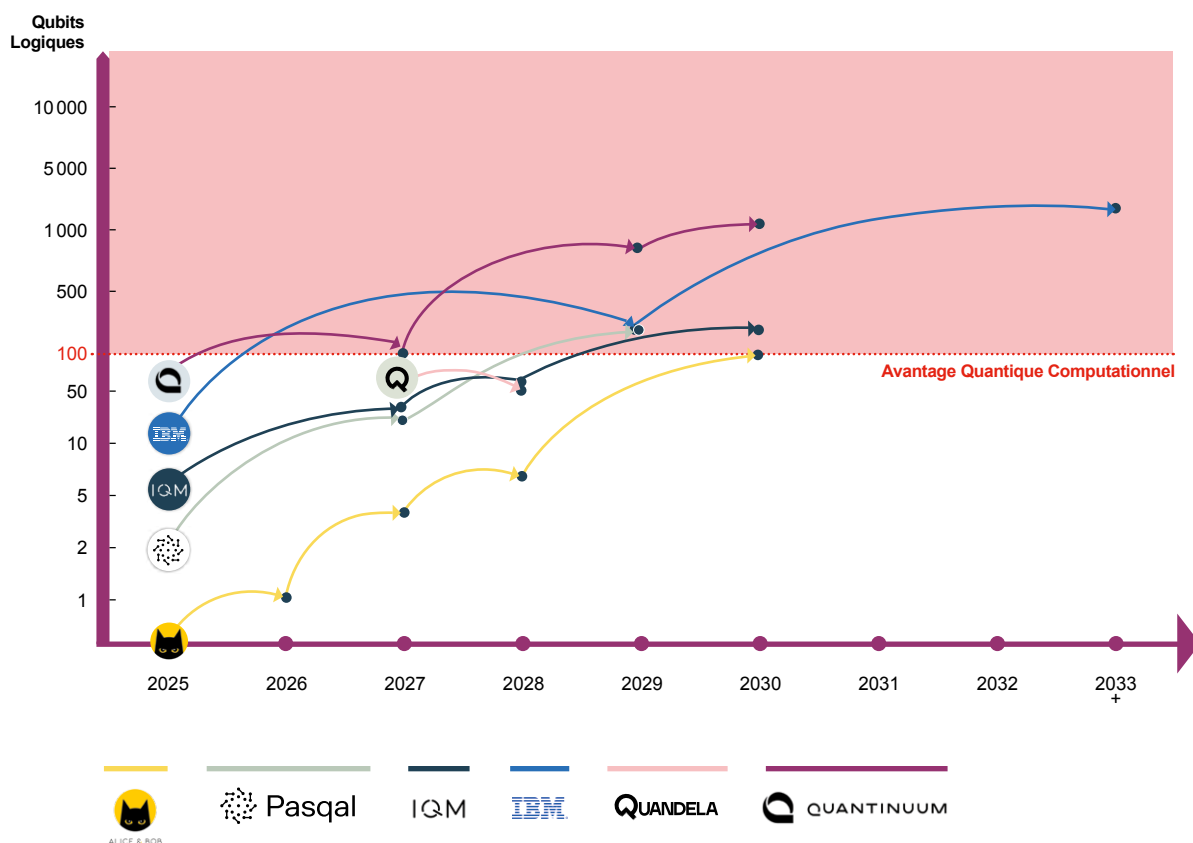
Source : Enquête Le Lab Quantique et Bain & Company (Janvier - Mai 2025)

L'atteinte des 100 qubits logiques constitue un point d'inflexion clé, car il ouvre la porte aux cas d'usage concrets. Il est donc nécessaire de s'y préparer en amont, afin de réussir la bascule de la phase *technology readiness* à la phase *business impact*. Ce jalon marque une étape critique : en dessous de ce seuil, les performances des ordinateurs quantiques restent limitées à des cas exploratoires ou à des démonstrateurs.

Bien que la date à laquelle ce seuil sera atteint ne soit pas certaine, les trajectoires actuelles des principaux constructeurs montrent une convergence progressive et prochaine vers la mise en œuvre de qubits logiques en nombre suffisant pour envisager des applications concrètes du calcul quantique dans les 5 prochaines années, avec une véritable accélération attendue après 2028, portée par des progrès en miniaturisation et en industrialisation des architectures, ouvrant la voie à des usages plus larges et à un déploiement à plus grande échelle.

De plus, d'après Olivier Tonneau, fondateur de Quantonation, les constructeurs d'ordinateurs quantiques parviennent à produire seulement deux à trois machines par an de nos jours, une cadence encore très limitée face à la demande croissante. On estime qu'environ 70 ordinateurs quantiques sont actuellement en service dans le monde. Pour accélérer la maturation du secteur, les fonds levés par ces entreprises devraient non seulement servir à relever les défis technologiques propres à chaque type de qubit, mais aussi à industrialiser et à augmenter significativement la capacité de production.

**Figure 7 :** Version simplifiée de l'évolution des capacités en Qubits Logiques des principaux acteurs du quantique



Source : Enquête Le Lab Quantique et Bain & Company (Janvier - Mai 2025)

Au-delà de la seule production de machines, une autre piste prometteuse se dessine : la capacité à interconnecter plusieurs ordinateurs quantiques pour mutualiser leurs ressources et étendre leurs capacités. Plutôt que de miser uniquement sur des processeurs toujours plus gros, certaines approches visent à relier plusieurs systèmes pour les faire fonctionner comme un tout cohérent et distribué. Parmi les acteurs qui s'efforcent de concrétiser cette vision, on retrouve notamment Welinq (France) et QphoX (Pays-Bas), qui développent des technologies d'interconnexion quantique reposant sur des liens optiques et des mémoires quantiques.

Ces avancées, si elles se confirment, ne se contenteront pas d'être techniques. Elles constitueront une rupture de performance, avec des gains potentiels en vitesse, en précision et en profondeur de modélisation. Plus encore, elles changeront les règles du jeu économique dans de nombreux secteurs à forte intensité de calcul (finance, logistique, chimie, énergie, pharmacie). Lorsque le calcul quantique apportera une supériorité concrète sur un cas d'usage critique, l'écart entre les entreprises prêtes et les autres sera conséquent.

## Anticiper maintenant pour éviter l'effet falaise

C'est ce que redoutent de nombreux experts quand ils évoquent un « cliff effect » : au moment où la technologie devient opérationnelle, le retard pris par les entreprises non préparées devient très difficile à combler. Contrairement à l'IA, le quantique ne s'ajoutera pas en fin de chaîne. Il exige une préparation longue, structurée, interdisciplinaire — et surtout, anticipée. C'est ce que souligne la Quantum Lead d'OVHcloud : *« Le quantique ne relève pas d'une simple évolution technique : c'est une véritable rupture technologique, qui appelle à être anticipée dès aujourd'hui, y compris en matière d'investissement. »*

L'enjeu ne porte pas seulement sur la technologie, mais aussi sur les ressources humaines. Les talents quantiques sont rares, leur formation prend en moyenne 8 à 10 ans et la compétition pour les recruter va s'intensifier. Attendre revient à se priver des compétences qui permettront demain de transformer une promesse technologique en avantage économique.

## Des entreprises déjà en mouvement dans un écosystème à soutenir

Certaines entreprises françaises ont déjà pris de l'avance. EDF, par exemple, a structuré dès 2018 une stratégie d'exploration proactive. Une première vague de recrutement a permis d'initier des expérimentations, aujourd'hui étendues à des cas d'usage concrets, accompagnés de binômes tech/métiers. Thales développe également des cas d'usage avec les principales startups françaises du domaine.

Mais il est essentiel de **soutenir les startup françaises** positionnées sur ces technologies. Sans financement public et privé massif, elles ne pourront rivaliser avec leurs concurrentes américaines, qui bénéficient d'un flux de capitaux bien supérieur. À défaut, la France et l'Europe risquent de dépendre demain d'un **calcul quantique américain**, faute d'avoir investi à temps dans leur propre écosystème. L'urgence n'est pas d'agir dans la précipitation, mais de commencer à construire. Cette rupture implique un changement d'échelle : il ne s'agit plus d'expérimenter à la marge, mais de **construire une vraie feuille de route** sur 3 à 5 ans,

mobilisant compétences, budgets, cas d'usage et intégration dans l'écosystème d'acteurs. Ceux qui commencent maintenant seront prêts quand la technologie le sera. Les autres, non.

En définitive, les grandes entreprises ayant des besoins intensifs en calcul doivent dès aujourd'hui intégrer le quantique à leurs stratégies, car l'émergence d'un avantage quantique business n'est plus une question de « si », mais de « quand ». Cet avantage correspond au moment où une organisation parvient à développer un cas d'usage dans lequel le calcul quantique lui confère une **supériorité concurrentielle tangible**.



## PARTIE 4

# Comment lancer sa préparation dès aujourd'hui pour être prêt pour demain ?

Se préparer au quantique ne relève plus de la spéculation, mais d'une démarche structurée à engager dès maintenant. Cela implique de surveiller les **jalons technoscientifiques, commerciaux et concurrentiels**, d'identifier les premiers cas d'usage pertinents, de rester connecté à l'écosystème et de commencer à structurer les compétences et les infrastructures en interne.

Pour repérer les **points de bascule en termes d'avancée et d'adoption** du calcul quantique, il est crucial d'avoir une veille active sur :

- **les jalons technoscientifiques** (ex. : seuil de qubits physiques et logiques, taux d'erreurs d'une opération entre 2 qubits physiques, interconnexions entre des cœurs quantiques, rupture technologique sur la mémoire quantique);
- **les jalons commerciaux et concurrentiels** (ex. : utilisation effective par un acteur industriel pour un cas d'usage lui apportant un avantage concurrentiel, création d'une équipe dédiée au quantique chez un concurrent, forte accélération des recrutements de talents spécialisés).

Pour accompagner les entreprises dans cette trajectoire, Bain & Company et Le Lab Quantique ont développé trois outils clés : un **index de maturité**, une **feuille de route quantique** et une **grille de priorisation des cas d'usage**.



### Jalons technoscientifiques

- Un fabricant d'ordinateurs quantiques (ex. : IBM, Google, Xanadu, Quantinuum) annonce avoir dépassé des seuils critiques :
  - nombre de qubits physiques et logiques;
  - taux d'erreurs d'une opération entre 2 qubits physiques;
  - interconnexion entre des cœurs quantiques;
  - rupture technologique sur la mémoire quantique.
- Un acteur comme AWS ou Azure Quantum annonce **un cloud quantique accessible et économique**.
- Un **framework facilitant le passage du classique au quantique** pour des cas d'usage métier est lancé (ex. : un plugin SAP ou Salesforce intégrant nativement du quantique).
- La **création de plateformes no-code** pour l'informatique quantique permet aux non-experts de l'utiliser facilement.



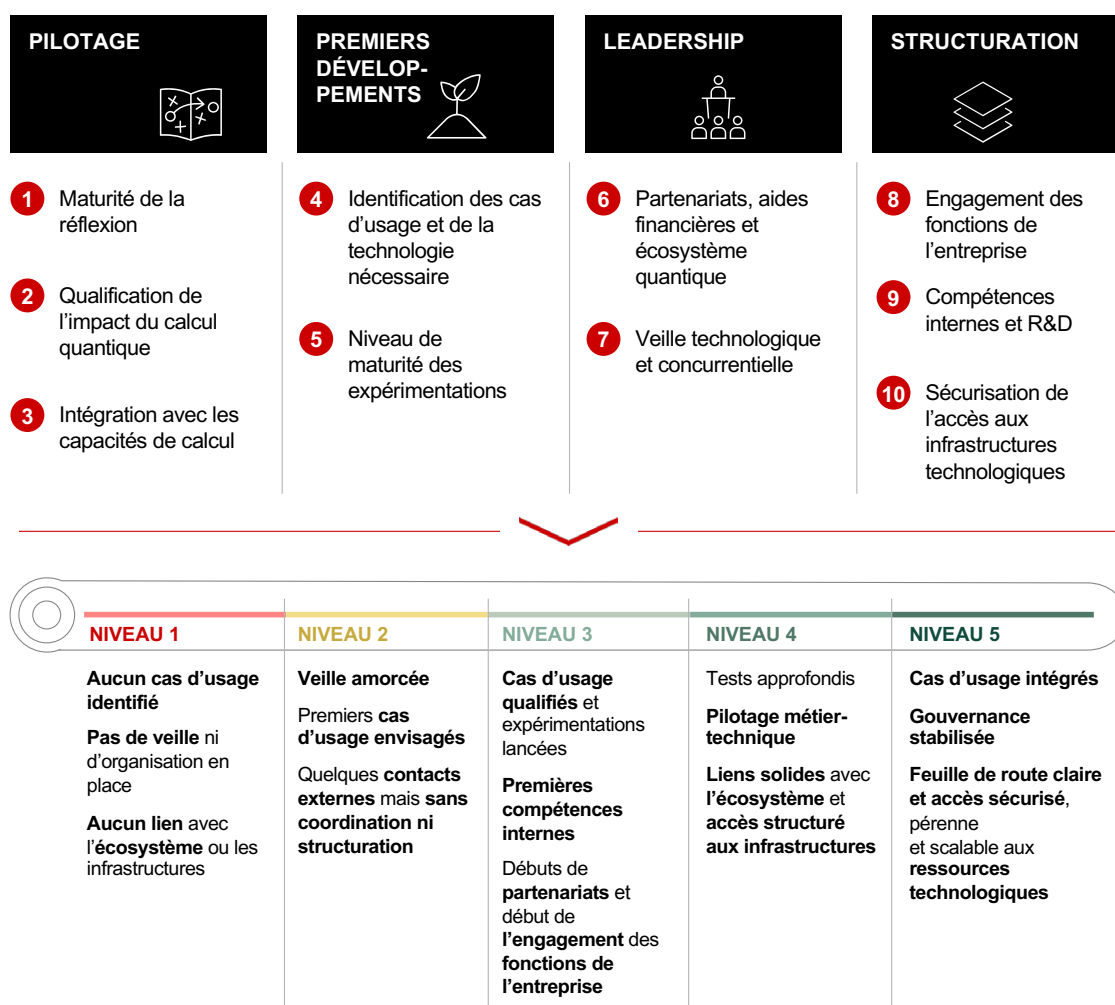


### Jalons industriels et concurrentiels

- **Un concurrent direct ou un grand acteur d'une autre industrie** annonce l'utilisation effective d'un ordinateur quantique pour un cas d'usage lui apportant un avantage concurrentiel.
- **Une démonstration publique** montre qu'un **algorithme quantique dépasse nettement un supercalculateur classique** sur un problème concret et utile pour l'industrie (ex. : optimisation logistique, pricing financier).
- **Un concurrent direct dans l'industrie** sort un communiqué de presse disant qu'il a désormais une **équipe dédiée au quantique** et qu'ils testent activement des solutions.
- **Un grand acteur se met à fortement accélérer ses recrutements de talents spécialisés en quantique.**
- **Des géants du numérique** (ex. : Microsoft, Google, Amazon) **rachètent massivement plusieurs startups quantiques.**

## Présentation de l'index de maturité

Figure 8 : Index de maturité



Source : Enquête Le Lab Quantique et Bain & Company (Janvier - Mai 2025)

L'index de maturité quantique permet aux entreprises de **mesurer leur niveau de préparation** selon quatre grands axes complémentaires : le pilotage, les premiers développements, le leadership dans l'écosystème et la structuration interne.

### **Maturité de la réflexion**

La maturité de la réflexion autour du quantique débute généralement par une phase de veille ou de cadrage informel. Progressivement, cette étape se structure à travers des travaux d'analyse des risques et opportunités, jusqu'à l'élaboration d'une feuille de route. Celle-ci permet d'articuler les premiers cas d'usage et de cadrer les expérimentations à venir. À un stade avancé, le sujet devient un véritable projet stratégique, intégré à la vision d'entreprise, avec un business case justifiant l'industrialisation progressive.

### **Qualification de l'impact du Quantum Computing**

Comprendre où et comment le quantique peut transformer les activités d'une entreprise est une étape déterminante. Cela passe d'abord par une évaluation de ses effets potentiels sur les processus internes, l'innovation ou la performance opérationnelle. À mesure que la réflexion se structure, l'analyse s'élargit aux risques externes (cybersécurité, concurrence, souveraineté). Les entreprises les plus avancées intègrent ces analyses dans leur stratégie de marché pour anticiper les ruptures sectorielles.

### **Hybridation avec les capacités de calcul**

Explorer l'hybridation entre les outils classiques (HPC, cloud) et le quantique permet d'identifier les configurations techniques les plus réalistes à court terme. Cette démarche débute par une phase d'observation, avant de se traduire par des travaux d'intégration plus poussés (tests d'algorithmes hybrides, choix d'architectures compatibles ou adaptation des formats de données). À maturité, le quantique est pleinement intégré dans les chaînes de calcul de l'entreprise.

### **Identification des cas d'usage et de la technologie nécessaire, et premières expérimentations**

La réflexion autour des cas d'usage commence par une veille large sur les applications potentielles du quantique. Progressivement, une taxonomie des cas d'usage internes est construite, jusqu'à l'identification de ceux qui présentent une vraie valeur différenciante. Ce travail inclut aussi la sélection des technologies (algorithmie et hardware spécifiques) les mieux adaptées. Les organisations matures savent hiérarchiser ces cas d'usage et structurer leur feuille de route expérimentale autour des priorités métiers.

De la même façon, l'accès à des **benchmarks** orientés applications devient essentiel pour permettre une évaluation multicritères objective des performances des calculateurs quantiques. Ces benchmarks constituent un outil structurant pour guider les choix technologiques et appuyer les décisions d'investissement à venir.

### **Niveau de maturité des expérimentations**

Le passage à l'action s'opère avec la mise en place de projets pilotes (POC) en partenariat avec des acteurs externes (startups, laboratoires, fournisseurs cloud). Ces premiers tests permettent de valider la pertinence des cas d'usage et de comparer les performances des différentes plateformes quantiques. À un stade plus avancé, ces expérimentations s'intègrent directement dans les processus métiers, avec un co-développement technologique pour garantir leur montée en échelle.

## **Partenariats, aides financières et écosystème Quantum Computing**

L'intégration dans l'écosystème quantique se fait d'abord par une participation ponctuelle à des événements spécialisés et par une prise de connaissance des dispositifs de soutien disponibles. Progressivement, cela peut évoluer vers des partenariats structurés avec des startups, des laboratoires ou des consortiums industriels, en tirant parti des aides financières dédiées à l'innovation quantique. À un stade avancé, certaines entreprises deviennent elles-mêmes moteurs de l'écosystème, en menant des projets collaboratifs, en publiant régulièrement et en influençant l'orientation sectorielle.

## **Veille concurrentielle et anticipation des tendances**

La veille sur les tendances du quantique est essentielle pour anticiper les bascules technologiques ou les mouvements de la concurrence. Ce travail débute souvent par une veille passive, avant de se structurer autour d'analyses approfondies permettant d'identifier les signaux faibles. Les entreprises matures transforment cette veille en capacité d'anticipation stratégique, ajustant régulièrement leur positionnement en fonction de l'évolution de l'écosystème.

## **Gouvernance**

La mise en place d'une gouvernance dédiée est une étape clé pour faire du quantique un projet piloté et non une initiative dispersée. Cela commence par la mobilisation d'un petit groupe d'experts, puis par la désignation de responsables métiers chargés d'animer les cas d'usage. Les organisations avancées intègrent ce pilotage dans leur gouvernance transverse, avec des processus décisionnels clairs, des budgets pluriannuels et des outils de mesure d'impact.

## **Compétences internes et R&D**

La montée en compétence sur le quantique commence souvent par des formations ciblées pour les équipes R&D. Elle s'étend ensuite à des profils métiers identifiés et peut donner lieu à la création d'une équipe dédiée dotée d'une expertise technique avancée. Dans les entreprises les plus matures, cette expertise devient visible à l'extérieur via des publications, des dépôts de brevets ou des sollicitations pour contribuer à des travaux collectifs.

## **Sécurisation de l'accès aux infrastructures technologiques**

Garantir un accès sécurisé, souverain et évolutif aux infrastructures de calcul quantique est un enjeu de plus en plus stratégique. Cela implique d'abord de prendre conscience des défis liés à la souveraineté technologique, puis de mettre en place une première infrastructure d'expérimentation. Les entreprises à l'avant-garde vont jusqu'à aligner leurs infrastructures sur les plus hauts standards de sécurité, tout en assurant leur indépendance vis-à-vis des fournisseurs clés.

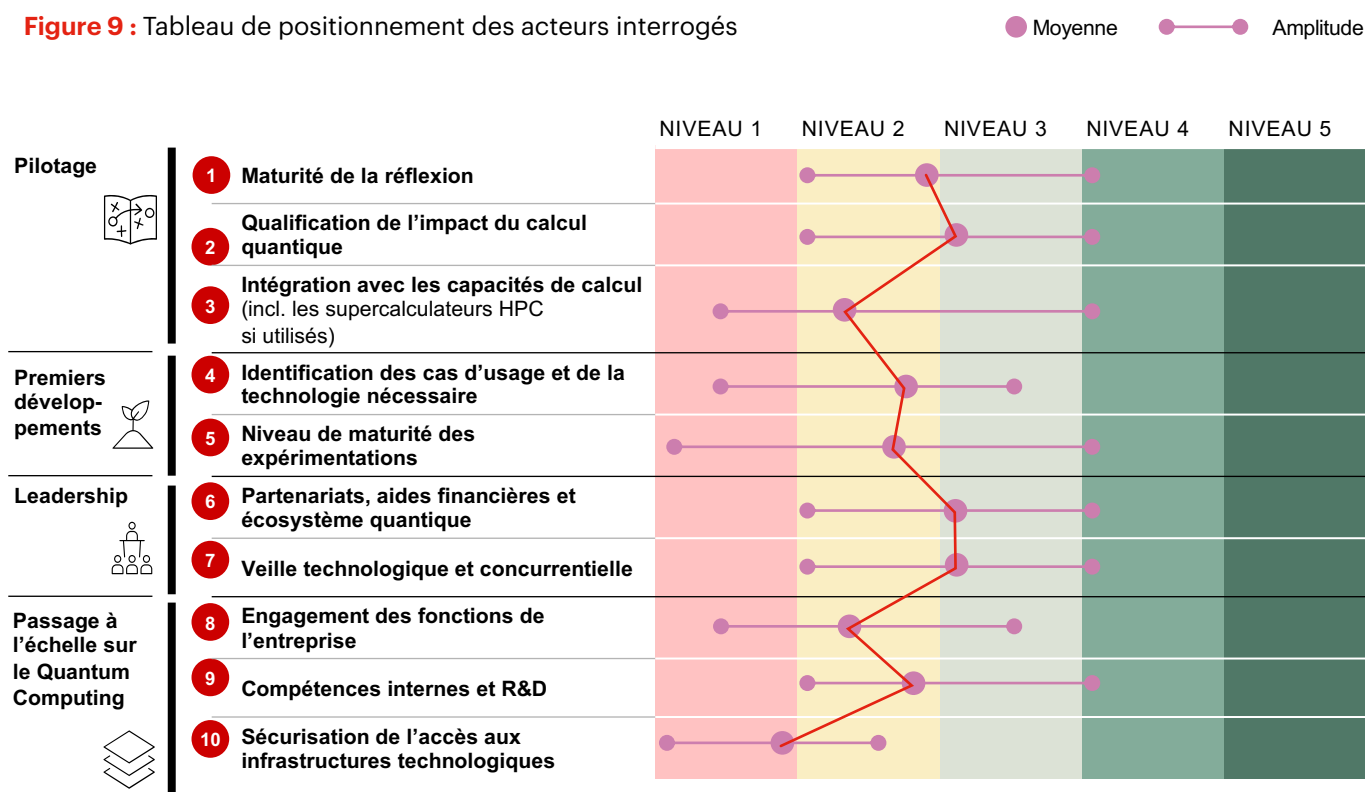
## Positionnement des acteurs interviewés

Annoncée depuis des années par les chercheurs et attendue avec impatience par les experts, la révolution quantique s'installe peu à peu dans le paysage technologique mondial. Mais si certains États ont saisi très tôt son potentiel (ex. : États-Unis, Canada, Australie, France, Allemagne), l'appropriation de ces technologies par les entreprises reste contrastée, tant d'un pays à l'autre que d'un secteur à l'autre.

Sur ce terrain, la France se distingue. Le plan national quantique, lancé en 2021 et doté de 1,8 milliard d'euros sur cinq ans, a permis de structurer un écosystème dense et ambitieux, réunissant à la fois chercheurs, industriels et startups. Toutes les grandes familles technologiques – supraconducteurs, photons, ions piégés, atomes neutres – y sont représentées. Pourtant, tous les industriels français n'ont pas pris le pli du quantique et sont à des stades différents dans leur réflexion et action, en témoigne le tableau ci-dessous.

Parmi les acteurs interrogés, le secteur financier affiche une forte disparité en son sein. En effet, si le Crédit Agricole fait figure de bon élève en misant sur de nombreuses initiatives (Fallen Angels, Pricing produits dérivés), d'autres acteurs dans le secteur sont pour le moment plus prudents. Par ailleurs, les entreprises du secteur de l'énergie interrogées sont elles aussi actives à l'instar d'EDF, qui explore avec Pasqal l'utilisation de processeurs quantiques. C'est donc naturellement que la société fait figure de modèle dans son secteur, étant présente dans le quantique depuis plus de 7 ans. À l'inverse, d'autres industries se montrent plus précautionneuses (chimie, santé). Alors que des groupes allemands comme BASF investissent dans la chimie quantique, le secteur français de la santé reste pour le moment assez discret.

**Figure 9 :** Tableau de positionnement des acteurs interrogés



Note 1 : Pour les opportunités, car groupement plus mature sur les mouvements défensifs liés à la cryptographie.

Source : Enquête Le Lab Quantique et Bain & Company (Janvier - Mai 2025).



### Positionnement stratégique et historique

Le Crédit Agricole fait figure de **pionnier dans l'exploration du calcul quantique**, notamment via sa filiale CACIB, avec des premières initiatives dès **2019**, à l'époque où seuls quelques grands noms comme J.P. Morgan ou Wells Fargo s'y intéressaient. Le projet a été porté en interne par un sponsor fort, Ali El Hamidi, et s'est construit en partenariat avec des acteurs européens clés comme **Pasqal** et **Multiverse Computing**. Dès le départ, l'approche s'est voulue pragmatique : tester des cas d'usage concrets à fort potentiel métier, plutôt que de construire une R&D centralisée.

### Mise en œuvre au sein de l'entreprise

Deux expérimentations ont été menées entre 2021 et 2022. La première portait sur la **valorisation de produits dérivés**, en s'appuyant sur des algorithmes inspirés du quantique pour optimiser les performances des modèles. La seconde, baptisée **Fallen Angels**, visait à anticiper la **dégradation de la qualité de crédit** de certaines contreparties via du machine learning quantique. Ces projets ont montré des **gains significatifs** (jusqu'à 30 % de réduction du temps de calcul).

### Enjeux clés

Dans le secteur bancaire, le quantique pourrait à terme transformer en profondeur des fonctions critiques comme le **risk management**, **l'allocation d'actifs** ou **encore la détection de fraudes complexes**.

Le défi est de se préparer à cette transformation sans surinvestir trop tôt.

Le Crédit Agricole mise ainsi sur une **logique hybride et progressive**, tout en restant attentif à la maturité réelle des technologies.

L'entreprise veille également à s'investir activement dans l'écosystème français.

Son implication dans

**France Quantum**, des groupes de travail comme **Teratec** ou dans le Hub quantique du CEA en est une illustration. L'enjeu est clair : être prêt le jour où le quantum passera du laboratoire au cœur des métiers.



### Positionnement stratégique et historique

EDF a amorcé son exploration du calcul quantique dès **2018**, comme possible complément aux supercalculateurs classiques face à des problématiques complexes, telles que la simulation de matériaux, la simulation physique ou les problèmes d'optimisation. Cette initiative visait à évaluer les bénéfices potentiels du quantique pour ses activités, notamment en termes de taille des problèmes et précision des calculs. L'entreprise a constitué une équipe interdisciplinaire regroupant des experts en optimisation, science des matériaux et physique critique. Cette équipe a été **chargée d'identifier les cas d'usage pertinents** et de développer une expertise interne en algorithmie quantique.

### Mise en œuvre au sein de l'entreprise

EDF a établi des partenariats stratégiques avec des acteurs clés du secteur quantique, notamment **Pasqal, GENCI, Alice & Bob, Eviden, Welinq, Qobly et Quandela**. Ces collaborations ont permis de mener des projets pilotes, tels que **l'optimisation de la charge intelligente des véhicules électriques** et la simulation de structures hydroélectriques. Par ailleurs, EDF coordonne le **projet OECQ** (Optimisation Énergétique des Circuits Quantiques), en collaboration avec Alice & Bob, Quandela et le CNRS, pour évaluer et améliorer **l'efficacité énergétique des systèmes quantiques**.

### Enjeux clés

Dans le secteur de l'énergie, le calcul quantique représente une opportunité majeure pour améliorer la **précision des prévisions de consommation, optimiser la gestion des réseaux électriques et accélérer la simulation du vieillissement des matériaux, la simulation du comportement des structures et des écoulements ou le management d'énergie**. EDF reconnaît que l'adoption de ces technologies nécessite une **montée en compétence progressive de ses équipes**. L'entreprise identifie également des défis à relever, tels que la **disponibilité limitée des processeurs quantiques (QPU)** et la nécessité de **développer des algorithmes adaptés à ses besoins spécifiques**. EDF s'efforce de lever ces verrous technologiques en investissant dans la recherche et en collaborant étroitement avec l'écosystème quantique français et international.

# THALES

## Positionnement stratégique et historique

Thales a identifié très tôt le calcul quantique comme un levier potentiel de transformation dans plusieurs de ses domaines stratégiques, en particulier autour de la cybersécurité, de la Défense, de l'aéronautique et du spatial. Le groupe sera précurseur dans l'utilisation des hardware QPU et prépare dès à présent l'élaboration d'algorithmes quantiques pour les calculateurs de type FTQC (Fault Tolerant Quantum Computer). Le groupe participe à plusieurs projets européens (QC4EO et QR4EO avec l'European Space Agency, Q-Neko avec EuroHPC en partenariat Europe-Japon, QLSI2 pour benchmarker des prototypes de QPU). Il s'appuie sur un écosystème dense de partenariats avec les startups françaises du programme PROQCIMA, avec qui il collabore sur le benchmark applicatif des calculateurs quantiques à travers le projet BACQ du programme MetriQs du LNE, et sa valorisation européenne à l'EQCBC (European Quantum Computers Benchmark Committee).

## Mise en œuvre au sein de l'entreprise

Thales met en œuvre le quantique à travers une stratégie fondée sur des partenariats ciblés en France et à l'international et des expérimentations pour des cas d'usage d'intérêt pour ses Business Lines. Le groupe collabore notamment avec **Alice & Bob** sur la simulation électromagnétique et la crypto-analyse, avec **Pasqal** sur la planification de missions de constellation de satellites et le routage télécom, avec **Quandela** sur l'optimisation de trajectoires de drones, avec **Qubly** pour le benchmark de son premier prototype et avec **C12** sur le pistage. Le plus grand hackathon international corporate a été organisé par Thales en 2023 simultanément dans 5 pays et des ateliers internes sont organisés pour identifier des cas d'usage concrets. Thales dispose d'équipes expertes réparties dans 4 centres de recherche en France, à Singapour, au Canada et en Grande-Bretagne, qui collaborent avec les écosystèmes locaux.

## Enjeux clés

Chez Thales, le quantique est perçu comme une technologie qui va améliorer la performance de nos capteurs (radars, sonars, etc.) d'un facteur 100, 1000 ou 10 000, et disrupter les domaines de la cyber et de la Défense. Dans des secteurs où la puissance de calcul sera déterminante, **le calcul quantique offre des leviers concrets : mieux concevoir, et accélérer la boucle OODA (Observation, Orientation, Détection & Action)**. L'enjeu est d'autant plus grand que **Thales conçoit des systèmes critiques, nécessitant une qualification des algorithmes déployés**. Le quantique permettra également, à performance égale, de réduire la consommation énergétique requise pour l'IA et la simulation intensive.



## Présentation de la feuille de route quantique

Devenir « quantum-ready » nécessite une **série d'étapes progressives permettant d'accumuler compétences et expériences**. Cette montée en compétence n'est pas compressible : maîtriser l'informatique quantique demande du temps, de l'expérimentation et une compréhension approfondie des impacts pour chaque secteur d'activité. Contrairement aux transformations numériques classiques, l'adoption du quantique exige un apprentissage spécifique et un engagement dans un écosystème en constante évolution.

L'enjeu essentiel de la mise en place d'une feuille de route quantique consiste à embarquer, avec le bon tempo, l'ensemble des fonctions et métiers de l'entreprise, en faisant progressivement sortir le sujet du strict périmètre de la R&D pour acculturer les équipes aux usages et aux horizons du quantique. Contrairement à l'IA générative, souvent apparue sous forme de « big bang », le quantique exige un marathon de 3 à 4 ans : il faut avancer sans précipitation — au risque de décrédibiliser les initiatives —, mais sans lenteur excessive non plus, sous peine de subir un effet falaise lié à l'avantage computationnel qu'un concurrent aurait activé.

Trois dimensions structurantes permettent de piloter efficacement cette trajectoire.

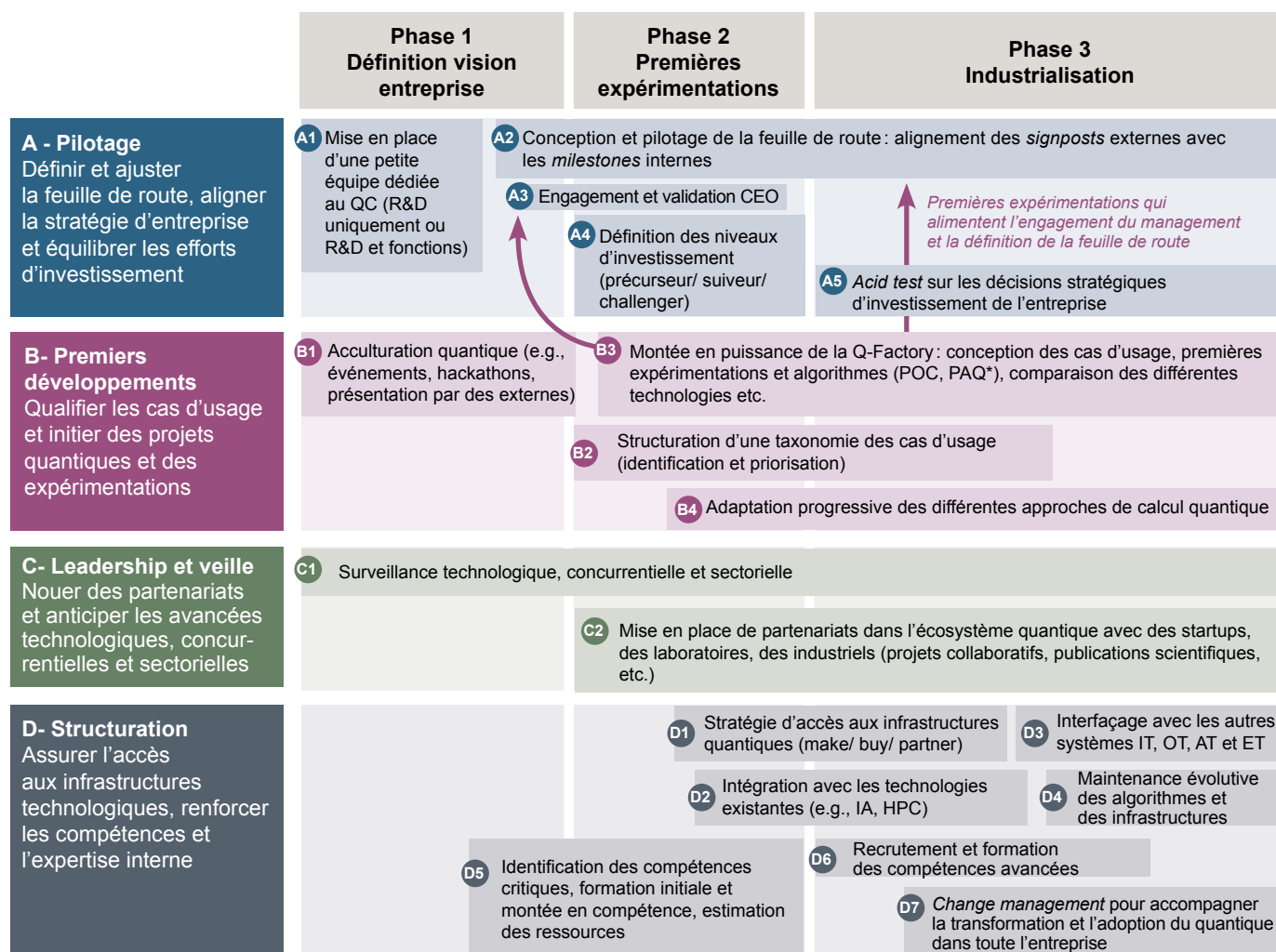
- La première porte sur les ressources à engager : combien investir, avec quelles expertises mobilisées, pour aller de l'évaluation technologique à la qualification des premiers cas d'usage, jusqu'à la réalisation (formulation, paramétrage, production, tests, retours d'expérience) et à l'anticipation organisationnelle.
- La deuxième concerne le niveau d'exposition interne du sujet : comment sortir d'une approche limitée à quelques profils R&D pour impliquer progressivement les directions opérationnelles, les équipes analytics/SI et, à terme, le Comité de Direction.
- Enfin, la feuille de route doit s'appuyer sur des jalons clairs : il s'agit de faire émerger des résultats progressifs, visibles et mesurables, qui montrent l'apport du quantique à l'arsenal analytique global (classique, IA, HPC, quantique). En parallèle, un véritable « newsflow » doit être construit, en combinant avancées internes et veille structurée sur les signaux externes (technologies, concurrents, écosystème).

Pour structurer cette feuille de route, un chemin critique est à établir : nous en avons retracé les principales composantes sur la base des travaux menés dans ce Livre Blanc, que nous vous présentons dans les pages suivantes.

Pour gérer cette transition, une feuille de route structurée est nécessaire, articulée autour de quatre axes :

- **Pilotage** : définir et ajuster la feuille de route, aligner la stratégie d'entreprise et équilibrer les efforts d'investissement ;
- **Premiers développements** : qualifier les cas d'usage et initier des projets quantiques et des expérimentations ;
- **Leadership et veille** : nouer des partenariats et anticiper les avancées technologiques, concurrentielles et sectorielles ;
- **Structuration** : assurer l'accès aux infrastructures technologiques, renforcer les compétences et l'expertise interne.

**Figure 10 :** Feuille de route quantique



\* Pack quantique : programme de financement de la région Île-de-France pour explorer le potentiel du calcul quantique appliqué aux cas d'usage des industriels

Source : Enquête Le Lab Quantique et Bain & Company (Janvier - Mai 2025)



## 1. PILOTAGE

### Définir et ajuster la feuille de route, aligner la stratégie d'entreprise et équilibrer les efforts d'investissement

#### Mise en place d'une petite équipe dédiée au QC (R&D uniquement ou R&D et fonctions)

Le pilotage de la stratégie d'implémentation des technologies quantiques commence par la mise en place et la structuration d'une petite équipe dédiée. Cette équipe peut soit émaner uniquement de la fonction R&D, soit être composée à la fois de membres de la R&D et d'autres fonctions.

#### Conception et pilotage de la feuille de route

L'alignement des jalons internes (*milestones*) avec les repères externes (*signposts*) est fondamental pour assurer une transition efficace vers le quantique. Il s'agit d'identifier les avancées clés du marché, les signaux faibles et les évolutions technologiques afin de structurer une trajectoire cohérente et ajustable.

Pour anticiper les points de bascule dans l'adoption du quantique, il est essentiel de surveiller deux types de jalons : techno-scientifiques d'un côté, industriels et concurrentiels de l'autre. Du point de vue technologique, des signaux forts incluent le franchissement de seuils

critiques par les fabricants de qubits (nombre, taux d'erreur, interconnexion, mémoire), l'émergence d'un cloud quantique accessible proposé par des acteurs comme AWS ou Azure, ou encore l'apparition de frameworks et de plateformes no-code facilitant le passage du classique au quantique pour des utilisateurs non experts. Côté marché, des jalons clés peuvent être l'annonce par un concurrent de l'usage réel d'un ordinateur quantique sur un cas d'usage stratégique, une démonstration surpassant un supercalculateur classique sur un problème concret ou bien la structuration d'équipes dédiées et le recrutement massif de talents spécialisés. Les signaux les plus avancés incluent également les rachats de startups quantiques par de grands groupes technologiques. Ces jalons, une fois identifiés, permettent de baliser la feuille de route et d'ajuster le rythme d'engagement.

### **Engagement et validation du CEO**

En fin de phase 1, il est essentiel d'impliquer les instances dirigeantes, en particulier le CEO, pour assurer un engagement stratégique fort et une vision claire sur les opportunités et les défis à venir. L'engagement du CEO sera nécessaire pour la définition des niveaux d'investissement.

### **Définition des niveaux d'investissement**

La préparation au quantique nécessite une allocation progressive des ressources en fonction du positionnement stratégique de l'entreprise : Précurseur, Challengeur, Suiveur. Un cadrage précis des investissements permet d'optimiser les moyens alloués tout en restant agile face aux évolutions technologiques.

### **Acid test sur les décisions stratégiques d'investissement de l'entreprise**

Toutes les décisions stratégiques d'investissement de l'entreprise doivent être soumises à un test décisif (*acid test*) de compatibilité avec le futur environnement quantique. Ce test permet d'anticiper les risques et de s'assurer que les choix stratégiques actuels ne deviendront pas caduques suite à l'adoption des technologies quantiques, ou, à l'inverse, ne freineront pas la transition quantique.



## **2. PREMIERS DÉVELOPPEMENTS**

### **Qualifier les cas d'usage et initier des projets quantiques et des expérimentations**

#### **Acculturation quantique**

L'acculturation quantique est une première étape essentielle pour sensibiliser et aligner l'ensemble des parties prenantes autour des enjeux et des opportunités de l'informatique quantique. Elle repose sur des témoignages d'experts, des retours d'expérience d'entreprises déjà engagées, l'explication des fondamentaux du quantique et des formations adaptées aux différents niveaux de maturité. L'objectif est d'aider les équipes à comprendre les concepts clés et à anticiper l'impact du quantique sur leur métier. Cela favorise une prise de conscience interne et un alignement stratégique indispensables avant de lancer les premiers cas d'usage.

#### **Sortir le quantique du seul périmètre R&D pour structurer une taxonomie des cas d'usage**

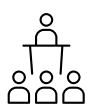
L'implication des métiers via les CxOs est essentielle pour identifier les enjeux concrets du quantique dans chaque domaine d'activité et pour impliquer l'ensemble de l'entreprise. Structurer une taxonomie des cas d'usage permet d'anticiper les applications à forte valeur ajoutée.

#### **Montée en puissance de la Q-Factory**

Créer une Q-Factory permet d'expérimenter et de concevoir les premiers cas d'usage. Cette structure pilote les tests et les premiers développements, assurant un apprentissage accéléré et une montée en maturité progressive. Cette étape va de la préparation des jeux de données en amont jusqu'à la comparaison des différentes technologies pour un même cas d'usage.

### Adoption progressive des différentes approches de calcul quantique

L'adoption du quantique doit être progressive et s'intégrer aux outils analytiques existants. Cette évolution peut s'effectuer en plusieurs étapes en commençant par la simulation d'algorithmes quantiques sur des infrastructures classiques (*software based quantum simulator*), puis le passage aux simulateurs quantiques (*hardware based quantum simulator*) jusqu'au déploiement complet des algorithmes quantiques digitaux (*gate based quantum computing*). Cependant, cette progressivité ne doit pas devenir un frein pour passer à l'avancée technologique suivante et, *in fine*, réduire l'investissement dans les technologies de rupture.



## 3. LEADERSHIP ET VEILLE

### Nouer des partenariats et anticiper les avancées technologiques, concurrentielles et sectorielles

#### Surveillance technologique, concurrentielle et sectorielle

Le quantique évolue rapidement. Une veille active permet de suivre les avancées scientifiques, les développements industriels et les mouvements des concurrents afin d'ajuster en temps réel la stratégie d'adoption. Cette veille active permettra de repérer les *signposts* essentiels à la définition et à l'ajustement de la feuille de route.

#### Mise en place de partenariats stratégiques dans l'écosystème quantique

Les entreprises doivent s'intégrer dans l'écosystème quantique en nouant des partenariats avec des startups, des laboratoires et des industriels. Ces collaborations facilitent l'accès aux dernières innovations et accélèrent la montée en compétence.

Cette feuille de route fournit un cadre structuré pour permettre aux entreprises de se positionner stratégiquement sur l'informatique quantique et d'en exploiter tout le potentiel.



## 4. STRUCTURATION

### Assurer l'accès aux infrastructures technologiques, renforcer les compétences et l'expertise interne

#### Stratégie d'accès aux infrastructures quantiques

Les entreprises doivent décider de leur approche face aux infrastructures technologiques nécessaires au quantique : produire en interne (*make*), s'appuyer sur des solutions externes (*buy*) ou nouer des partenariats stratégiques (*partner*). Ce choix dépendra de la posture d'investissement (A.4) et définira les ressources et les compétences à développer.

Si, pour l'instant, peu d'industriels disposent de leurs propres infrastructures quantiques, cette situation pourrait évoluer. On observe déjà l'émergence de stratégies variées d'accès aux ressources technologiques, qu'il s'agisse d'offres cloud, de partenariats ou d'initiatives internes. Cette question deviendra d'autant plus critique que certains experts, comme Alice & Bob, anticipent une forte tension sur l'accès aux QPUs dans les années à venir. En effet, les fabricants actuels ne semblent pas encore en capacité de produire et de livrer ces unités en volumes suffisants pour répondre à une demande croissante.

Dans cette logique, EDF développe en interne une infrastructure de base afin de pouvoir tester ses propres algorithmes (*make*). À l'inverse, d'autres acteurs, notamment dans la banque, privilégient l'accès à distance (cloud), en louant des capacités de calcul auprès de fournisseurs spécialisés tels qu'IBM (*buy*). D'autres choisissent une approche partenariale, en s'associant à des scale-ups comme Pasqal pour explorer des cas d'usage quantique appliqués à la mobilité ou à la conception industrielle (*partner*).

#### Hybridation avec les technologies existantes (ex. : IA, HPC)

L'intégration de l'informatique quantique doit s'inscrire dans une continuité avec les technologies existantes, notamment les supercalculateurs (HPC) et l'intelligence artificielle (IA).

Aujourd'hui, les supercalculateurs sont largement utilisés pour entraîner et exécuter des modèles d'IA complexes, et le quantique pourrait, à terme, jouer un rôle clé dans l'optimisation et l'accélération de certains processus.

L'approche hybride qui combine HPC, IA et quantique permettra d'exploiter les forces de chaque technologie selon les besoins métiers. Par exemple, l'IA peut être utilisée pour optimiser la répartition des tâches entre calcul classique et quantique, tandis que le HPC servira d'infrastructure de transition avant un déploiement massif du quantique. Dans ce cadre, une interopérabilité fluide entre ces environnements sera essentielle pour maximiser la valeur ajoutée du quantique, tout en capitalisant sur les investissements technologiques existants. Toutefois, il convient de rappeler qu'au sein de nombreuses directions R&D, l'intelligence artificielle et l'informatique quantique sont parfois perçues comme deux technologies concurrentes. L'IA, déjà mature et génératrice de valeur, bénéficie de résultats concrets et mesurables à court terme. Le quantique, encore en phase exploratoire, mobilise des ressources importantes sans retour immédiat. Dans un contexte de budgets contraints, cette asymétrie pousse certaines organisations à arbitrer en faveur de l'IA. Néanmoins, il reste raisonnable d'envisager à court et à moyen terme des interactions entre ces deux technologies. Si la communauté scientifique, les chercheurs et les industriels nourrissaient initialement de grands espoirs quant à l'apport de l'informatique quantique à l'intelligence artificielle, les perspectives ont sensiblement évolué. Les ordinateurs quantiques restent aujourd'hui trop instables et bruités pour manipuler efficacement de grandes quantités de données, rendant leur utilisation peu adaptée aux applications d'IA à grande échelle, qui reposent sur des volumes massifs et des calculs intensifs. Il est toutefois légitime de rester optimiste puisque d'aucuns arguent que le quantique pourrait servir à générer de nouvelles données et ainsi se mettre au service de l'IA.

En revanche, les espoirs sont plus nombreux dans le sens inverse. L'IA pourrait se révéler précieuse pour faire progresser le quantique, en optimisant l'exploitation des machines actuelles et en accélérant leur montée en maturité. Des techniques d'apprentissage automatique, notamment par renforcement, sont utilisées pour calibrer dynamiquement les qubits, optimiser les séquences de portes quantiques ou adapter les algorithmes aux spécificités physiques de chaque machine. L'IA est également mobilisée pour anticiper les schémas de bruit, améliorer la correction d'erreurs quantiques (QEC) et gérer de manière intelligente les ressources de calcul dans des architectures hybrides.

Les différents paradigmes de calcul (classique, IA, HPC, quantique) répondent à des besoins distincts selon le volume de données, le nombre de paramètres et la puissance énergétique requise. Chaque technologie permet d'adresser des cas d'usage spécifiques : les CPU pour les tâches quotidiennes, l'IA pour le traitement massif de données, le HPC pour les simulations intensives et les QPU pour des problèmes d'optimisation complexes. Ce positionnement permet de mieux cartographier les complémentarités entre technologies et d'identifier les cas où le quantique pourrait jouer un rôle différenciant. Ainsi, la consommation énergétique pourrait constituer un avantage stratégique du quantique dans certaines applications. À titre d'illustration, IBM et Pasqal ont annoncé fin 2024 une nouvelle étape dans leur collaboration visant à développer une architecture logicielle unifiée avec Qiskit, qui permet une interopérabilité fluide entre différents types de technologies quantiques et classiques pour les supercalculateurs hybrides. Cette initiative vise à faciliter l'adoption des technologies quantiques en offrant aux utilisateurs la flexibilité de choisir la technologie la plus adaptée à chaque tâche au sein d'un HPC.

### **Interfaçage avec les autres systèmes IT, OT, AT et ET**

L'adoption du quantique nécessite une interopérabilité avec les infrastructures existantes (systèmes IT, OT, AT et ET). Une architecture bien intégrée facilite le déploiement futur des solutions quantiques.

L'informatique quantique ne se substituera pas aux systèmes existants ; elle devra s'y intégrer de manière fluide. Son adoption passera par une orchestration différenciée avec les infrastructures IT (Information Technology), OT (Operational Technology), AT (Automation Technology) et ET (Enterprise Technology), chacune impliquant des besoins spécifiques d'interfaçage.

L'IT, qui désigne l'ensemble des systèmes d'information traditionnels (infrastructures cloud, bases de données, logiciels métiers), est naturellement la plus proche du quantique. Celui-ci pourra venir renforcer certaines fonctions critiques, comme la cybersécurité ou l'analyse avancée de données. Encore faut-il qu'il puisse s'interfacer facilement avec les environnements logiciels existants, via des APIs et des architectures cloud compatibles.

L'OT, centré sur le pilotage des systèmes physiques et industriels (capteurs, lignes de production, automatismes), pourrait lui aussi tirer parti du quantique, notamment pour optimiser des opérations complexes comme l'ordonnancement ou la gestion de ressources en temps réel. Cela suppose de créer des ponts entre les systèmes de contrôle locaux et les moteurs de calcul quantique, souvent distants.

L'AT regroupe les technologies d'automatisation de processus, qu'ils soient physiques (robots, drones) ou logiciels (RPA, IA embarquée). Le quantique pourrait ici améliorer la coordination dynamique, par exemple dans des chaînes logistiques automatisées. Mais cette intégration reste conditionnée à la capacité de déployer des briques quantiques dans des environnements très contraints, en termes de temps réel, de bande passante ou d'énergie.

Enfin, l'ET recouvre les technologies de pilotage stratégique de l'entreprise : ERP, CRM, outils d'aide à la décision. À terme, ces outils pourraient intégrer des modules quantiques pour simuler des scénarios complexes, optimiser des portefeuilles ou améliorer les prévisions. Mais ici encore, l'enjeu sera de rendre ces capacités accessibles depuis des plateformes déjà en production.

Dans tous les cas, la promesse du quantique dépendra autant de la puissance des qubits que de la qualité des interfaces qui les relieront au reste du système d'information.

### **Maintenance évolutive des algorithmes et des infrastructures**

L'adoption des technologies quantiques ne s'arrête pas à leur implémentation initiale : une maintenance évolutive est essentielle pour garantir leur efficacité et leur pertinence dans le temps. Il s'agit d'améliorer en continu à la fois les algorithmes et les infrastructures pour optimiser leurs performances à mesure que la maturité du hardware évolue, notamment avec l'émergence de nouvelles architectures de qubits ou de meilleures capacités de correction d'erreurs. Cette maintenance proactive permet d'avancer en même temps que les innovations technologiques.

### **Identification des compétences critiques, formation initiale et montée en compétence, estimation des ressources**

Comprendre et paramétrer les algorithmes quantiques nécessite des compétences spécifiques. L'identification des talents et des expertises clés permettra de structurer une montée en compétence efficace et de préparer les équipes à l'adoption du quantique. Une première phase de formation des compétences en interne est nécessaire pour sensibiliser les équipes aux concepts fondamentaux et leur permettre de se projeter sur les cas d'usage.

Aujourd'hui, la guerre des talents spécialisés en quantique n'a pas encore débuté, mais cette situation pourrait évoluer rapidement si une avancée technologique majeure venait à bouleverser le secteur. Il est donc stratégique pour les entreprises d'anticiper cette transformation dès maintenant en recrutant des profils experts, mais aussi en formant les équipes métiers. L'enjeu est de leur permettre de comprendre les implications du quantique et de convertir ses promesses techniques et computationnelles en véritables leviers de performance business.

### **Recrutement et formation des compétences avancées**

Une fois les bases acquises, il est essentiel de recruter ou de former des experts capables de concevoir et d'optimiser des algorithmes quantiques, assurant ainsi une autonomie stratégique sur le long terme.

### **Change management pour accompagner la transformation et l'adoption du quantique dans toute l'entreprise**

L'intégration des technologies quantiques ne se limite pas aux équipes R&D ou IT : elle implique une transformation plus large qui nécessite de sensibiliser et de former l'ensemble des métiers. Cette phase de *change management* vise à diffuser une culture quantique au



sein de l'entreprise afin d'accroître la capacité des équipes à identifier des cas d'usage pertinents et à anticiper le moment pour basculer vers des projets quantiques.

L'accompagnement au changement repose sur plusieurs leviers :

- Sensibilisation continue : organisation de webinaires, d'ateliers et de conférences dédiés à toutes les fonctions pour vulgariser les concepts et les applications du quantique ;
- Formations adaptées aux métiers : développement de modules spécifiques par fonction (finance, supply chain, R&D, cybersécurité, etc.) pour montrer des cas d'usage du quantique ;
- Création d'un réseau de référents quantiques : mise en place d'un groupe d'ambassadeurs internes capables de relayer les connaissances et d'identifier des opportunités ;
- Développement d'outils d'aide à la décision : fournir aux métiers des grilles d'évaluation pour les aider à déterminer quand une problématique métier pourrait être mieux adressée par une approche quantique.

## Grille de priorisation des cas d'usage

Lorsque plusieurs cas d'usage potentiels ont été identifiés au sein d'une entreprise, il faut les **prioriser pour définir ceux à tester en priorité**, avant d'investir dans une expérimentation ou un développement technologique. La grille d'analyse ci-dessous propose une approche structurée pour noter les cas d'usage et identifier ceux avec le plus haut potentiel business, technique, opérationnel et réglementaire. Cet outil doit aider les entreprises à prioriser leurs efforts, à qualifier les conditions de réussite et à distinguer les opportunités immédiates des sujets encore trop prospectifs.



**Figure 11 :** Grille d'analyse de cas d'usage potentiel

	QUESTIONS		RÉPONSE DE 1 À 4	
	Description du cas d'usage	Quelle est la problématique que le cas d'usage cherche à adresser ? Dans quel processus métier s'inscrit-elle ?		
<b>A – Impact business/ Criticité</b> Quelle est la valeur ajoutée pour l'entreprise ?	<b>ROI attendu</b>	Quelle baisse des coûts/augmentation des revenus attendue par la réalisation du cas d'usage ?	1 : baisse de coûts ou augmentation de revenus limitées	4 : baisse de coûts ou augmentation de revenus significatives
	<b>Avantage concurrentiel</b>	La réussite du cas d'usage permettrait-elle d'obtenir un avantage significatif sur le marché ?	1 : avantage limité	4 : avantage significatif
<b>B – Complexité computationnelle</b> Le problème à adresser peut-il bénéficier d'un avantage quantique ?	<b>Complexité</b>	Le problème à adresser est-il intrinsèquement difficile/impossible à traiter pour un ordinateur « classique » ?	1 : potentiellement traitable avec un ordinateur classique	4 : impossible à traiter avec un ordinateur classique
	<b>Algorithmie quantique</b>	Le problème peut-il bénéficier d'un algorithme quantique connu ?	1 : non, pas actuellement	4 : oui, actuellement
	<b>Gain par rapport aux approches « classiques »</b>	Le calcul classique touche-t-il d'ores et déjà ses limites pour le cas d'usage envisagé ? Une approche quantique permettrait-elle un gain de temps ou de performance par rapport aux approches classiques ?	1 : gain limité par rapport aux approches classiques	4 : fort gain de temps et/ou de performance
<b>C – Faisabilité technologique</b> Le cas d'usage est-il compatible avec l'état de l'art du quantum computing ? Le cas échéant, à quel horizon temporel et pour quel coût de développement ?	<b>Sources de données</b>	Les données nécessaires pour réaliser le cas d'usage sont-elles disponibles ? Si oui, leur niveau de qualité (complétude, qualité, fraîcheur, etc.) est-il suffisant ?	1 : non disponibles	4 : oui, disponibles et de qualité
	<b>Quantité de données</b>	Le volume de données d'entrée requis pour le cas d'usage est-il compatible avec les algorithmes envisagés ?	1 : non	4 : oui
	<b>Compatibilité NISQ/FTQC</b>	Le cas d'usage peut-il être abordé avec les ordinateurs quantiques actuels (limités en qubits et bruités) ou nécessite-t-il une correction d'erreur complète (FTQC) ?	1 : nécessite du FTQC	4 : peut être abordé avec les ordinateurs NISQ
	<b>Partenaire technologique</b>	Un partenaire technologique a-t-il été identifié pour travailler sur ce cas d'usage ? Si oui, peut-il garantir la disponibilité de ses machines et/ou de ses équipes ?	1 : non	2 : oui et oui
	<b>Horizon temporel</b>	À quel horizon temporel l'avantage envisagé pourra-t-il être obtenu ?	1 : horizon 10 ans et +	4 : horizon 5 ans et -
	<b>Coût estimé</b>	Quel est le coût estimé du développement de ce cas d'usage (ex. : mise en place d'un partenariat) ?	1 : coût >10M€	4 : coût <500K€
<b>D – Conformité</b> Quel est le cadre applicable ?	<b>Conformité juridique</b>	Le cas d'usage respecte-t-il les lois et les réglementations en vigueur (protection des données, cybersécurité, propriété intellectuelle, etc.) ? <i>! Une fois le cas d'usage à tester identifié, importance ensuite de définir les KPI de succès de ce cas d'usage</i>	1 : Non, des obstacles juridiques majeurs	4 : Oui, le cadre juridique est clair et favorable
	<b>Conformité réglementaire</b>	Le cas d'usage est-il conforme aux normes sectorielles et aux réglementations applicables (finance, santé, défense, etc.) ?	1 : Non, des obstacles réglementaires majeurs	4 : Oui, pas de contrainte réglementaire
<b>Si fort potentiel du cas d'usage</b>	<b>Budget sécurisé</b>	Suivant la criticité et le coût estimé, un budget est-il sécurisé pour mettre en œuvre le cas d'usage ?	1 : Aucun budget prévu	4 : budget sécurisé et engagé

Source : Enquête Le Lab Quantique et Bain &amp; Company (Janvier - Mai 2025)

## A. IMPACT BUSINESS / CRITICITÉ

### ROI attendu

Le retour sur investissement attendu est un critère fondamental pour prioriser les cas d'usage. Il s'agit d'évaluer l'impact économique potentiel : baisse de coûts, augmentation de revenus ou amélioration mesurable de la performance. Un ROI élevé ne garantit pas la faisabilité, mais justifie un intérêt renforcé pour explorer la piste quantique. En outre, il peut aussi aider à prioriser les cas d'usage dans un portefeuille, en fonction de leur capacité à créer un impact mesurable.

### Avantage concurrentiel

Ce critère mesure la capacité du cas d'usage à générer un différentiel stratégique durable (amélioration de l'offre, délai d'exécution imbattable ou qualité inaccessible aux concurrents). Un cas d'usage qui permettrait de dépasser les limites actuelles du marché ou d'acquérir un avantage non reproductible à court terme est prioritaire.

## B. COMPLEXITÉ COMPUTATIONNELLE

### Complexité

Un problème difficile ou impossible à résoudre avec les outils classiques est un bon candidat pour le quantique. Ce critère sert à identifier les goulots d'étranglement computationnels qui justifient le recours à une technologie de rupture. Plus la complexité est structurelle, plus le recours à une approche quantique peut se justifier.

### Algorithme Quantique

L'existence d'un algorithme quantique pertinent est un prérequis à toute expérimentation sérieuse. Ce critère distingue les cas pour lesquels une solution théorique est connue de ceux qui relèvent encore de la recherche fondamentale. Plus l'algorithme est spécifique, documenté et testé sur des problèmes analogues, plus le cas est mûr pour un développement opérationnel. À l'inverse, l'absence d'algorithme connu place le cas d'usage dans une logique de recherche exploratoire à plus long terme.

### Gain par rapport aux approches classiques

Ce critère évalue non seulement la faisabilité, mais surtout la pertinence du recours au quantique. Il s'agit d'estimer si l'approche quantique permettrait un saut significatif – en temps de calcul, en précision, en qualité de solution ou en capacité à traiter des problèmes à grande échelle – par rapport aux meilleures méthodes traditionnelles. Plus l'écart est marqué, plus l'intérêt stratégique et technologique du cas d'usage est renforcé.

## C. FAISABILITÉ TECHNOLOGIQUE

### Source de données

La disponibilité, l'accessibilité et la qualité des données nécessaires sont des conditions essentielles pour initier un cas d'usage quantique. Ce critère examine si les sources de données existent, si elles sont exploitables dans un cadre expérimental et si elles répondent aux exigences du problème visé. En effet, des données lacunaires, incomplètes, sensibles ou dispersées peuvent freiner l'expérimentation, même en présence d'un algorithme et d'un problème bien définis.

### Quantité de données

Certains algorithmes quantiques, notamment ceux exploitables sur les machines NISQ actuelles, fonctionnent avec une quantité relativement restreinte de données en entrée.

Ce critère permet d'évaluer si le cas d'usage est compatible avec ces contraintes de volumétrie, sans nécessiter d'importantes transformations ou agrégations préalables. Un cas mobilisant un faible volume de données bien structurées sera plus facile à tester rapidement en environnement contrôlé.

### **Compatibilité NISQ/FTQC**

Ce critère détermine si le cas d'usage peut être exploré avec les machines quantiques actuelles — dites NISQ, encore limitées et sujettes au bruit — ou s'il nécessite une plateforme tolérante aux pannes (FTQC), capable de corriger les erreurs et d'exécuter des algorithmes complexes à grande échelle. Un cas compatible NISQ ouvre la voie à des expérimentations à court terme, tandis qu'un cas dépendant de la FTQC s'inscrit dans un horizon technologique plus lointain, souvent au-delà de cinq à dix ans.

### **Partenaire technologique**

Dans un écosystème encore émergent, s'appuyer sur un acteur spécialisé (startup, laboratoire, fournisseur cloud ou acteur académique) est souvent indispensable pour faire avancer un cas d'usage quantique. Ce critère évalue si un partenaire compétent est déjà identifié, disponible et prêt à s'engager sur le sujet, en apportant son expertise sur les briques technologiques critiques. L'existence d'un tel partenaire accélère considérablement la phase de prototypage ou de preuve de concept.

### **Horizon temporel**

Certains cas d'usage sont abordables à court terme, d'autres à l'horizon de 5 à 10 ans. Ce critère aide à prioriser les sujets réellement exploitables dans les cycles d'innovation actuels de l'entreprise.

### **Coût estimé**

Toute expérimentation quantique, même à un stade exploratoire, doit reposer sur une évaluation budgétaire réaliste. Ce critère permet d'estimer l'ordre de grandeur des ressources nécessaires : développement d'algorithmes, réalisation de POC, mobilisation d'experts internes ou collaboration avec des partenaires technologiques. Un coût trop élevé ou difficile à justifier peut freiner le lancement, tandis qu'un budget clair et cadré facilite la décision et l'obtention d'un premier financement.

## **D. CONFORMITÉ**

### **Conformité juridique**

Ce critère examine si le cas d'usage est aligné avec les cadres légaux existants, notamment en matière de protection des données personnelles (comme le RGPD), de propriété intellectuelle ou de sécurité de l'information. Il permet d'identifier en amont les risques de non-conformité qui pourraient compromettre l'expérimentation ou nécessiter des adaptations spécifiques.

### **Conformité réglementaire**

Au-delà du cadre juridique général, certains secteurs, comme la santé, la finance, l'énergie ou l'aéronautique, sont soumis à des réglementations techniques ou normatives spécifiques (qualité, sécurité, traçabilité, certification). Ce critère permet d'évaluer si le cas d'usage envisagé est compatible avec ces exigences ou s'il pourrait rencontrer des obstacles réglementaires. Il aide à anticiper d'éventuels aménagements ou validations nécessaires avant déploiement.



## PARTIE 5

# Le quantique en France : un écosystème riche et dynamique à défendre

Il serait impossible d'aborder le sujet du calcul quantique sans souligner la **position singulière de la France** dans cet écosystème en pleine structuration. Sur ce terrain technologique de rupture, la France peut légitimement revendiquer une **ambition compétitive** et nourrir des **espoirs concrets de souveraineté technologique**.

Le pays dispose d'un écosystème d'acteurs pionniers, couvrant l'ensemble des grandes approches technologiques du quantique : **Pasqal** pour les atomes neutres, **Alice & Bob** pour les supraconducteurs et **Quandela** pour la photonique. Ces startups, à la fois issues de la recherche académique d'excellence et déjà reconnues à l'international, incarnent le potentiel français. L'acquisition récente d'une machine Pasqal par **Aramco**, géant de l'énergie saoudien, témoigne de leur crédibilité industrielle sur la scène mondiale.

Également, plus d'une **quinzaine de grandes entreprises françaises** ont déjà engagé des expérimentations concrètes avec des algorithmes ou des machines quantiques, dans des secteurs aussi variés que la finance, l'énergie ou la Défense.

Ce dynamisme est soutenu par une **politique publique structurante**, qui a su poser les bases d'un écosystème cohérent. Des initiatives comme **BACQ** (Benchmark Applicatif des Calculateurs Quantiques), **ProQCima** (expérimentation collaborative de cas d'usage quantique en contexte industriel) ou encore le programme **France 2030** mobilisent **plusieurs centaines de millions d'euros** pour faire émerger des leaders technologiques européens. La France y joue un rôle moteur. Ce mouvement est également porté par des **fonds privés spécialisés**, tels que **Quantonation**, **Elaia** ou encore **Supernova Invest**, fonds de capital-risque en partie dédiés aux technologies quantiques, qui accompagnent activement les startup du secteur.

Mais l'ambition seule ne suffit pas. Si la France veut non seulement participer, mais **peser durablement dans la course mondiale au quantique**, un soutien actif des **industriels** est indispensable. Il s'agit de **mobiliser des budgets significatifs**, de **soutenir les startups nationales** par des partenariats stratégiques et de s'impliquer dès maintenant dans l'exploration des cas d'usage concrets.

Les États-Unis bénéficient d'un écosystème privé-public extrêmement puissant, capable de financer à très grande échelle des projets quantiques. Attendre reviendrait à **laisser passer le moment stratégique** où les positions d'influence se dessinent. À l'inverse, s'engager dès aujourd'hui, c'est **préserver la possibilité d'une autonomie technologique future**, qu'elle soit française ou, à défaut, européenne.

## Conclusion

En définitive, le quantique n'est plus un pari lointain ni une promesse abstraite : il se concrétise rapidement. Chaque mois apporte son lot d'annonces, de démonstrations et de percées techniques. Les publications et dévoilements des constructeurs se font toujours plus réguliers. Le calendrier s'accélère, les seuils de faisabilité sont franchis et les ambitions industrielles se déploient à grande vitesse. Dans ce contexte, le véritable risque pour les entreprises n'est plus celui de l'inconnu, mais celui du retard. Le *cliff effect* (« effet falaise »), ce point de bascule où l'écart devient irrattrapable, menace celles et ceux qui tarderaient à se mobiliser.

Aussi, c'est maintenant qu'il faut enclencher un véritable travail de fond : installer une veille technologique robuste, lancer des expérimentations ciblées, explorer des cas d'usage alignés avec la stratégie métier, bâtir des équipes transverses capables de faire le lien entre science et opérationnel, attirer et former les talents qui feront la différence demain. Le quantique ne s'improvise pas : il se construit pas à pas et ce, dès aujourd'hui.

À l'image de celles qui ont manqué le virage de l'intelligence artificielle, certaines entreprises risquent de devenir spectatrices d'une révolution qu'elles n'auraient ni anticipée ni préparée. Attendre la maturité des technologies, différer les investissements ou sous-estimer l'ampleur du changement suffira à se faire distancer durablement. Le quantique suit une trajectoire similaire : il impose dès maintenant un cap stratégique clair. Comprendre ses mécanismes, expérimenter ses cas d'usage, structurer des compétences dédiées, tout cela constitue non plus une option, mais une nécessité pour transformer l'inconnu en levier de performance.

## Méthodologie

Ce Livre Blanc repose sur une démarche structurée, menée en plusieurs étapes complémentaires.

Il a d'abord été initié par une **série d'échanges approfondis** avec les principaux **acteurs de l'écosystème quantique** : des **experts reconnus** (Le Lab Quantique, Olivier Ezratty), des **représentants de l'État** impliqués dans la stratégie nationale (Loïc Le Loarer), des **constructeurs de processeurs** (Alice & Bob, Pasqal), ainsi que des **investisseurs spécialisés** comme Bpifrance et Quantonation. Cette première phase a permis de cadrer les enjeux technologiques et de poser un socle de compréhension solide.

Sur cette base, plusieurs **outils ont été développés** : un **index de maturité** technologique, une **grille d'analyse des cas d'usage**, et une **feuille de route** d'adoption. Ces outils ont ensuite été testés auprès d'entreprises du CAC 40 issues de secteurs variés (finance, énergie, chimie, automobile, paiements), afin de **valider leur pertinence**, d'identifier les points de friction et de **cartographier le niveau de préparation** réel du tissu économique.

L'ensemble de la démarche a ensuite été challengé et enrichi par un **Sounding Board** pluridisciplinaire, réunissant experts techniques, industriels, chercheurs et investisseurs, garantissant ainsi la robustesse et la crédibilité des conclusions présentées dans ce document.



## Annexes

### La chaîne de valeur

La chaîne de valeur complète du calcul quantique, depuis les technologies fondamentales jusqu'aux usages concrets dans les entreprises, peut se structurer en quatre grandes catégories interconnectées :

- **Technologies habilitantes** : les briques matérielles essentielles qui permettent le développement des ordinateurs quantiques ;
- **Systèmes de calcul quantique** : les différentes architectures matérielles de calcul quantique, ainsi que les systèmes hybrides et inspirés du quantique (*détaillés dans la section suivante*) ;
- **Outils de développement logiciel quantique** : les outils nécessaires à la programmation, la compilation et l'optimisation des algorithmes quantiques ;
- **Industries utilisatrices** : les secteurs industriels déjà engagés dans l'exploration des applications du calcul quantique ;
- Les **approches technologiques** principales utilisées en informatique quantique.

L'informatique quantique repose sur plusieurs approches technologiques, chacune ayant ses avantages et inconvénients en termes de scalabilité, de robustesse et d'applications industrielles potentielles. Les architectures se divisent principalement en deux catégories : le calcul quantique universel (basé sur des portes logiques) et le calcul quantique analogique.

### Approches sur du matériel classique et calcul quantique analogique

Les approches classiques (réseaux de tenseurs et émulateurs quantiques) et le calcul quantique analogique reposent sur la simulation de systèmes quantiques pour résoudre des problèmes spécifiques, sans recourir à une architecture à portes logiques. On distingue deux grandes catégories de calcul quantique analogique : les simulateurs quantiques analogiques et les ordinateurs de recuit quantiques.

#### Calcul inspiré du quantique (réseaux de tenseurs)

Les réseaux de tenseurs relèvent d'une **approche de calcul classique, exécutée sur du matériel classique**, mais s'inspirent de principes issus de la physique quantique pour optimiser le traitement de l'information classique. Contrairement aux émulateurs quantiques, qui cherchent à reproduire fidèlement le comportement d'un circuit quantique sur un ordinateur classique, ces méthodes n'exécutent pas de code quantique, mais des structures mathématiques appelées **réseaux de tenseurs**, qui permettent de représenter et de manipuler efficacement des systèmes complexes. Les deux piliers de ce calcul inspiré du quantique sont la représentation en MPS (Matrix Product States), permettant de décrire efficacement des états quantiques faiblement intriqués, et l'algorithme DMRG (Density Matrix Renormalization Group), qui exploite cette représentation pour calculer les états fondamentaux de systèmes complexes.

Le calcul inspiré du quantique **contribue déjà à développer de nouvelles méthodes d'appréhension du calcul classique** et est utilisé dans plusieurs domaines, notamment en physique statistique, en chimie computationnelle ou dans le développement d'algorithmes hybrides.

Aujourd'hui, plusieurs entreprises utilisent ces méthodes de calculs à l'instar d'IBM<sup>1</sup> ou encore de **Multiverse Computing**<sup>2</sup>.

### Les émulateurs quantiques (basés sur logiciel)

Les émulateurs quantiques sont parfois appelés **simulateurs quantiques classiques**, mais diffèrent des simulateurs quantiques analogiques, qui utilisent du matériel quantique. Ce sont des algorithmes classiques qui reposent sur des calculs de grandes matrices et de vecteurs et qui imitent le comportement des systèmes quantiques. Ils ne nécessitent pas de matériel quantique et utilisent des ordinateurs classiques ou des supercalculateurs<sup>3</sup>.

L'émulation d'ordinateurs quantiques nécessite une puissance de calcul très élevée, à la fois en mémoire (pour stocker les  $2^N$  états du registre quantique pour  $N$  qubits) et en puissance de traitement, car elle repose sur des multiplications de matrices. Bien que **limitée par l'explosion exponentielle des ressources nécessaires**, l'émulation permet de valider certaines approches et d'explorer des algorithmes avant leur implémentation sur du matériel quantique. Ces simulateurs sont utilisés en physique théorique et en développement d'algorithmes quantiques, avec des outils tels que **QuTiP**<sup>4</sup> (développé par la communauté académique, en open source), **Qiskit Aer**<sup>5</sup> (IBM) et **Cirq**<sup>6</sup> (Google).

### Les simulateurs quantiques analogiques (basés sur du matériel quantique)

Il s'agit de systèmes expérimentaux qui utilisent des **systèmes quantiques bien contrôlés, tels que des atomes ultra froids ou des circuits supraconducteurs**, pour reproduire des phénomènes complexes et simuler des matériaux ou des réactions chimiques. Contrairement aux ordinateurs quantiques universels, ils ne sont **pas reprogrammables de manière arbitraire** mais sont conçus pour résoudre des classes spécifiques de problèmes physiques (ex : condensation de gaz de Bose-Einstein, ions piégés, réseaux d'atomes froids, etc.)<sup>7</sup>.

Aujourd'hui, plusieurs entreprises développent des simulateurs quantiques analogiques, les plus avancées étant **Pasqal**<sup>8</sup> et **QuEra**<sup>9</sup> qui exploitent des atomes neutres pour leurs plateformes de simulation.

### Les ordinateurs à recuit quantique (quantum annealers)

Les ordinateurs de recuit quantiques exploitent un processus appelé recuit quantique pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire. Ils utilisent **l'effet tunnel quantique et la superposition d'états** pour explorer efficacement un espace de solutions et converger vers un minimum global d'énergie. Contrairement aux ordinateurs quantiques universels, ils sont spécialisés dans les problèmes d'optimisation et ne permettent pas d'exécuter des algorithmes quantiques généraux.

---

1- <https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/PhysRevResearch.6.013326>

2- <https://multiversecomputing.com/product?view=media>

3- Eviden's presentation of the emulator Qaptiva <https://eviden.com/wp-content/uploads/2024/10/Eviden-Quantum-Emulation-and-Qubits-PDF-EN.pdf>

4- <https://qutip.org/>

5- <https://www.ibm.com/quantum/qiskit>

6- <https://quantumai.google/cirq>

7- Georgescu, I. M., Ashhab, S., & Nori, F. (2014). *Quantum simulation*. Reviews of Modern Physics <https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.86.153>

8- <https://www.pasqal.com/>

9- <https://www.quera.com/>

De nombreux problèmes peuvent être traduits en problèmes de recuit quantique à l'aide des formulations QUBO (Quadratic Unconstrained Binary Optimization) ou Ising. L'entreprise **D-Wave**<sup>1</sup> est la plus présente sur cette technologie et a démontré des gains en temps de calcul par rapport aux ordinateurs classiques dans des applications industrielles comme la logistique, la finance et la conception de circuits.

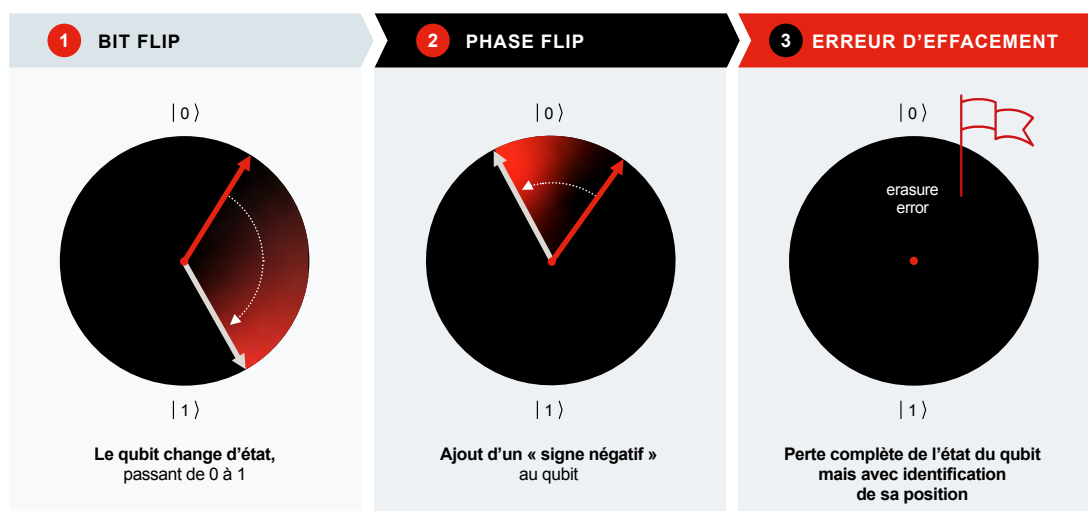
## Le calcul quantique universel (basé sur des portes logiques)

L'informatique quantique basée sur les portes (**gate-based quantum computing**) est le principal modèle d'informatique quantique. Elle repose sur des qubits et des séries finies de portes quantiques agissant sur des qubits individuels ou sur des groupes de deux ou trois qubits. Le qubit possède trois propriétés clés : (i) la **superposition**, qui lui permet d'exister dans plusieurs états quantiques simultanément ; (ii) l'**intrication**, un lien entre plusieurs particules quantiques les rendant indissociables (indescriptibles de façon indépendante) même à distance, et (iii) l'**observation**, qui révèle l'état du qubit mais provoque l'effondrement du système, annulant superposition et intrication<sup>2</sup>.

Les **qubits physiques** sont basés soit sur des objets quantiques massifs (comme les électrons, les atomes contrôlés ou les courants supraconducteurs), soit sur des objets quantiques non massifs (comme les photons). Ces qubits exploitent certaines de leurs propriétés quantiques, telles que le spin pour les électrons, le niveau d'énergie pour les atomes, la direction du courant ou de la phase et la polarisation pour les photons<sup>3</sup>.

L'une des problématiques touchant les qubits physiques est leur sensibilité aux éléments extérieurs, au « **bruit** ». On dénombre trois types d'erreurs majeures affectant les qubits. La première est le **bit flip**, qui correspond à une inversion de l'état d'un qubit (passant de  $|0\rangle$  à  $|1\rangle$  ou inversement) comme une erreur binaire classique. La seconde est le **phase flip**, où le

**Figure 12 :** Présentation des 3 types d'erreurs affectant les qubits



Source : Olivier Ezratty, *Comprendre l'informatique quantique*, édition 2018.

1- <https://www.dwavequantum.com/>

2- CEA (2024). *Etude prospective sur les impacts du calcul quantique en 2042*. [https://yspot.fr/wp-content/uploads/2024/04/rapport-public\\_quantum2042\\_numerique\\_avril2024.pdf](https://yspot.fr/wp-content/uploads/2024/04/rapport-public_quantum2042_numerique_avril2024.pdf)

3- Ezratty O. (2024). *Understanding Quantum Technologies 2024*. Ebook gratuit : <https://www.oezratty.net/wordpress/telecharger/publications/>

qubit conserve son état mais voit sa phase quantique inversée, ce qui perturbe les interférences et donc le résultat du calcul. Enfin, l'**erreur d'effacement** correspond à la perte complète de l'information portée par le qubit, généralement due à une interaction trop forte avec l'environnement ou à une défaillance matérielle.

Néanmoins, il existe des procédés permettant d'améliorer leur fidélité. La formation d'un **qubit logique** en fait partie. Un **qubit logique** est une unité d'information quantique obtenue en combinant plusieurs qubits physiques à l'aide de **codes de correction d'erreurs**, permettant de compenser les instabilités et les erreurs de décohérence inhérentes au matériel quantique. Les **codes les plus simples**, comme le code de répétition ou le **code de Shor**, permettent de corriger certaines erreurs spécifiques (bit flip ou phase flip), mais restent limités. D'autres, comme le **code de Steane** ou le **code de surface**, offrent une correction plus complète et plus scalable, en particulier dans les architectures expérimentales actuelles. Des approches plus récentes, comme le **code Hastings-Haah**, visent à réduire les coûts en ressources, notamment dans le contexte des qubits topologiques.

Aujourd'hui, l'informatique quantique en est encore à un stade intermédiaire, qualifié d'ère **NISQ (noisy intermediate-scale quantum)**. Cette phase correspond aux processeurs quantiques actuels, qui possèdent quelques dizaines à quelques centaines de qubits physiques et qui restent sensibles au bruit et incapables de corriger les erreurs de manière efficace. À ce jour, les processeurs quantiques NISQ ne présentent donc pas d'avantage computationnel clair sur les approches classiques. Ainsi, bien que le NISQ permette d'explorer de nouvelles approches et d'améliorer la compréhension des systèmes quantiques, il ne constitue pas encore une rupture technologique en termes de performances pour des applications industrielles à grande échelle.

L'objectif est d'atteindre l'**informatique quantique tolérante aux pannes (FTQC, fault tolerant quantum computing)**, où des qubits logiques corrigés permettront d'exécuter des algorithmes complexes avec un plus grand nombre de portes quantiques. Pour cela, il faudra des millions de qubits physiques, des architectures optimisées et des codes de correction d'erreurs et d'atténuation d'erreurs avancés. Cette transition marquera le passage d'une informatique quantique expérimentale à une informatique quantique réellement utile et scalable pour les grandes entreprises.

## Les qubits supraconducteurs

La technologie des qubits supraconducteurs compte parmi les approches de qubits les plus avancées. Elle s'appuie sur des circuits électriques refroidis à des températures extrêmement basses (proches du zéro absolu), où certains matériaux deviennent supraconducteurs. Dans cet état, les électrons ne circulent plus individuellement mais forment des **paires de Cooper**, qui se déplacent sans résistance électrique grâce à un phénomène quantique appelé condensation de Bose-Einstein. Le cœur de ces circuits est la **jonction Josephson**, un composant clé qui permet aux paires de Cooper de traverser une fine barrière isolante par effet tunnel, créant ainsi des superpositions et des interférences quantiques contrôlables. En ajustant des signaux micro-ondes, il est possible de manipuler ces états quantiques pour effectuer des opérations logiques.

Cette technologie est **l'une des plus avancées aujourd'hui** grâce à sa rapidité d'exécution et sa compatibilité avec les techniques de fabrication de circuits électroniques. Toutefois, les qubits supraconducteurs sont **extrêmement sensibles aux perturbations**, ce qui impose un refroidissement à des températures proches du zéro absolu pour éviter toute perte d'information.

## Acteurs clés

### IBM

IBM, aujourd'hui **leader mondial dans le domaine de l'informatique quantique**, est l'un des rares grands acteurs du monde de l'informatique à investir depuis très longtemps dans la recherche fondamentale en calcul quantique. Le nombre de qubits d'IBM a augmenté régulièrement, passant de 5 en 2016 (modèle Canary) à 156 en 2024 (modèle Heron r2). En parallèle de ses **innovations technologiques**, IBM a commencé le déploiement commercial de ces solutions dès 2016 avec le lancement de son **offre quantique sur le cloud**, permettant ainsi à des milliers de chercheurs, étudiants, startups et entreprises d'avoir accès aux systèmes quantiques. La **communauté IBM Quantum Network** compte aujourd'hui plus de 250 organisations à travers le monde et plus de 600 000 utilisateurs<sup>1</sup>. Enfin, d'un point de vue **scientifique**, IBM communique régulièrement sur sa feuille de route d'ordinateur quantique, respectant ses jalons prévus, et fournit un flux constant de publications de recherche mettant en avant ses contributions.

### Google

Google a commencé à investir dans l'informatique quantique au milieu des années 2010, d'abord sur l'usage des ordinateurs à recuit quantique de D-Wave puis, très rapidement, sur la création d'ordinateurs quantiques expérimentaux basés sur des qubits supraconducteurs. Contrairement à IBM, Google communique plus ponctuellement sur ses avancées en informatique quantique, choisissant de les annoncer à des moments stratégiques plutôt que de publier des mises à jour régulières sur sa feuille de route. En décembre 2024, l'entreprise a dévoilé Willow, son processeur quantique de dernière génération intégrant 105 qubits supraconducteurs<sup>2</sup>.

### Rigetti

Rigetti est un acteur américain qui développe depuis plusieurs années des processeurs basés sur des qubits supraconducteurs. L'entreprise mise sur une approche verticalement intégrée, combinant conception matérielle et algorithmique. Depuis quelques mois, elle communique régulièrement sur ses avancées. En janvier 2025, l'entreprise a dévoilé Ankaa-3<sup>3</sup>, un processeur intégrant une nouvelle architecture matérielle qui lui permet d'atteindre une plus grande fidélité sur les portes à deux qubits. Deux mois plus tard, Rigetti annonçait un partenariat stratégique avec Quanta Computer, soutenu par un investissement de 100 millions de dollars sur cinq ans, visant à accélérer la montée en puissance industrielle de sa technologie.

### IQM

Fondée en 2018 en Finlande, IQM est un spin-off de l'université d'Aalto et du centre de recherche VTT, spécialisé dans les qubits supraconducteurs. L'entreprise développe ses propres processeurs quantiques et a introduit en 2022 le qubit « unimon » (qubit plus stable grâce à sa géométrie simplifiée), capable d'atteindre plus de 99 % de fidélité sur les portes à deux qubits. Par ailleurs, IQM, dans sa feuille de route stratégique, annonce pouvoir atteindre une capacité de plusieurs centaines de qubits logiques d'ici 2030<sup>4</sup>.

### Alice & Bob

Alice & Bob, startup française fondée en 2020, se distingue dans le domaine de l'informatique quantique par le développement de qubits dits « de chat ». Ces qubits possèdent la capacité intrinsèque de supprimer l'un des deux types d'erreurs affectant habituellement les processeurs quantiques (diminution des bit flip), simplifiant ainsi la conception d'ordinateurs quantiques tolérants aux fautes. En ce qui concerne sa communication, l'entreprise affiche une feuille de route précise qui doit l'amener en 2030 vers une capacité de 100 qubits logiques<sup>5</sup> et un taux d'erreur de  $10^{-6}$ . Alice & Bob fait état en janvier 2025 d'une levée de 100 millions d'euros.

---

1- <https://www.ibm.com/quantum/community>

2- <https://blog.google/technology/research/google-willow-quantum-chip/>

3- <https://investors.rigetti.com/news-releases/news-release-details/rigetti-computing-launches-84-qubit-ankaatm-3-system-achieves>

4- <https://meetiqm.com/technology/roadmap/>

5- <https://alice-bob.com/roadmap/>

### Amazon

Amazon, géant américain de la tech, a commencé à investir et à communiquer sur le quantique plus régulièrement depuis 2019 avec le lancement d'Amazon Braket. Ce service cloud offre aux chercheurs et aux développeurs un accès à divers ordinateurs quantiques et simulateurs. Par ailleurs, Amazon développe des processeurs quantiques et a annoncé en février 2025 son outil Ocelot<sup>1</sup>. Ce prototype vise à améliorer la correction d'erreurs quantiques, un défi majeur pour rendre les ordinateurs quantiques fiables.

## Les qubits de spin

Les qubits de spin utilisent une propriété quantique fondamentale des particules élémentaires : le spin, une forme de moment angulaire intrinsèque. Cette technologie exploite le spin d'électrons (ou parfois de noyaux) confinés dans des matériaux semi-conducteurs, comme le silicium, pour stocker et manipuler l'information quantique. Ces particules sont piégées dans des structures nanométriques appelées boîtes quantiques ou intégrées dans des atomes dopants ou des défauts cristallins.

Chaque qubit est encodé dans deux orientations possibles du spin (haut ou bas), qui peuvent être contrôlées avec une grande précision à l'aide de champs magnétiques, de micro-ondes ou de pulses électriques. La lecture du qubit repose sur des méthodes sensibles de détection du spin ou de son effet sur l'environnement proche.

Grâce à leur taille très réduite et à leur compatibilité avec les procédés de fabrication classiques des semi-conducteurs, les qubits de spin sont bien adaptés à une intégration à grande échelle. Ils bénéficient également de bons temps de cohérence, en particulier dans les versions utilisant le spin nucléaire. Le principal défi reste le contrôle précis des interactions entre qubits, nécessaire pour réaliser des opérations logiques complexes dans des architectures à plusieurs qubits.

### Acteurs clés

#### Quobly

Issue des travaux du CEA-Leti et du CNRS, Quobly est une entreprise française fondée en 2022 à Grenoble, spécialisée dans le développement d'ordinateurs quantiques basés sur la technologie des qubits de spin en silicium. Cette approche exploite des électrons confinés dans des boîtes quantiques, intégrés sur des puces FD-SOI (Fully Depleted Silicon On Insulator), une technologie éprouvée de l'industrie des semi-conducteurs. L'entreprise, qui est d'ailleurs assez active dans la recherche et publie régulièrement des papiers sur le quantique, prévoit d'avoir construit pour 2031 un ordinateur d'un million de qubits physiques.<sup>2</sup>

#### Intel

Intel, pionnier de la microélectronique, développe depuis plusieurs années des ordinateurs quantiques basés sur la technologie des qubits de spin en silicium. En 2023, l'entreprise a lancé Tunnel Falls, une puce de 12 qubits destinée à la recherche, et vise la production en masse de processeurs tolérants aux fautes d'ici le début des années 2030.<sup>3</sup>

---

1- <https://www.aboutamazon.com/news/aws/quantum-computing-aws-ocelot-chip>

2- <https://www.usine-digitale.fr/article/la-pepite-francaise-quobly-veut-atteindre-le-million-de-qubits-des-2031-N2224150>

3- <https://www.intel.com/content/www/us/en/research/quantum-computing.html>



## Les ions piégés

Contrairement aux qubits supraconducteurs, qui reposent sur des circuits électriques refroidis à des températures extrêmes, les qubits à ions piégés exploitent **des atomes ionisés (ions), c'est-à-dire ayant perdu un ou plusieurs électrons** pour stocker et manipuler l'information quantique. Ces ions sont suspendus dans le vide à l'aide d'un champ électrique, les maintenant isolés des perturbations extérieures dans des pièges spécifiques assurant une grande stabilité.

Chaque ion peut stocker un qubit en exploitant ses **niveaux d'énergie électroniques**. Les manipulations quantiques sont réalisées à l'aide de lasers qui modifient ces niveaux d'énergie ou bien des combinaisons de tensions, radiofréquences et champs micro-ondes. Lorsque plusieurs ions sont alignés, ils interagissent naturellement grâce aux forces électriques, permettant ainsi de les intriquer et d'exécuter des opérations quantiques.

Les qubits à ions piégés offrent un **contrôle précis et stable**, avec une **longue durée de cohérence**. Cependant, cette technologie présente des limites : les opérations quantiques sont **plus lentes** que celles des qubits supraconducteurs et leur **mise à l'échelle est complexe**, car manipuler un grand nombre d'ions de manière cohérente devient techniquement difficile.

### Acteurs clés

#### IonQ

Issue des travaux de l'université du Maryland et de Duke University, IonQ est une entreprise fondée en 2015 qui développe des ordinateurs quantiques basés sur la technologie des ions piégés. Ces derniers sont manipulés par des impulsions laser dans un vide ultrafroid, chaque ion jouant le rôle d'un qubit stable et fidèle. Assez active depuis plusieurs années dans la publication de papiers de recherche, IonQ annonce aussi de nouveaux processeurs quantiques, dont le nombre de qubits physiques augmente peu à peu. Après IonQ Forte, un ordinateur de 36 qubits physiques, la société prépare désormais IonQ Tempo, qui doit atteindre 64 qubits physiques<sup>1</sup>.

#### Quantinuum

Quantinuum, née en 2021 de la fusion entre Honeywell Quantum Solutions et Cambridge Quantum Computing, développe des ordinateurs quantiques à ions piégés, où des ions sont confinés et contrôlés avec une extrême précision dans des pièges électromagnétiques, puis manipulés par des impulsions laser pour effectuer des opérations quantiques avec une très haute fidélité. L'entreprise déploie une stratégie de communication portée par une feuille de route technologique qui trace une trajectoire structurée jusqu'en 2030<sup>2</sup>. Dans cette perspective, Quantinuum annonce viser, dès 2029, l'atteinte de plusieurs centaines de qubits logiques, marquant une étape clé vers des applications industrielles exploitables du calcul quantique tolérant aux fautes.

---

1- <https://ionq.com/quantum-systems/compare>

2- <https://www.quantinuum.com/press-releases/quantinuum-unveils-accelerated-roadmap-to-achieve-universal-fault-tolerant-quantum-computing-by-2030>

## Les qubits photoniques

Les qubits photoniques représentent une approche unique en informatique quantique, où l'information est portée non pas par des objets massiques (comme les circuits électriques ou les atomes), mais par des **photons individuels**. Ces particules de lumière ont l'avantage d'être naturellement rapides, robustes et insensibles aux perturbations électromagnétiques, ce qui leur permet de fonctionner à température ambiante.

Les qubits photoniques exploitent **la polarisation, la phase ou le nombre de photons** pour encoder l'information. Pour manipuler un qubit photonique, on utilise des composants optiques tels que des diviseurs de faisceau, des filtres et des modulateurs, qui permettent de créer des superpositions et d'intriquer plusieurs qubits entre eux. Après le calcul, la lecture du qubit est réalisée en détectant la présence ou l'état du photon à l'aide de capteurs spécialisés, capables d'analyser son comportement sans le détruire.

Les qubits photoniques sont particulièrement adaptés aux applications en communications quantiques, car ils peuvent transporter l'information sur de longues distances via des fibres optiques. Cependant, leur utilisation pour le calcul quantique reste un défi. Réaliser des portes logiques efficaces et gérer plusieurs photons de manière cohérente sont des obstacles techniques majeurs, ce qui rend leur mise à l'échelle difficile.

### Acteurs clés

#### PsiQuantum

PsiQuantum, acteur américain fondé en 2016, cherche à développer un ordinateur quantique photonique tolérant aux fautes, en misant sur des photons comme qubits. La société communique avec régularité sur ses avancées et exposait en février 2025 la sortie d'Omega, la première puce photonique intégrant des interconnexions quantiques longue distance avec une fidélité de 99,72. Bien que la société n'ait pas donné de date précise, elle aspire à construire un système modulaire de plus d'un million de qubits physiques<sup>1</sup>, capable de générer 100 qubits logiques, une architecture dans laquelle les qubits sont répartis sur plusieurs puces interconnectées, permettant ainsi de faire évoluer la puissance de calcul en ajoutant progressivement de nouveaux modules.

#### Xanadu

Née au Canada en 2016, Xanadu développe des ordinateurs quantiques basés sur une approche photonique. Même si Xanadu a été plus discrète que certains de ses concurrents sur les annonces quantiques ou sa feuille de route, elle a dévoilé récemment un nouveau prototype d'ordinateur quantique universel et photonique, Aurora<sup>2</sup>, mais peu d'informations sur le nombre de qubits, qu'ils soient physiques ou logiques, ou sur la fidélité ont été dévoilés.

#### Quandela

Quandela, startup française fondée en 2017, développe des ordinateurs quantiques universels basés sur une architecture photonique. Elle maîtrise l'ensemble de la chaîne technologique, des sources de photons uniques à la programmation via sa plateforme Perceval. En 2023, elle a lancé MosaiQ, son premier processeur accessible en cloud. Quandela mise sur une approche modulaire et participe à plusieurs initiatives européennes, notamment dans le cadre de France 2030.

---

1- <https://www.psiquantum.com/blueprint>

2- <https://www.xanadu.ai/blog/lighting-up-the-quantum-computing-horizon-with-aurora>

## Les qubits topologiques

Les qubits topologiques reposent sur des **quasi-particules appelées anyons**, qui émergent dans certains matériaux sous des conditions spécifiques. Contrairement aux qubits classiques, dont l'état est facilement perturbé par l'environnement, les anyons possèdent une protection naturelle : leur état quantique ne dépend pas d'une mesure locale, mais de la manière dont ils ont été déplacés les uns par rapport aux autres (ou « tressés ») dans l'espace et le temps.

Pour renforcer cette stabilité, les chercheurs manipulent leur structure et les entourent de composés chimiques spécifiques, qui limitent les interférences extérieures. Les opérations quantiques ne se font pas en appliquant directement un signal comme sur d'autres types de qubits, mais par le **procédé de tressage** : les anyons sont déplacés selon des chemins précis et l'information quantique est encodée dans ces mouvements.

Les qubits topologiques représentent une approche innovante visant à rendre l'informatique quantique plus stable et résistante aux erreurs. Cette approche pourrait permettre d'exécuter des calculs plus fiables, mais elle reste encore **hautement expérimentale**, car la création et le contrôle des anyons dans des conditions réelles sont des défis technologiques majeurs.

### Acteurs clés

#### Microsoft

Microsoft investit fortement dans l'informatique quantique en misant sur une approche unique : les qubits topologiques. Contrairement aux qubits supraconducteurs ou à ions piégés, cette technologie repose sur des particules de Majorana, dont les propriétés intrinsèques offrent une résistance accrue aux erreurs, réduisant ainsi le besoin de correction active. Ainsi, en février 2025, Microsoft a dévoilé Majorana 1<sup>1</sup>, son premier processeur quantique exploitant une architecture à cœur topologique. Néanmoins, peu de détails sont donnés quant aux indicateurs de performance habituels des ordinateurs quantiques (nombre de qubits physiques/logiques, fiabilité sur les portes à deux qubits, etc.).

## Les atomes neutres

Les qubits à atomes neutres utilisent des **atomes refroidis à des températures extrêmement basses** et immobilisés dans le vide grâce à des **pièges optiques**, créés par des faisceaux laser. Contrairement aux ions piégés, ces atomes ne portent pas de charge électrique, ce qui permet de les organiser en réseaux denses sans répulsion électrostatique.

Les qubits sont encodés dans les **niveaux d'énergie électronique des atomes** et les opérations quantiques sont effectuées en manipulant les atomes piégés à l'aide d'impulsions laser, exploitant des interactions de type **Rydberg**. Ce phénomène consiste à exciter un atome à un niveau d'énergie plus élevé, éloignant ainsi temporairement son électron de son noyau. Cela renforce fortement les interactions avec les atomes voisins et permet de contrôler les couplages entre qubits pour exécuter des opérations logiques quantiques. Les interactions de type Rydberg permettent donc d'activer ou de désactiver les couplages entre atomes, ce qui est la clé pour exécuter des portes logiques.

---

1- <https://news.microsoft.com/azure-quantum/>

Parmi les différentes technologies de qubits, les qubits à atomes neutres se distinguent par leur manipulation sans contact et leur capacité à former des réseaux ordonnés et flexibles. Le contrôle des interactions via les états Rydberg réduit les erreurs et permet une bonne **scalabilité**, avec des milliers d'atomes piégés simultanément. Cependant, cette approche requiert une infrastructure laser complexe et coûteuse. La **cohérence quantique** reste limitée par les imperfections des pièges optiques et le taux d'erreur des portes quantiques doit encore être amélioré pour rivaliser avec d'autres technologies.

## Acteurs clés

### Infleqtion

Fondée sous le nom de ColdQuanta en 2007, Infleqtion est une entreprise américaine qui développe des technologies quantiques basées sur la manipulation d'atomes neutres ultra-froids. Même si l'entreprise ne communique pas de feuille de route détaillée à l'horizon 2030, elle maintient un rythme soutenu de publications scientifiques, témoignant d'un engagement actif dans la recherche et le développement quantique. Elle a cependant annoncé espérer atteindre le seuil de 100 qubits logiques d'ici 2028<sup>1</sup>. Par ailleurs, la société adopte une approche transversale, couvrant à la fois le calcul quantique, les capteurs quantiques, les communications sécurisées et des applications pour la Défense.

### Pasqal





Fondée en 2019, Pasqal est une startup française spécialisée dans l'informatique quantique à atomes neutres. En ce qui concerne sa communication, l'entreprise affiche une feuille de route précise et atteindrait le seuil de 100 à 200 qubits logiques avant 2030<sup>2</sup>. En outre, la société est régulièrement sollicitée par des industriels pour travailler des cas d'usage à l'aide de leur technologie. En 2021, CACIB a collaboré avec Pasqal pour évaluer le potentiel du quantique dans la prédiction des Fallen Angels, ces entreprises dont la note de crédit chute en dessous du grade d'investissement. Le projet visait à anticiper ces dégradations sur un horizon de 6 à 15 mois. Les résultats, publiés en 2022, ont mis en évidence l'intérêt du quantique pour améliorer les modèles de prévision financière.

---

1- <https://infleqtion.com/infleqtion-delivers-first-quantum-material-design-application-powered-by-logical-qubits-and-nvidia-cuda-q/>

2- <https://www.pasqal.com/fr/technology/roadmap/>

Figures 13 et 14 : Index de maturité

		NIVEAU 1	NIVEAU 2	NIVEAU 3	NIVEAU 4	NIVEAU 5
<b>Pilotage</b> 	<b>1</b> Maturité de la réflexion	Aucun intérêt ou réflexion informelle	Exploration initiale (veille, conférences, cadrage interne des risques et opportunités)	Premiers jalons d'une feuille de route, incluant l'exploration de cas d'usage (qualification et tests) et l'allocation d'un budget initial dédié	Feuille de route structurée et étude d'impact (risques & opportunités identifiés) et augmentation du budget	Plan d'industrialisation structuré et intégration des technologies quantiques au plan stratégique de l'entreprise avec un financement adapté
	<b>2</b> Qualification de l'impact du calcul quantique	Aucune évaluation d'impact	Évaluation d'impact sur les risques internes cyber et souveraineté (mouvement défensif)	Évaluation des opportunités pour l'entreprise en innovation, développement produit, ingénierie et design, performance opérationnelle, etc. (mouvement offensif)	Évaluation des opportunités et des risques externes liés à la performance des concurrents	Évaluation d'impact sur les dynamiques du marché et les dynamiques concurrentielles (ex. : demande client, nouveaux entrants)
	<b>3</b> Intégration avec les capacités de calcul (incl. les supercalculateurs HPC si utilisés)	Aucun lien établi avec les capacités de calcul existante	Premiers tests de modèles hybrides classique/quantique	Premiers travaux sur l'intégration du quantique dans l'architecture existante (ex. : format de données)	Usage fréquent de l'hybridation classique/quantique	Intégration complète du quantique avec les capacités de calcul existantes
<b>Premiers développements</b> 	<b>4</b> Identification des cas d'usage et de la technologie nécessaire	Pas de cas d'usage identifié	Première identification de cas d'usage potentiels (ainsi que de la technologie et de l'algorithme nécessaires) <u>sans engager les métiers</u> (ex. : Ops, Commercial, etc.)	Identification de cas d'usage potentiels (ainsi que de la technologie et de l'algorithme nécessaires), dont cas d'usages à expérimenter, <u>en engageant les métiers</u>	Taxonomie exhaustive des cas d'usage potentiels (ainsi que de la technologie et de l'algorithme nécessaires) et priorisation	Identification complète des cas d'usage avec déploiement, priorisation des cas d'usage et feuille de route revues régulièrement suivant les évolutions technologiques
	<b>5</b> Niveau de maturité des expérimentations	Aucune expérimentation en cours	POC(s) en partenariat avec un ou plusieurs acteurs externes (par ex. : GAFAM, startups, laboratoires, alliances, etc.)	POCs incluant une comparaison de différentes technologies quantiques existantes et une estimation des ressources nécessaires	POCs incluant un benchmark structuré des différentes technologies quantiques	POCs intégrés dans des flux métiers et tests d'industrialisation
<b>Leadership</b> 	<b>6</b> Partenariats, aides financières et écosystème quantique	Aucun lien avec l'écosystème quantique	Participation ponctuelle à des événements quantiques	Partenariats ponctuels avec startups, laboratoires ou alliances industrielles et connaissances des aides financières (ex. : les appels à projets de la BPI, le PaQ)	Relations étroites avec startups, laboratoires ou alliances industrielles et obtention d'aides financières (ex. : les appels à projets de la BPI, le PaQ)	Leadership dans l'écosystème quantique: projets collaboratifs, publications fréquentes, influence sectorielle, dépôt et obtention de brevets
	<b>7</b> Veille technologique et concurrentielle	Pas de suivi des avancées quantiques	Veille passive sur les évolutions des concurrents (communiqués de presse, participations à des événements)	Veille concurrentielle et début de veille technologique (suivi des grandes communications des fabricants de hardware)	Veille concurrentielle et veille technologique poussées (lecture d'articles scientifiques, intervention régulière d'experts)	Capacité d'anticipation des tendances quantiques et ajustement de la stratégie
<b>Structuration</b> 	<b>8</b> Engagement des fonctions de l'entreprise	Aucune organisation dédiée	Suivi structuré par un groupe d'experts	Pilotage transverse global et désignation de responsables métiers pour identifier/développer les cas d'usage pour leur domaine	Pilotage transverse global et responsables métiers dans chaque entité pour piloter les cas d'usage pour leur domaine avec un budget dédié	Structure de pilotage pérennisée (rôles, décisions, budget pluriannuel, stage-gate process expérimentations, mesure impact/ROI, reporting KPI, etc.)
	<b>9</b> Compétences internes et R&D	Aucune formation sur le quantique	Formations initiales pour les équipes R&D/innovation	Formations avancées dans équipe R&D (compétences algorithmiques) et premières formations pour d'autres départements (compétences métiers)	Recrutement spécifique de compétences avancées en quantique (compétences algorithmiques et métiers)	Plan de recrutement et de rétention des talents quantiques à moyen et long terme
	<b>10</b> Sécurisation de l'accès aux infrastructures technologiques	Aucune considération de sécurité et aucune infrastructure dédiée au calcul quantique	Prise de conscience des enjeux de sécurité et de confidentialité dans le choix des partenaires fournissant l'accès aux capacités de calcul (ex. : prestataires de QaaS)	Prise de conscience accrue des enjeux de sécurité et de souveraineté, avec mise en place d'une infrastructure interne pour les premières expérimentations quantique	Infrastructure robuste pour des projets pilotes poussés, incluant une solide maîtrise des sujets de sécurité	Infrastructure complète pour l'industrialisation et alignement avec les standards les plus élevés de sécurité, notamment via une indépendance technologique assurée

Source : Enquête Le Lab Quantique et Bain & Company (Janvier - Mai 2025)



## À propos de Bain & Compain

Bain & Company est une société de conseil mondiale qui aide les acteurs du changement les plus ambitieux à définir l'avenir.

Dans 65 villes réparties sur 40 pays, nous travaillons aux côtés de nos clients en tant qu'une seule équipe avec une ambition commune : obtenir des résultats extraordinaires, surpasser la concurrence et redéfinir les secteurs. Nous complétons notre expertise intégrée et sur mesure par un écosystème dynamique d'innovateurs numériques pour offrir des résultats meilleurs, plus rapides et plus durables. Notre engagement de 10 ans à investir plus de 1 milliard de dollars en services pro bono met notre talent, notre expertise et notre savoir-faire au service des organisations qui s'attaquent aux défis urgents d'aujourd'hui dans les domaines de l'éducation, de l'équité raciale, de la justice sociale, du développement économique et de l'environnement. Nous avons obtenu une note platine d'EcoVadis, la principale plateforme de notation des performances environnementales, sociales et éthiques des chaînes d'approvisionnement mondiales, nous plaçant dans le top 1 % de toutes les entreprises. Depuis notre fondation en 1973, nous mesurons notre succès à travers celui de nos clients, et nous maintenons fièrement le plus haut niveau de défense des clients dans l'industrie.

## le lab quantique

### À propos du Lab Quantique

Le Lab Quantique est un think tank et un incubateur qui soutient l'écosystème quantique dont l'objectif est de favoriser l'émergence de talents capables de relever les défis majeurs de la physique quantique, ainsi que de guider le développement de projets entrepreneuriaux et industriels dans la mise sur le marché de nouveaux produits et services.





For more information, visit [www.bain.com](http://www.bain.com)

Amsterdam • Athens • Atlanta • Austin • Bangkok • Beijing • Bengaluru • Berlin • Bogotá • Boston • Brussels • Buenos Aires • Chicago  
Copenhagen • Dallas • Denver • Doha • Dubai • Düsseldorf • Frankfurt • Helsinki • Ho Chi Minh City • Hong Kong • Houston • Istanbul • Jakarta  
Johannesburg • Kuala Lumpur • Kyiv • Lisbon • London • Los Angeles • Madrid • Manila • Melbourne • Mexico City • Milan • Minneapolis  
Monterrey • Mumbai • Munich • New Delhi • New York • Oslo • Palo Alto • Paris • Perth • Rio de Janeiro • Riyadh • Rome • San Francisco  
Santiago • São Paulo • Seattle • Seoul • Shanghai • Singapore • Stockholm • Sydney • Tokyo • Toronto • Vienna • Warsaw • Washington, DC • Zurich