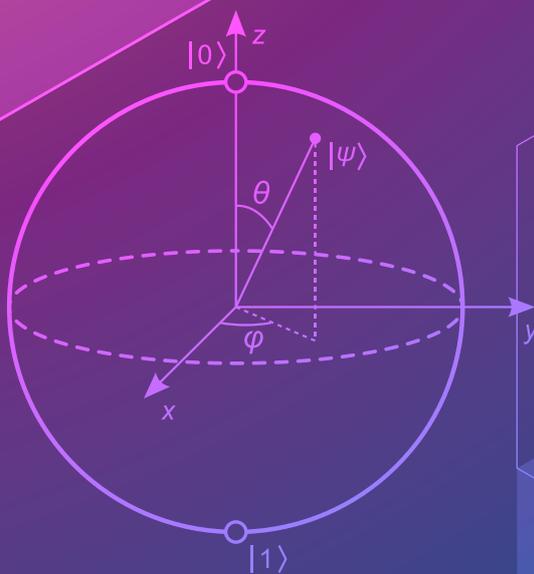
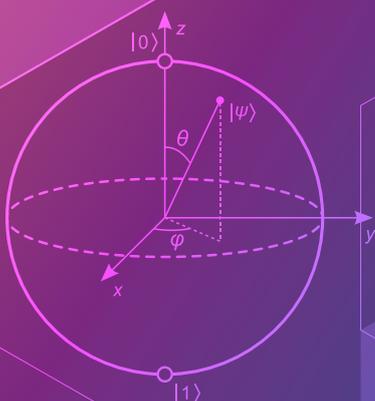




L'INFORMATIQUE QUANTIQUE DANS LES BREVETS EN 2024



Ce document est réalisé par l'INPI. Il est protégé par le droit d'auteur. Sa reproduction et son utilisation sont autorisées à des fins non commerciales, à condition de citer la source comme suit : « L'informatique quantique dans les brevets en 2024 », INPI, Novembre 2024.



NOTES DE LECTURE

- ▶ Dans le cadre de cette étude, le terme « **brevets** » est utilisé par convention pour désigner les familles de brevets incluant les demandes de brevet et/ou de certificat ou modèle d'utilité publiées en cours d'examen et les brevets et/ou certificat ou modèle d'utilité délivrés, quelles que soient les juridictions.
- ▶ L'unité de compte des portefeuilles de brevets est le nombre de familles de brevets. Une famille de brevets regroupe l'ensemble des publications de brevets d'une même invention, sur un ou plusieurs territoires. Chaque famille est identifiée grâce à la demande de brevet publiée la plus ancienne, appelée « **priorité** ». L'année de la priorité est utilisée pour dater l'invention et le code de l'office de la priorité permet d'identifier la voie de dépôt initiale qui, lorsqu'elle est nationale, permet d'identifier l'origine géographique de l'invention.
- ▶ La notion de « **familles internationales de brevets** » est utilisée par convention pour désigner des familles de brevets composées d'au moins deux publications dans des juridictions nationales distinctes ainsi que les publications européennes (EP) et les demandes internationales PCT (WO) car ces juridictions permettent de cibler plusieurs pays.
- ▶ Les données de cette étude ont été collectées en juillet 2024. Elles concernent les familles de brevets publiées à cette date au plus tard. L'étude porte sur des familles de brevets dont la priorité la plus ancienne est comprise entre le 01/01/2000 et le 31/12/2023.

SOMMAIRE

RÉSUMÉ EXÉCUTIF	3
INTRODUCTION	4
PANORAMA DES PUBLICATIONS DANS L'INFORMATIQUE QUANTIQUE	5
▶ Informations relatives aux dépôts de brevets et aux déposants	5
▶ Informations relatives aux publications scientifiques	17
PORTRAIT : C12 QUANTUM ELECTRONICS, LA PIONNIÈRE DANS L'USAGE DES NANOTUBES DE CARBONE	24
COMPILATION	26
▶ Informations relatives aux dépôts de brevets et aux déposants	26
▶ Informations relatives aux publications scientifiques	29
PORTRAIT : PASQAL, LA SCALE UP FRANÇAISE DE L'INFORMATIQUE QUANTIQUE	31
CODES DE CORRECTION D'ERREURS	34
▶ Informations relatives aux dépôts de brevets	34
▶ Informations relatives aux publications scientifiques	37
PORTRAIT : QUOBLI, LA STARTUP QUANTIQUE FRANÇAISE QUI PARIE SUR LES SEMI-CONDUCTEURS	40
CONCLUSION	43
LEXIQUE ET MÉTHODOLOGIE	44
BIBLIOGRAPHIE	46
REMERCIEMENTS	46

1 RÉSUMÉ EXÉCUTIF

L'informatique quantique a connu une croissance fulgurante au cours de la dernière décennie, marquée par une multiplication des familles de brevets par 20 entre 2013 et 2022, un signe d'accélération des avancées technologiques et d'une tendance à la maturation de ce domaine. En 2021 et 2022, plus de 40 % des inventions brevetées ont été enregistrées, portant à 11 000 environ le nombre total de familles de brevets dans le monde, illustrant l'émergence rapide de solutions concrètes et brevetables. L'essor de l'informatique quantique est plus frappant comparé à l'ensemble des secteurs technologiques, avec une augmentation de 2 000 % des brevets.

Les États-Unis et la Chine dominent le secteur, concentrant à eux seuls 68 % des priorités de brevets en informatique quantique. La Chine se distingue par une croissance spectaculaire de 120 % par an du nombre de familles internationales de brevets sous priorité chinoise. Bien que les États-Unis conservent leur position de leader grâce à des entreprises clés comme IBM, Microsoft et Alphabet (Google), leur activité semble avoir atteint un niveau de croissance plus modéré ces dernières années.

En Europe, la stratégie de dépôt de brevets se distingue par une forte propension à l'extension internationale, avec plus de 80 % des familles de brevets étendues au-delà des frontières européennes. L'Europe se démarque également par une proportion plus élevée de brevets consacrés aux qubits, atteignant environ 31 %. L'Allemagne, le Royaume-Uni et la France se distinguent comme les pays européens les plus dynamiques. Entre 2018 et 2022, le nombre de demandes de brevets dont l'Office européen des brevets (OEB) est l'office de premier dépôt a été multiplié par 15.

Dans le contexte européen, la France se positionne comme un acteur visible en matière de dépôts de brevets dans le domaine de l'informatique quantique. Entre 2018 et 2022, les dépôts auprès de l'INPI ont connu une hausse de 83 %. Sur la même période, les familles internationales de brevets sous priorité française ont enregistré une croissance annuelle moyenne de 11 %. Néanmoins, dans certains sous-domaines spécifiques tels que la compilation quantique, la présence française est moins marquée dans les publications scientifiques, contrairement à d'autres pays européens comme l'Allemagne, le Royaume-Uni et l'Autriche qui y sont plus présents.

Sous-domaines spécifiques : compilation et correction d'erreurs

Les brevets en informatique quantique portent principalement sur le matériel, avec une faible représentation des logiciels, codes correcteurs d'erreurs et compilateurs. Cependant, ces derniers domaines, bien que marginaux, connaissent une croissance notable depuis moins d'une décennie. Les déposants américains dominent en nombre absolu de brevets sur les qubits, avec une approche équilibrée entre brevets sur le matériel et sur le logiciel. Les déposants européens, bien que moins nombreux, consacrent proportionnellement une plus grande part de leur portefeuille de brevets aux technologies liées aux qubits. La Corée du Sud se distingue par une proportion élevée de brevets sur la correction d'erreurs (11 %), contrastant avec une rareté de ces brevets dans d'autres pays.

Les technologies de compilation, bien que récentes, ont enregistré une augmentation de 655 % des dépôts de brevets depuis 2017, principalement sous l'impulsion des États-Unis et de l'Europe, où les institutions académiques jouent un rôle clé. La correction d'erreurs, domaine émergeant avant la compilation, a connu une croissance spectaculaire de 1 108 % entre 2013 et 2022, principalement sous impulsion américaine, avec une montée en puissance de startups spécialisées comme Rigetti. L'Europe suit avec une croissance de 71 % sur ce sous-domaine depuis 2019, emmenée par des déposants français et des collaborations inter académiques.

Profil des déposants

Le paysage des déposants est dominé par des acteurs nord-américains comme IBM, Microsoft et Alphabet (Google), avec une contribution notable des académiques et industriels chinois et japonais.

Le paysage européen de l'informatique quantique se caractérise par l'excellence de ses centres de recherche et l'expertise technique de ses institutions. Ces atouts attirent des collaborations avec des acteurs majeurs du secteur, comme en témoignent les partenariats entre l'Université de Delft, l'École polytechnique fédérale de Zurich et Alphabet (Google), ou l'Université de Stuttgart et IBM.

Les déposants français occupent une place notable, représentant 8 des 26 principaux déposants européens. Ce groupe diversifié comprend des organismes académiques (CEA, CNRS, Université Paris Cité), des groupes industriels (ATOS, STMicroelectronics, Thalès), ainsi que des startups innovantes comme Pasqal et Alice&Bob. La France se distingue par un taux élevé de co-dépôts, atteignant 25 %, dont 40 % impliquent une collaboration avec le secteur académique, soulignant une forte synergie entre les acteurs de la recherche dans le pays.

Perspectives

L'informatique quantique s'inscrit aujourd'hui comme un secteur clé d'innovation, soutenu par des investissements majeurs en recherche et développement. La forte dynamique de brevets, marquée par une course entre les États-Unis et la Chine, témoigne du passage de cette technologie d'un état théorique à des applications industrielles concrètes.

L'Europe, bien que plus modeste en nombre de brevets, démontre une orientation vers des technologies de niche et une collaboration académique renforcée, positionnant les déposants européens comme des contributeurs importants dans la construction d'une infrastructure quantique mondiale. La diversité des approches et la complémentarité des déposants européens dans la chaîne de valeur de l'ordinateur quantique reflètent des stratégies nationales variées, couvrant un large spectre du domaine, qui constituent des atouts significatifs pour le développement de projets collaboratifs à l'échelle européenne.

Les technologies quantiques constituent un domaine technologique clé pour l'avenir. Au cœur de cette révolution technologique, l'informatique quantique émerge comme une innovation disruptive phare du XXI^e siècle, promettant de bouleverser de multiples secteurs industriels et scientifiques grâce à sa capacité inédite à résoudre des problèmes d'une complexité jusqu'alors insurmontable. Elles soulèvent ainsi des enjeux importants de compétitivité et de souveraineté pour les pays.

Face à cet enjeu stratégique, la France a pris la mesure de l'importance des technologies quantiques pour sa compétitivité et sa souveraineté futures. En janvier 2021, le Président de la République a lancé une stratégie nationale ambitieuse pour l'innovation quantique, s'inscrivant dans le cadre du plan France 2030. Ce programme, doté d'un budget global de 1,8 milliards d'euros, dont 1 milliard engagé par l'État d'ici 2025, vise à positionner le pays comme un acteur majeur dans la course mondiale à l'innovation quantique. Il comprend notamment 432 millions d'euros consacrés au développement d'ordinateurs LSQ (« Large Scale Quantum ») et le programme PROQCIMA, qui ambitionne de développer des prototypes d'ordinateurs quantiques d'ici 2032. Ces initiatives sont complétées par des financements européens et industriels.

Dans ce contexte de compétition internationale intense, où les États-Unis et la Chine se positionnent comme leaders, la propriété intellectuelle, et plus particulièrement les brevets, joue un rôle crucial. Elle permet non seulement de protéger et valoriser les avancées technologiques, mais aussi de structurer le secteur, faciliter les transferts de connaissances entre la recherche publique et le secteur privé, et constituer des actifs stratégiques pour les entreprises.

C'est dans cette optique que l'Institut National de la Propriété Industrielle (INPI) a initié en juin 2024 une étude des brevets dans le domaine de l'informatique quantique. Cette analyse dresse un état des lieux des brevets et publications et identifie les tendances marquantes du secteur.

Elle s'inscrit dans une démarche plus large d'accompagnement par l'INPI de l'écosystème d'innovation français, notamment des 125 startups labellisées French Tech 2030, parmi lesquelles figurent des entreprises deeptech spécialisées dans le quantique.

Cette étude alimente une réflexion nécessaire sur le paysage des brevets dans l'informatique quantique, un domaine où les enjeux de propriété intellectuelle sont étroitement liés aux questions de souveraineté technologique et de compétitivité économique. Elle fournit un éclairage aux décideurs, aux chercheurs et aux industriels sur les tendances actuelles et futures de ce secteur stratégique, qui contribuent à renforcer la position de la France dans la course mondiale à l'innovation quantique.



LES PROPRIÉTÉS DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE EXPLOITÉES DANS LA SECONDE RÉVOLUTION

Un ordinateur quantique exploite les propriétés uniques de la physique quantique, notamment la superposition et l'intrication, pour traiter l'information. Contrairement aux ordinateurs classiques qui utilisent des bits (0 ou 1), l'unité de base d'un ordinateur quantique est le qubit (quantum bit).

Le qubit peut exister dans une combinaison linéaire des états 0 et 1. Cette propriété, appelée superposition, permet au qubit d'encoder une infinité d'états quantiques distincts. De plus, les qubits peuvent être intriqués, signifiant que l'état d'un qubit est corrélé à celui des autres, formant un système quantique cohérent.

Ces propriétés permettent à un ordinateur quantique de réaliser des calculs sur un nombre beaucoup plus important d'informations simultanément qu'un ordinateur classique. Ainsi, pour certaines opérations complexes, un ordinateur quantique peut théoriquement atteindre une puissance de calcul exponentiellement supérieure à celle des ordinateurs conventionnels.

1 Source : « Stratégie nationale sur les technologies quantiques », Saclay 21 janvier 2021

2 Source : Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche : « France 2030 : Point d'étapes trois ans après le lancement de la stratégie nationale des technologies quantiques et lancement du programme Proqcima », 06 mars 2024

1. INFORMATIONS RELATIVES AUX DÉPÔTS DE BREVETS ET AUX DÉPOSANTS

1 - ANALYSE GÉNÉRALE

La physique quantique, initiée par les travaux d'Einstein au début du XX^e siècle, a donné naissance à une première génération de technologies révolutionnaires comme le laser et le transistor. Ces avancées, exploitant les effets quantiques à l'échelle macroscopique, caractérisent la première révolution quantique.

Aujourd'hui, nous assistons à l'émergence de la « seconde révolution quantique » qui se concentre sur la manipulation et le contrôle d'états quantiques individuels, comme l'illustre le développement de l'ordinateur quantique. Bien que complexe et encore peu connu du grand public, l'ordinateur quantique suscite un intérêt croissant dans les sphères académiques, industrielles et politiques. Des géants technologiques comme IBM et Alphabet (Google), ainsi que de nombreuses startups soutenues par des plans nationaux ambitieux, investissent massivement dans ce domaine. L'ordinateur quantique promet une puissance de calcul sans précédent, exploitant les propriétés uniques de la physique quantique.

L'activité de dépôt de brevets dans le domaine de l'informatique quantique croît exponentiellement depuis une décennie. Entre 2013 et 2022, le nombre de familles de brevets a connu une multiplication par 20, illustrant l'intensification des efforts d'innovation dans ce secteur. Plus frappant encore, plus de 40 % des inventions brevetées dans ce domaine ont été déposées en 2021 et 2022. Cette concentration récente des dépôts de brevets témoigne, d'une part, de l'accélération fulgurante des travaux de recherche et développement, et d'autre part, de la maturité croissante des technologies quantiques qui passent rapidement du stade théorique à celui des applications concrètes et brevetables.

Au cours des dix dernières années, le nombre de familles de brevets déposées dans le domaine de l'informatique quantique a explosé, enregistrant une croissance de 2 000 %, tandis que les dépôts dans tous les secteurs confondus n'ont augmenté que de 100 %. Cette tendance est encore plus marquée pour les familles internationales de brevets, avec une hausse de près de 2 000 % dans l'informatique quantique contre seulement 20 % pour l'ensemble des technologies brevetées. Cela souligne l'intérêt croissant et les investissements significatifs dans ce secteur émergent.

Évolution du nombre de familles de brevets par année de priorité dans le domaine de l'informatique quantique



Source Derwent, Traitement INPI 2024

L'étude des brevets dans le domaine de l'informatique quantique met en lumière des disparités significatives dans les stratégies de protection internationale.

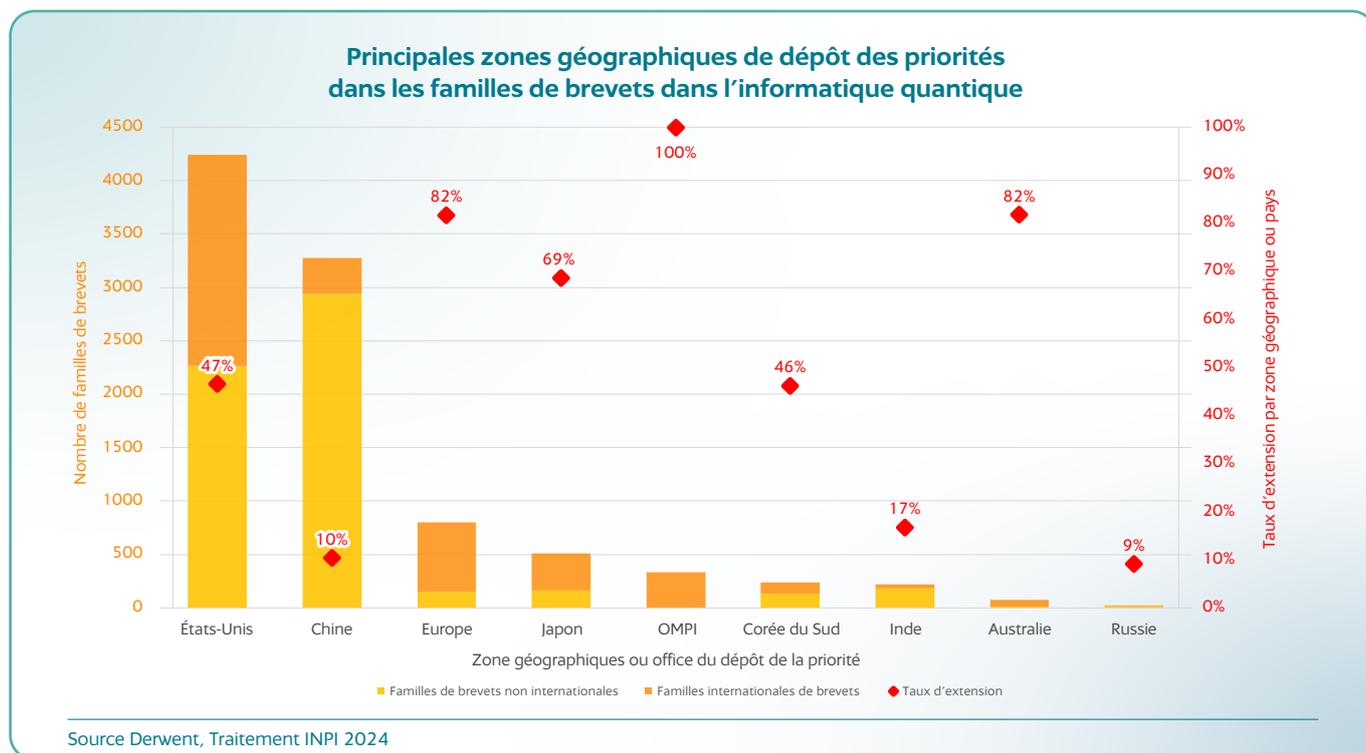
En moyenne, seulement une famille de brevets sur 2,4 fait l'objet d'une extension internationale, visant plusieurs pays. Cette statistique révèle que près de 60 % des familles de brevets sont limitées à un seul pays, une tendance largement influencée par les dépôts massifs en Chine qui restent souvent confinés au territoire national (90 % des familles de brevets chinois dans l'informatique quantique sont actuellement composées d'un unique brevet national, une tendance comparable aux autres secteurs technologiques). Cette répartition géographique des brevets varie considérablement selon l'origine des déposants, reflétant des approches distinctes en matière de protection de propriété intellectuelle et de stratégies d'expansion sur les marchés internationaux dans le secteur de l'informatique quantique.

Les Etats-Unis et la Chine concentrent à eux seuls 68 % des priorités du domaine. Toutefois, seules 10 % des familles de brevets dont la priorité est chinoise sont étendues dans au moins un autre pays, tandis que plus de 80 % des familles dont la priorité a été déposée dans la zone géographique européenne sont étendues, un indicateur de la robustesse et de la qualité des titres.

L'évolution récente des dépôts de brevets dans ce périmètre technologique révèle des dynamiques contrastées entre les principales puissances technologiques mondiales.

La Chine connaît une croissance explosive dans le domaine des brevets :

- ▶ Les dépôts de familles de brevets sous priorité chinoise ont augmenté en moyenne de 95 % par an entre 2017 et 2022.
- ▶ Plus impressionnant encore, les familles internationales de brevets d'origine chinoise ont progressé de 120 % en moyenne annuelle sur la même période.



En comparaison, **l'activité américaine** semble avoir atteint un plateau :

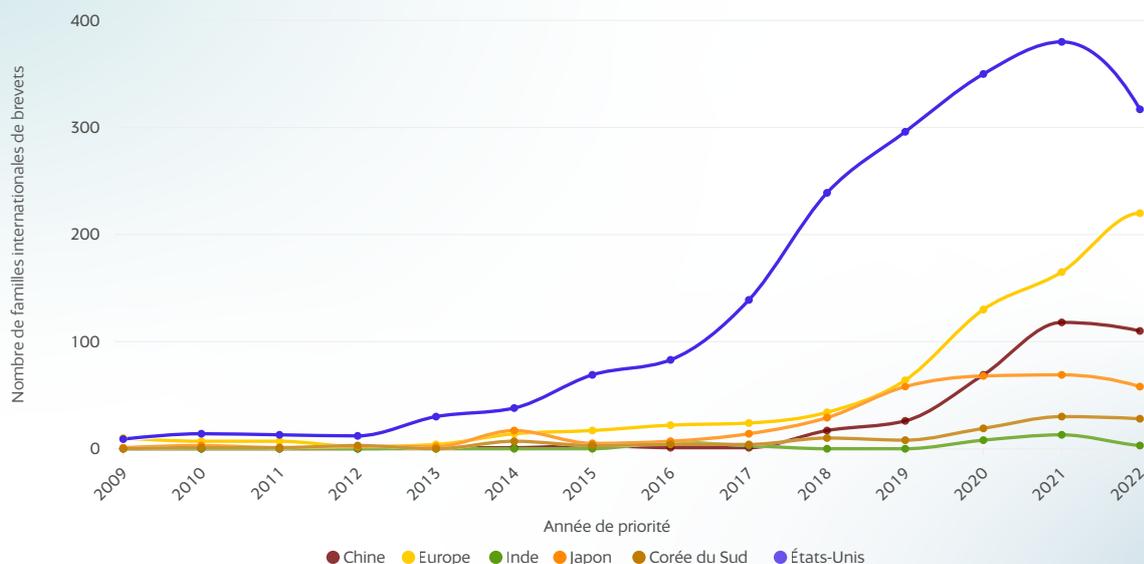
- ▶ Le nombre de familles de brevets déposées annuellement auprès de l'USPTO s'est stabilisé autour de 600.
- ▶ La croissance des familles internationales de brevets sous priorité américaine n'a été que de 14 % depuis 2017.

L'Europe se situe entre ces deux extrêmes :

- ▶ Les familles internationales de brevets sous priorité d'une juridiction dans la zone Europe ont connu une croissance de 42 % depuis 2017.

Ces chiffres illustrent un déplacement progressif du centre de gravité de l'innovation mondiale vers l'Asie, et particulièrement la Chine. Ils soulignent l'importance croissante des stratégies de protection internationale de propriété intellectuelle, notamment pour les acteurs chinois qui cherchent à étendre leur influence technologique à l'échelle globale. Cette orientation s'inscrit dans un contexte plus large où la Chine renforce dans le même temps sa présence dans les instances internationales de normalisation technique³. On peut y voir une volonté de participer plus activement à l'élaboration des standards technologiques mondiaux (notamment dans le quantique), voire d'y jouer un rôle de premier plan.

Évolution du nombre de familles internationales de brevets par année de priorité et par zone de priorité dans l'informatique quantique



Source Derwent, Traitement INPI 2024

³ Source : site de l'IEC (International Electrotechnical Commission) : « [Quantum computing: the latest frontier for international standards](#) » et de l'ITIF (Information Technology & Innovation Foundation) : « [The Biden Administration Overreacts Responding to China's Role in Setting Standards for Quantum Technologies](#) »

Au niveau de la zone Europe, l'évolution des dépôts de brevets entre 2018 et 2022 révèle des tendances contrastées mais dynamiques.

L'Office européen des brevets (OEB) a connu une augmentation spectaculaire de son activité :

- ▶ Entre 2018 et 2022, le nombre de demandes de brevets dont l'OEB est l'office de premier dépôt a été multiplié par 15.
- ▶ Les familles de brevets sous priorité européenne (EP) ont augmenté en moyenne de 80 % par an depuis 2018.

Les offices nationaux français et anglais ont enregistré une croissance significative :

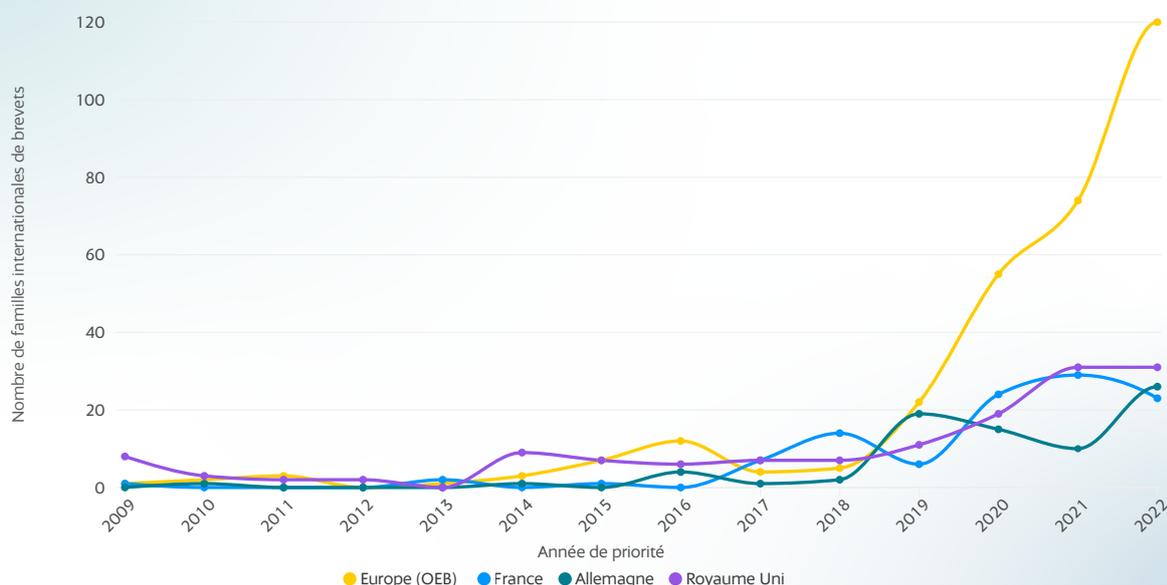
- ▶ Le nombre de dépôts auprès de l'INPI en France a augmenté de 83 % sur la 2018-2022.
- ▶ Toutefois, la croissance annuelle moyenne des familles internationales de brevets sous priorité française n'a été que de 11 % au cours de ces 5 années.

Parallèlement, les dépôts auprès de l'office anglais ont connu une hausse impressionnante de 325 %, tandis que la croissance annuelle moyenne du nombre de familles internationales de brevets sous priorité anglaise est de 34 % depuis 2018.

L'office allemand des brevets a traversé des phases contrastées :

- ▶ Après une activité notable en 2018 et 2019, le nombre de familles portant sur l'informatique quantique a été divisé par deux en 2021. Cette chute s'explique en partie par la baisse des dépôts sous priorité allemande liés à la technologie de fabrication des qubits à structure de diamant.
- ▶ Enfin, les familles internationales de brevets sous priorité allemande ont enregistré une augmentation de 66 %, bien que cette évolution ait été irrégulière.

Évolution du nombre de familles internationales de brevets par année de priorité dans les principales juridictions de la zone Europe dans l'informatique quantique



Source Derwent, Traitement INPI 2024

2 - SEGMENTATION TECHNOLOGIQUE D'UN ORDINATEUR QUANTIQUE

La chaîne de valeur de l'ordinateur quantique se compose de sept couches technologiques interdépendantes, allant du matériel au logiciel :

- ▶ **Qubits et puce quantique** : Le cœur physique de l'ordinateur, où l'information quantique est stockée et manipulée.
- ▶ **Système d'exploitation** : Gère le processeur et l'électronique de contrôle, assurant le fonctionnement de base de l'ordinateur quantique.
- ▶ **Correction d'erreurs** : Essentielle pour maintenir la cohérence quantique et réduire les erreurs inhérentes aux systèmes quantiques.
- ▶ **Compilateur** : Traduit les instructions de haut niveau en opérations quantiques de bas niveau.
- ▶ **Frameworks et langages de programmation** : Outils comme Qiskit ou Cirq, permettant aux développeurs de créer des programmes quantiques.
- ▶ **Algorithmes quantiques** : Séquences d'instructions conçues pour exploiter les propriétés quantiques, comme l'algorithme de Shor.
- ▶ **Applications utilisateur** : Interfaces et logiciels finaux exploitant la puissance de calcul quantique.

Chaque couche est protégeable par différents droits de propriété intellectuelle, combinables le cas échéant. Les éléments matériels peuvent être couverts par des brevets d'invention ou des certificats d'utilité. Les algorithmes et logiciels lorsqu'ils constituent

des procédés techniques peuvent bénéficier d'une protection par brevet, tandis que les programmes informatiques et les méthodes relèvent du droit d'auteur.

Cette structure en couches illustre la complexité et l'interdépendance des technologies nécessaires au développement des ordinateurs quantiques.

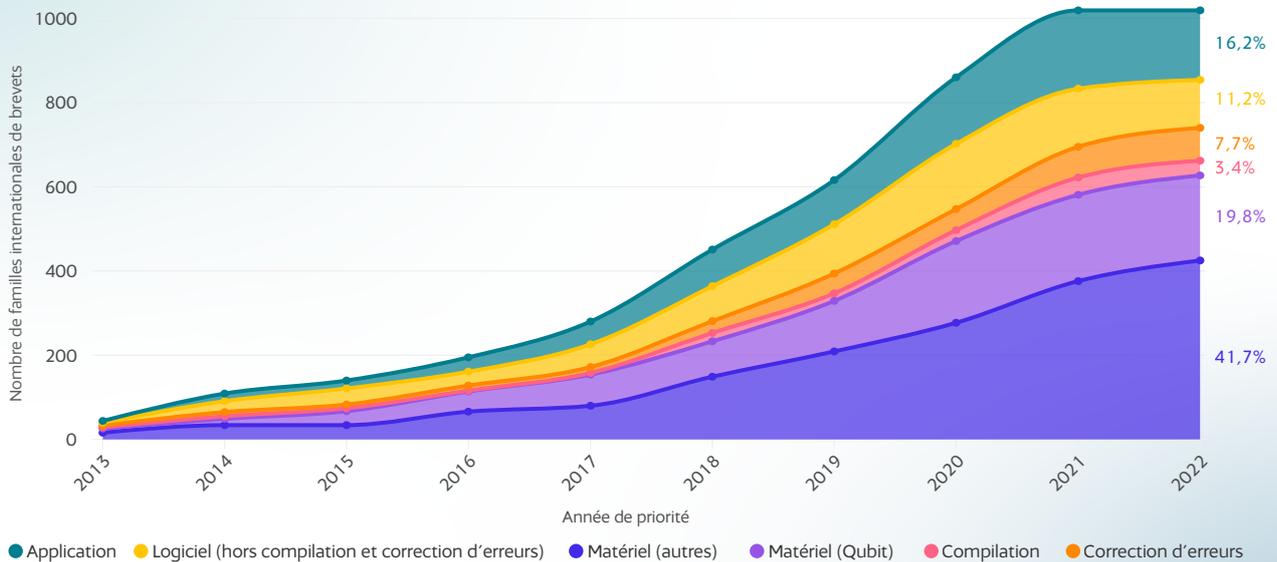
L'évolution des dépôts de brevets dans le domaine quantique depuis 2013 montre une croissance significative, tant pour les aspects logiciels que matériels.

Les brevets liés au matériel quantique (« hardware »), à l'exclusion des qubits, dominent dans tous les pays, quelle que soit l'origine de la famille, avec une prépondérance marquée en Corée du Sud (76 % des familles de brevets) et en Chine (40 %).

L'Europe se distingue par la plus grande proportion de dépôts de brevets consacrés aux qubits, atteignant environ 31 %, contre 29 % pour les États-Unis.

L'analyse des familles de brevets en informatique quantique révèle une polarisation des familles aux extrémités de la chaîne de valeur. D'une part, une majorité de brevets se concentre sur les aspects matériels, formant ainsi une base solide pour l'infrastructure quantique. D'autre part, on observe une montée en puissance des brevets axés sur les aspects logiciels et leurs applications, à l'exclusion des codes de correction d'erreurs et de la compilation, qui demeurent marginaux dans l'ensemble des inventions.

Répartition des familles internationales de brevets par sous-domaines associés à l'informatique quantique, selon l'année de la priorité.



Source Derwent, Traitement INPI 2024

Bien que la Corée du Sud se démarque légèrement avec un taux de 11 % de ses brevets quantiques consacrés à la correction d'erreurs, la moyenne dans les autres juridictions ne représente que 3 %.

Cette sous-représentation pourrait s'expliquer par la difficulté à délimiter clairement ces domaines par rapport aux méthodes mathématiques ou aux programmes informatiques en tant que tels, incitant potentiellement les déposants à éviter ces sujets complexes sur le plan de la brevetabilité.

Bien que moins nombreux, les brevets liés aux codes de correction d'erreurs et à la compilation affichent une croissance remarquable depuis 2017. Par conséquent une analyse spécifique de ces sous-domaines émergents sera développée dans les chapitres suivants.

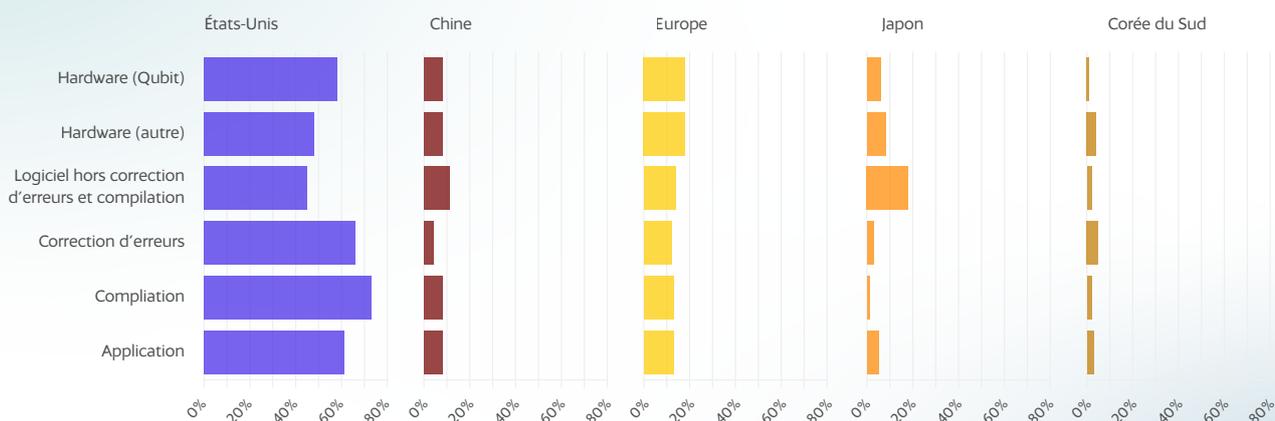
Ainsi, si les brevets liés au matériel quantique restent prédominants en nombre, le secteur du logiciel connaît une croissance rapide (+181 %).

Cette accélération dans le domaine logiciel s'explique principalement par deux facteurs :

- ▶ Premièrement, l'entrée en force des acteurs chinois, qui investissent massivement dans ce domaine. La Chine domine désormais en termes de volume dans les familles liées aux logiciels quantiques (hors correction d'erreurs et compilation), représentant une invention sur deux. Cependant, la portée de ces brevets reste majoritairement nationale, avec seulement 11 % ayant une dimension internationale.
- ▶ Deuxièmement, les déposants américains, dont les GAFAM, intensifient leur activité de dépôt de brevets dans tous les aspects de l'informatique quantique, avec une forte présence dans les domaines logiciels et les applications. Leur domination est particulièrement marquée dans le domaine de la compilation quantique, où ils détiennent près de 75 % des brevets.

En comparaison, le Japon et l'Europe montrent une approche plus nuancée, avec respectivement 18 % et 14 % de leurs familles internationales de brevets liées aux logiciels quantiques (hors correction d'erreurs et compilation).

Part (%) des familles internationales de brevets par zone géographique et sous-domaines de la chaîne de valeur



Source Derwent, Traitement INPI 2024

En outre, si les brevets matériels restent dominants, on observe une particularité dans les pays ayant rejoint plus récemment la course quantique, notamment la Chine et l'Inde. Ces nations présentent un ratio logiciel/matériel plus élevé que les autres pays, indiquant une stratégie d'innovation davantage axée sur les aspects logiciels de l'informatique quantique.

L'analyse des brevets quantiques en Europe révèle une approche distincte de celle observée dans les autres régions du monde. Les inventions européennes se caractérisent par une proportion nettement plus faible de brevets logiciels comparée aux brevets matériels. Cette tendance contraste avec la stratégie américaine, où les entreprises déposent généralement des brevets couvrant à la fois le matériel et le logiciel.

En Europe, on constate une spécialisation marquée des acteurs. Les principaux déposants de brevets logiciels diffèrent générale-

ment de ceux qui se concentrent sur les brevets matériels. Dans le domaine matériel, les institutions académiques européennes jouent un rôle prépondérant, tandis qu'elles sont quasiment absentes des dépôts de brevets logiciels. Inversement, les acteurs industriels européens, à l'exception notable d'Atos, montrent une participation limitée dans les brevets liés au matériel quantique.

Cette dichotomie dans l'approche européenne de l'innovation quantique souligne une séparation nette entre les domaines logiciels et matériels, tant au niveau des acteurs impliqués que des stratégies de brevets adoptées. Un facteur explicatif de ces tendances pourrait être la connaissance limitée des acteurs européens des modalités de protection par brevets des procédés techniques mis en œuvre par ordinateur. Cette situation suggère un potentiel inexploité dans la protection de l'innovation logicielle quantique en Europe.



LES LOGICIELS ET LES BREVETS EN FRANCE ET EN EUROPE

Une idée reçue est que les logiciels ne peuvent être protégés que par le droit d'auteur, mais cette affirmation est incorrecte. En réalité, les brevets peuvent également protéger des inventions techniques qui intègrent un logiciel.

Depuis les années 1980, le code source des logiciels est considéré comme une œuvre de l'esprit et bénéficie de la protection par le droit d'auteur. Cependant, bien que les programmes d'ordinateur soient exclus de la protection par brevet lorsqu'ils sont pris isolément, ils peuvent être protégés en tant que partie d'une invention technique.

Plus précisément, seule la séquence d'instructions (le code source) est exclue de la brevetabilité. En revanche, les pro-

cessus techniques sous-jacents, qui utilisent un logiciel pour produire un effet technique, peuvent être protégés par un brevet. Ainsi, il est possible d'obtenir un brevet pour un procédé inventif qui inclut un logiciel, à condition que le brevet ne porte pas uniquement sur le programme d'ordinateur en tant que tel.

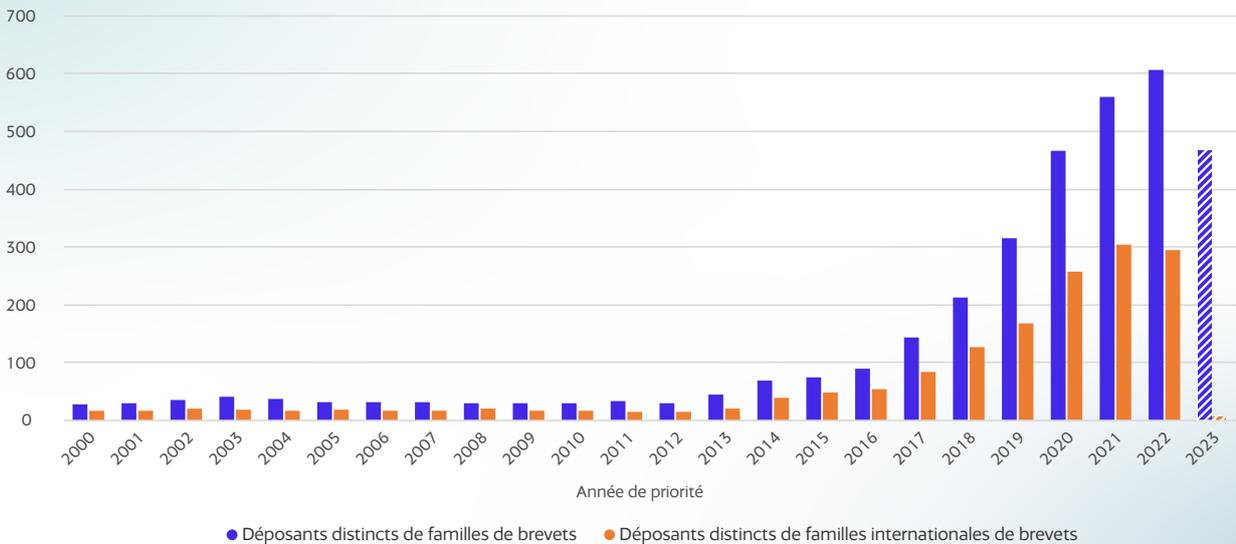
Cette protection par brevet s'applique à l'ensemble du procédé technique intégrant le logiciel, tandis que le droit d'auteur se limite à la protection du code source. Cette complémentarité entre le droit d'auteur et le droit des brevets est essentielle pour garantir une protection efficace des résultats de la recherche et du développement dans le domaine des logiciels.

3 - INFORMATIONS RELATIVES AUX DÉPOSANTS

Evolution des portefeuilles de brevets des déposants

A l'image de l'évolution exponentielle du volume de familles de brevets en informatique quantique, le nombre d'acteurs connaît depuis une décennie une augmentation fulgurante. Entre 2013 et 2022, le nombre de déposants distincts, tant pour les brevets non étendus que pour les familles internationales, a été multiplié par près de 15. En 2022, on recense plus de 600 déposants distincts.

Évolution du nombre de déposants distincts par année de priorité dans le domaine de l'informatique quantique



Source Derwent, Traitement INPI 2024

L'analyse du classement des principaux déposants de familles internationales de brevets dans le domaine de l'informatique quantique révèle une domination claire des géants technologiques américains. IBM, Microsoft et Alphabet (Google) occupent les trois premières places, formant un podium exclusivement américain. Cette prééminence s'étend plus largement, avec près de la moitié des 20 premiers déposants provenant d'Amérique du Nord. Parmi les acteurs américains, Microsoft se démarque par un focus sur les qubits de Majorana (ou qubits topologiques) et la correction d'erreurs. Les institutions académiques américaines adoptent quant à elles des positionnements plus spécialisés. Par exemple, l'université de Harvard concentre ses efforts sur la compilation, tandis que l'Université de Yale se focalise sur les codes de correction d'erreurs.

Les acteurs asiatiques, principalement chinois et japonais, représentent plus d'un tiers du classement.

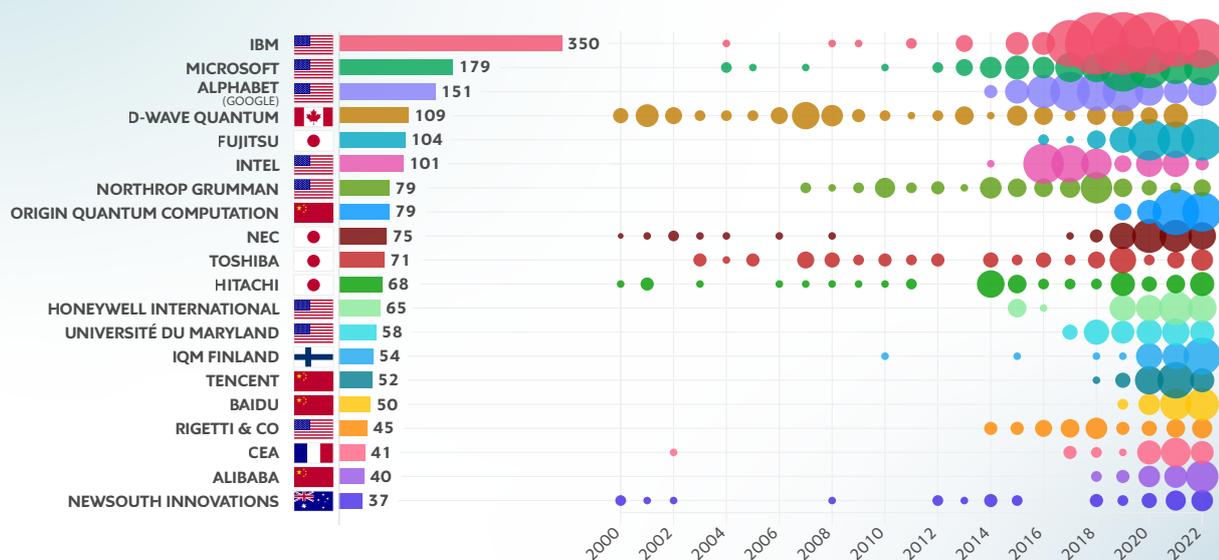
En revanche, la présence européenne est limitée, avec seulement deux représentants : le CEA français et la startup finlandaise IQM.

Le paysage des déposants est diversifié, incluant de grands groupes spécialisés dans le numérique comme Alphabet (Google), Microsoft et Baidu⁴, ainsi que des conglomérats industriels japonais non spécialisés dans le quantique. Côté américain, la présence d'acteurs industriels ayant des activités militaires, tels que Northrop Grumman et Honeywell, met en lumière l'aspect stratégique et les applications militaires potentielles des technologies quantiques.

Enfin, on observe des entreprises spécialisées dans le quantique. Parmi ces acteurs dédiés, on peut citer Rigetti & Co, IQM Finland, ou encore D-Wave, pionnière dans le domaine de l'informatique quantique, fondée en 1999.

⁴ En janvier 2024, Baidu et Alibaba ont cessé leurs activités dans le domaine de l'informatique quantique. Baidu a décidé de donner son laboratoire de recherche quantique à l'Académie de l'information quantique de Pékin (BAQIS), tandis qu'Alibaba a également fermé son laboratoire et a fait don de ses équipements à l'Université de Zhejiang. Source : Reuters « [Baidu to donate quantum computing lab, equipment to Beijing institute](#) »

Classement mondial et évolution des portefeuilles des 20 premiers déposants selon le nombre de familles internationales de brevets dans l'informatique quantique

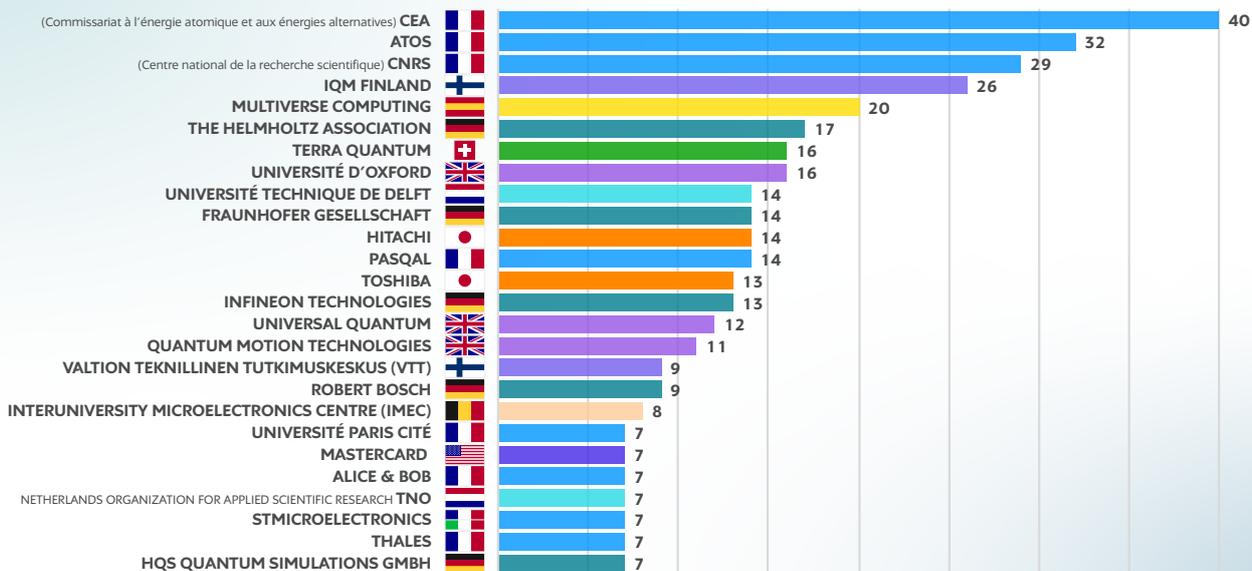


Source Derwent, Traitement INPI 2024

L'analyse des familles de brevets ayant une priorité revendiquée dans une juridiction européenne nationale ou régionale révèle une répartition intéressante des acteurs : les déposants français sont fortement représentés parmi les principaux acteurs européens, occupant huit des vingt-six premières places, dont les trois premières positions. Parmi eux, on trouve trois institutions académiques (le CEA, le CNRS et l'université Paris Cité), les groupes ATOS, STMicroelectronics et Thalès, la scale-up Pasqal (voir page dédiée) et la startup Alice&Bob. L'Allemagne est également bien représentée avec cinq acteurs, dont la moitié sont des institutions académiques et deux sont des entreprises.

Un phénomène notable est la présence des deux grands groupes technologiques japonais, Hitachi et Toshiba, qui choisissent de déposer certains de leurs brevets en informatique quantique directement avec une priorité européenne.

Classement des principaux déposants en nombre de familles internationales de brevets dans l'informatique quantique dont la priorité est issue d'une juridiction de la zone Europe



Source Derwent, Traitement INPI 2024

Ainsi, entre 2007 et 2020, Hitachi a déposé près de 20 % de ses familles de brevets en informatique quantique avec une priorité européenne.

Parmi ces familles :

- ▶ 5 ont été étendues au marché américain,
- ▶ Seulement 3 ont été étendues au Japon,
- ▶ Aucune n'a été réalisée en co-dépôt.

Les technologies couvertes par ces brevets sont variées, mais on note une concentration particulière.

- ▶ Près de la moitié des inventions concernent les qubits de spins,
- ▶ 2 inventions portent sur la fabrication de qubits avec des ions piégés,
- ▶ 2 brevets concernent les qubits photoniques,
- ▶ 1 brevet porte sur les qubits supraconducteurs,
- ▶ 1 invention est spécifiquement dédiée à la correction d'erreurs des qubits.

Entre 2003 et 2020, Toshiba a choisi de déposer un sixième de son portefeuille de brevets sous priorité anglaise. Ces familles, dont aucune n'a été déposée avec des co-dépôts, ont toutes été étendues au marché américain et au marché japonais.

Les technologies couvertes par ces brevets sont variées, mais on note une concentration particulière.

- ▶ Près de la moitié des inventions concernent les qubits photoniques,
- ▶ 2 inventions portent sur les qubits supraconducteurs,
- ▶ Une famille de 2011 concerne les qubits à structure de diamant.

Toshiba Europe collabore avec l'Université de Cambridge sur la distribution de clés quantiques (QKD) depuis plusieurs années. En septembre 2023, l'entreprise a ouvert un nouveau centre de technologie quantique à Cambridge, avec un investissement de 20 millions de livres, visant à développer des solutions de réseaux sécurisés par la technologie quantique. L'entreprise a investi plus de 240 millions de livres dans la recherche et le développement au Royaume-Uni, dont environ 100 millions pour la commercialisation des technologies quantiques⁵.

Cette stratégie suggère l'importance qu'accordent ces entreprises au marché européen et potentiellement leur volonté de s'intégrer plus étroitement dans l'écosystème d'innovation quantique européen.

Investissements

Pour mettre au point un ordinateur quantique, les acteurs doivent relever de nombreux défis. L'un des principaux est de parvenir à implémenter des milliers de qubits utilisables dans un système quantique. Pour ce faire, plusieurs technologies de qubits sont actuellement explorées, chacune ayant des caractéristiques uniques et des niveaux de maturité technologique différents. Les incertitudes technologiques concernant l'architecture finale de l'ordinateur quantique sont élevées, et les investisseurs doivent donc répartir leurs investissements sur les technologies qui semblent les plus prometteuses.

Les qubits supraconducteurs figurent parmi les types de qubits les plus avancés. Ils ont attiré des montants de financement record, grâce à de nombreux acteurs, notamment de grands groupes américains tels qu'IBM, qui ont choisi cette technologie. Celle-ci a montré des progrès rapides en termes de nombre de qubits intégrés dans une machine. Cependant, la quantité de qubits n'est pas le seul critère déterminant ; la qualité des qubits est également essentielle pour garantir des calculs précis. Il est crucial de développer des qubits à haute fidélité pour minimiser les erreurs lors des opérations quantiques.

Des technologies telles que les qubits à base d'ions piégés ou d'atomes froids, reconnues pour avoir une meilleure fidélité de calcul mais plus difficiles à passer à l'échelle, ont montré des avancées significatives au cours des deux dernières années.

Une estimation des portefeuilles de brevets des acteurs privés du quantique associée aux investissements dont ils ont bénéficié jusqu'à 2023⁶ permet de dresser une estimation de leur vitalité en matière de dépôts de brevets et de l'importance qu'ils accordent par le biais d'investissements spécifiques.

Le tableau suivant présente une estimation du nombre de brevets déposés par dizaine de millions d'euros investis. En raison de l'absence de données exhaustives pour l'ensemble des acteurs, ce tableau ne prend pas en compte les licences de brevets accordées.

Dans le tableau suivant, les montants estimés des investissements sont constitués de :

- ▶ Les fonds propres des entreprises, lorsqu'il s'agit de grandes entreprises historiques.
- ▶ Les montants collectés au cours de l'ensemble des levées de fonds, lorsqu'il s'agit de startups (les quasi-fonds propres ne sont pas intégrés).

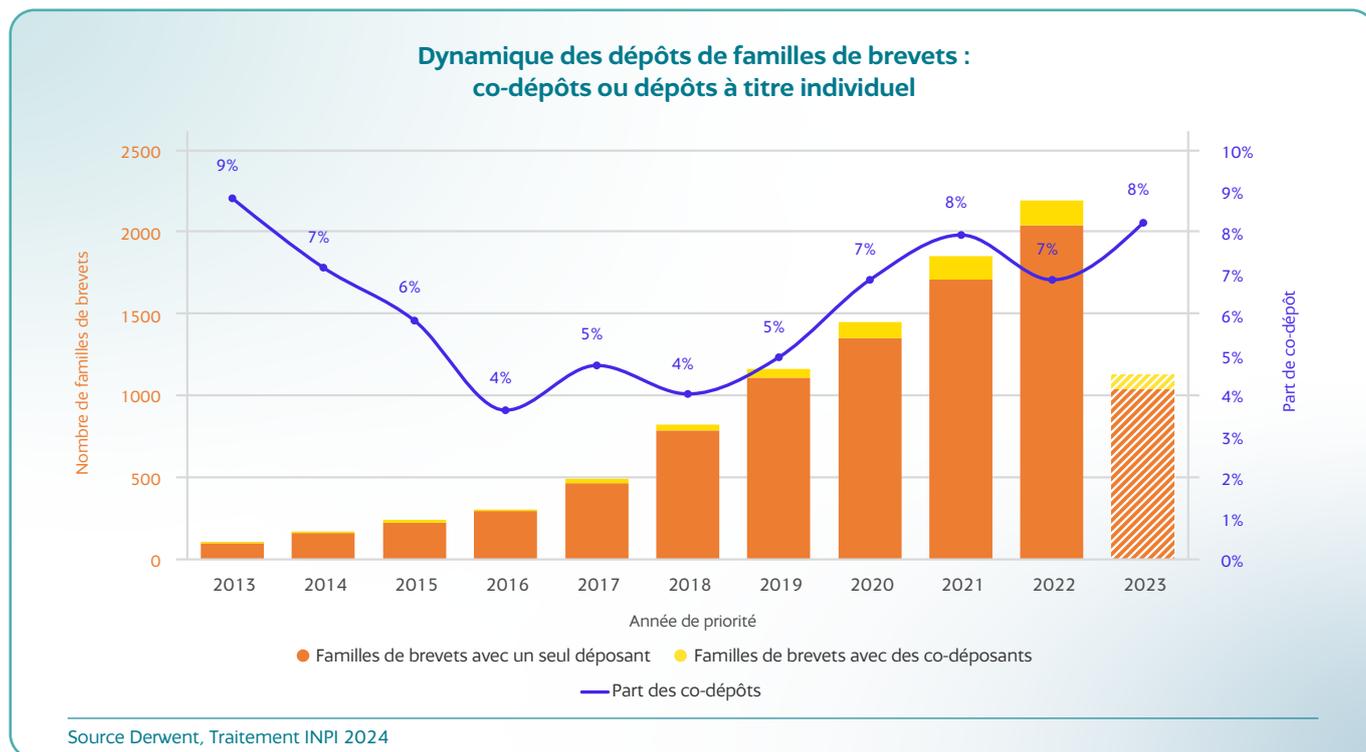
⁵ Source : site officiel de Toshiba : <https://www.toshiba-clip.com/en/detail/p=3766>

⁶ Source : Olivier Ezratty « *Understanding Quantum Technologies (Sixth Edition)* », 2023

Types de qubits physiques utilisés dans leurs ordinateurs quantiques développés		Entreprise / déposant	Nationalité	Nombres de familles sous prio jusqu'à 2022	Nombres de familles publiées en juillet 2024	Augmentation du nombre de familles de brevets sur la période	Evolution du portefeuille de brevets	Investissements estimés (en M\$) en janvier 2023	Nombre de familles de brevets par dizaine de millions de dollars US investis
Atomes	Ions piégés	Universal Quantum	UK	14	27	13	92,9 %	n.c	n.c
		Quantinuum (fusion Honeywell Quantum Solutions [US] et Cambridge Quantum [UK])	US	4	15	11	275,0 %	325	0,46
		Oxford Ionics	UK	2	12	10	500,0 %	n.c	n.c
		Alpine Quantum Technologies	AT	6	9	3	50,0 %	n.c	n.c
		eleQtron	DE	0	7	7	n.c	n.c	n.c
		IonQ	US	2	4	2	100,0 %	736	0,05
	Atomes froids	ColdQuanta (ex : Infleqtion)	US	29	39	10	34,5 %	183	2,13
		Pasqal	FR	7	24	17	242,9 %	140	1,71
		Atom computing	US	11	18	7	63,6 %	175	1,03
		QuEra	US	3	5	2	66,7 %	17	2,94
Boucles supraconductrices et spin contrôlé d'électrons	Recuit d'électrons	D-Wave	CA	277	281	4	1,4 %	724	3,88
		NEC	JP	96	112	16	16,7 %	n.c	n.c
		Qilimanjaro	ES	0	2	2	n.c	n.c	n.c
	Supraconducteur	IBM (International Business Machines)	US	927	1 060	133	14,3 %	2 000	5,30
		Origin Quantum	CN	309	804	495	160,2 %	138	58,26
		Baidu	CN	103	357	254	246,6 %	n.c	n.c
		Alphabet (Google)	US	200	218	18	9,0 %	600	3,63
		Fujitsu	JP	94	127	33	35,1 %	n.c	n.c
		Rigetti & Co	US	102	111	9	8,8 %	656	1,69
		IQM Quantum Computers	FI	53	83	30	56,6 %	233,8	3,55
		Alibaba	CN	41	73	32	78,0 %	n.c	n.c
		Amazon	US	37	41	4	10,8 %	300	1,37
		Anyon	ES	6	12	6	100,0 %	n.c	n.c
		Alice&Bob	FR	3	8	5	166,7 %	58,1	1,38
		Nord Quantique	CA	2	4	2	100,0 %	n.c	n.c
		qci (Quantum circuits)	US	3	3	0	0,0 %	n.c	n.c
	Atlantic Quantum	US	0	1	1	n.c	n.c	n.c	
	OQC (Oxford Quantum Circuits)	UK	1	1	0	0,0 %	150	0,07	
	Silicium	Intel	US	146	153	7	4,8 %	300	5,10
		Equal1.Jabs	IR	35	37	2	5,7 %	n.c	n.c
		Quantum Motion	UK	12	15	3	25,0 %	50	3,00
		Silicon Quantum Computing	AU	7	10	3	42,9 %	86,3	1,16
		Diraq	AU	5	6	1	20,0 %	n.c	n.c
		QpiAI	IN	3	4	1	33,3 %	n.c	n.c
		C12 Quantum Electronics	FR	0	4	4	n.c	n.c	n.c
	Quobly	FR	0	0	0	n.c	19	0,00	
Vacances	NTT (Nippon Telegraph and Telephone)	JP	74	94	20	27,0 %	n.c	n.c	
	Photonic	CA	9	17	8	88,9 %	108	1,57	
	TuringQ	CN	1	8	7	700,0 %	14	5,71	
	Quantum brilliance	AU	1	1	0	0,0 %	n.c	n.c	
Topologique	Microsoft	US	221	250	29	13,1 %	620	4,03	
	Quoherent	US	1	1	0	0,0 %	n.c	n.c	
Photon	Photon	PsiQuantum (Quantum Corp)	US	66	71	5	7,6 %	1 700	0,42
		ORCAcomputing	UK	9	20	11	122,2 %	n.c	n.c
		Xanadu	CA	16	20	4	25,0 %	235	0,85
		Quix Quantum	NL	0	3	3	n.c	n.c	n.c
		Quandela	FR	0	2	2	n.c	74,3	0,27

Dynamique de co-dépôts

Depuis 2016, on observe une tendance à la hausse dans les co-dépôts de brevets dans le domaine quantique, bien que cette pratique reste encore minoritaire.



Les inventions liées au matériel quantique et aux codes de correction d'erreurs se distinguent par une proportion plus élevée de co-dépôts, atteignant 8 % des brevets dans ces domaines.

Une différence notable apparaît dans les pratiques de co-dépôt entre les secteurs académique et industriel, et selon les régions du monde :

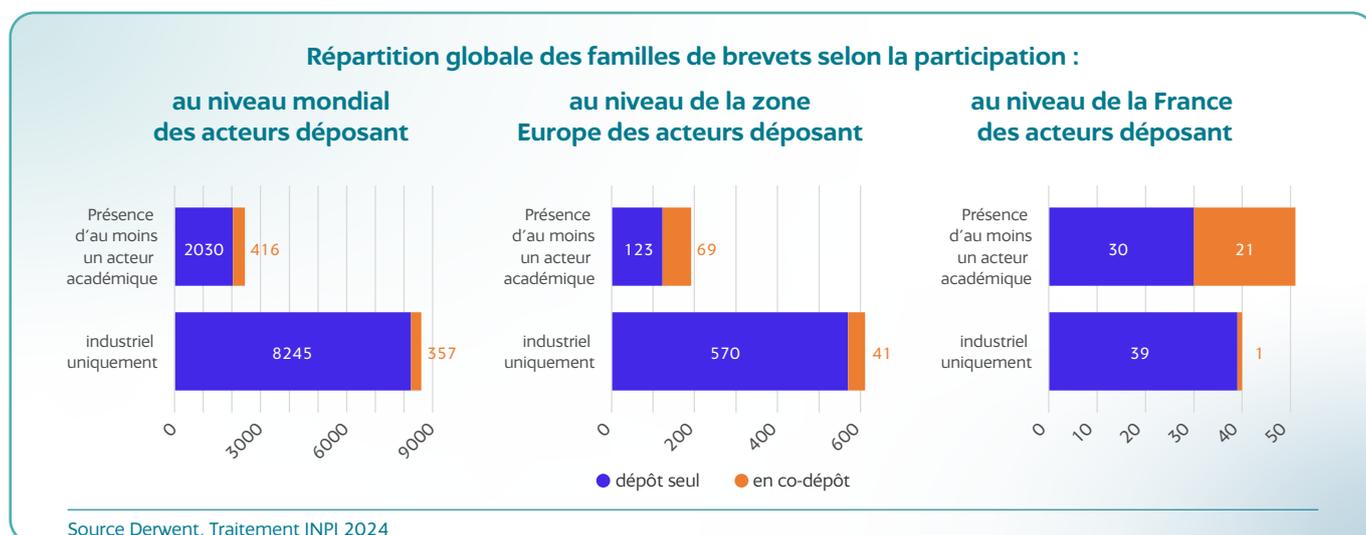
À l'échelle mondiale, 17 % des familles de brevets impliquent une collaboration avec le secteur académique, contre 4 % pour les partenariats exclusivement privés.

La zone Europe affiche un taux global de co-dépôts de 14 %,

avec des proportions plus élevées : 36 % pour les coopérations académiques et 7 % pour les alliances entre entreprises

En France, sur 91 familles de brevets, un quart sont des co-dépôts. Parmi ceux-ci, 40 % des brevets résultent d'un partenariat avec le milieu universitaire, tandis que seulement 3 % émanent de collaborations uniquement privées.

Ces chiffres soulignent l'importance des collaborations dans le monde académique dans le domaine de l'informatique quantique, reflétée par les dépôts de brevets, tout en révélant des variations significatives entre les différentes régions du monde.



2. INFORMATIONS RELATIVES AUX PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

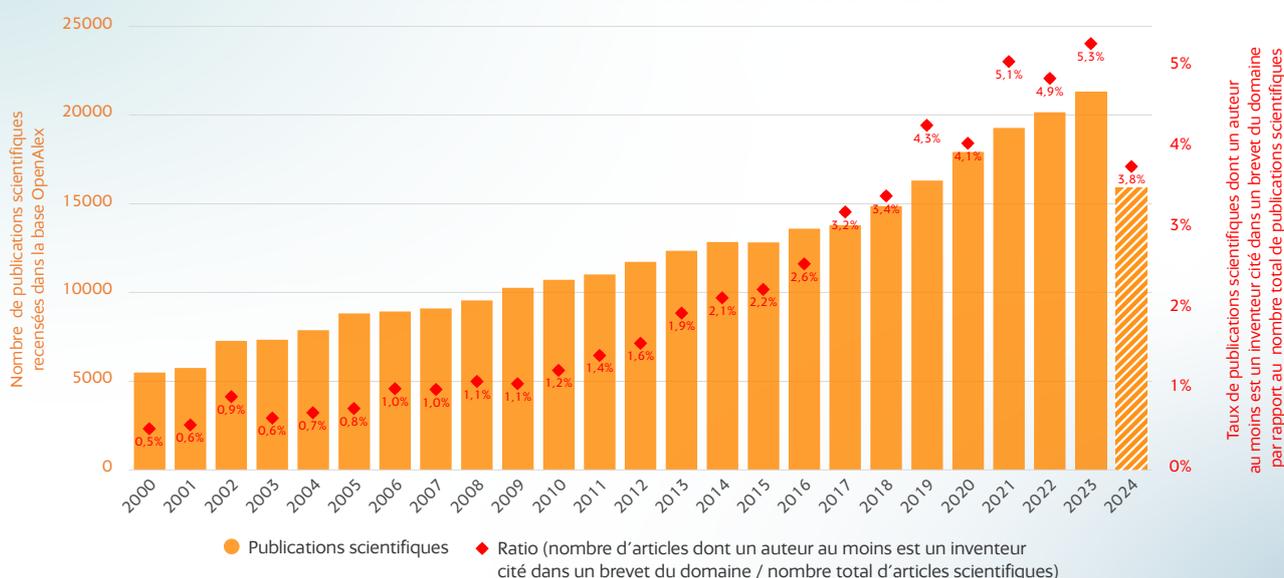
À partir des informations contenues dans les brevets, notamment les données sur les inventeurs, une analyse a été menée pour identifier les relations entre les publications scientifiques et les publications de brevets dans ce domaine. Pour réaliser cette étude, des recherches ont été effectuées dans la base de données OpenAlex, créée en 2022. Cette base est reconnue pour son accès libre et l'indexation d'environ 250 millions de travaux scientifiques provenant de quelques 90 millions d'auteurs et 100 000 institutions.

1 - INFORMATIONS GÉNÉRALES

Echantillon complet

L'analyse des données d'OpenAlex pour la période 2000-2024 révèle une croissance significative des publications scientifiques dans le domaine des calculs, processeurs et de l'informatique quantique, avec environ 304 900 articles recensés. Cette évolution se caractérise par une augmentation de 290 % du nombre d'articles entre 2000 et 2023, avec une accélération notable à partir de 2017. La croissance annuelle moyenne, initialement d'environ 5 % jusqu'en 2017, s'est ensuite élevée à 6,5 %. En 2023, le volume de publications a doublé par rapport à 2010.

Évolution du nombre d'articles scientifiques dans le domaine de l'informatique quantique et part des articles provenant de chercheurs également cités comme inventeurs dans des brevets du domaine



Source OpenAlex, Traitement INPI 2024

L'analyse révèle une tendance croissante dans la proportion d'articles publiés par des chercheurs également cités comme inventeurs dans des brevets. Cette part a atteint 5,3 % en 2023. Cette tendance indique une évolution dans le domaine de l'informatique quantique, où les découvertes scientifiques se traduisent de plus en plus en applications concrètes et en inventions brevetables. Cette progression est en ligne avec l'avancement observé dans la maturité technologique des qubits, illustrant un rapprochement entre la recherche fondamentale et le développement d'innovations pratiques dans ce secteur.

Corpus des publications académiques dont l'un des auteurs est mentionné dans un brevet comme inventeur

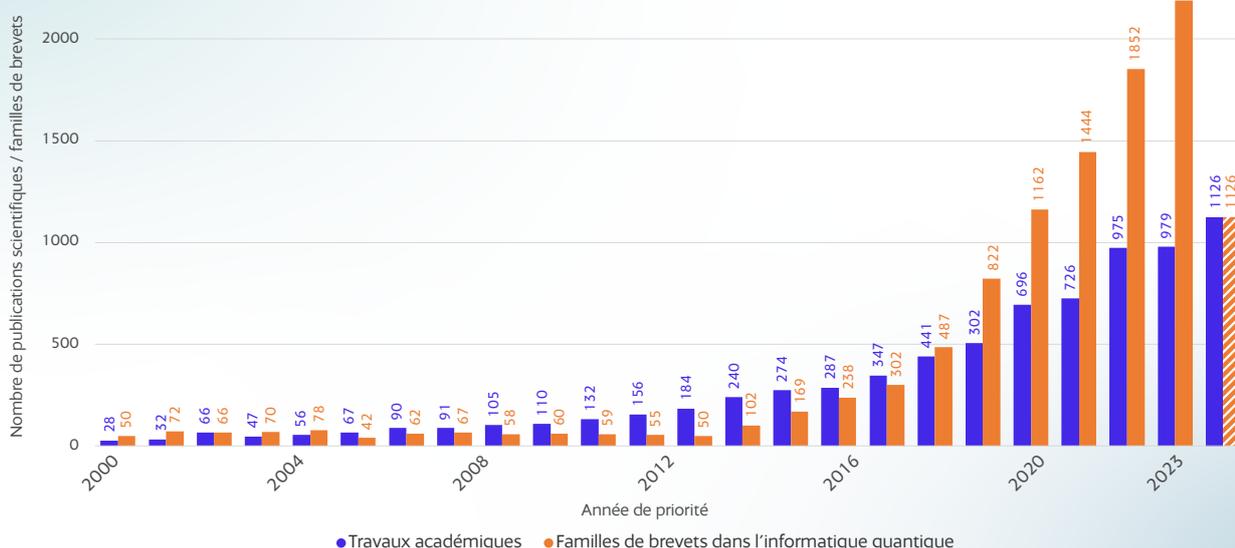
La suite de cette analyse se concentre sur le corpus spécifique de publications académiques présentant un lien direct avec les brevets étudiés. Ce lien est établi lorsqu'au moins un des auteurs d'une publication scientifique est également mentionné comme inventeur dans les familles de brevets examinées. Cette approche permet d'explorer l'intersection entre la recherche académique et l'innovation brevetée dans le domaine quantique.

- ▶ Près de 116 000 publications scientifiques uniques liées aux technologies quantiques ont été identifiées. La sélection de ces publications s'est basée sur la présence du terme « quantum » dans leur titre ou résumé, ou sur leur association à ce concept dans leur classification.

- ▶ Parmi ces travaux, approximativement 8 400 sont spécifiquement dédiés au calcul quantique, aux processeurs quantiques ou aux ordinateurs quantiques⁷.
- ▶ Ces travaux impliquent la contribution de près de 3 140 auteurs qui sont également cités comme inventeurs dans les familles de brevets étudiées⁸ du périmètre informatique quantique.

Entre 2003 et 2018, ce corpus a connu une croissance remarquable de 1 000 %. Depuis la croissance annuelle moyenne de ces travaux académiques est de 16 % (contre 11 % pour les familles de brevets).

Nombre de publications scientifiques dans la base OpenAlex et de familles de brevets par année de priorité dans le domaine de l'informatique et le calcul quantique sur la même population d'inventeurs et d'auteurs



Sources Derwent, OpenAlex, Traitement INPI 2024

À partir de 2017, bien que la croissance annuelle moyenne de ce corpus atteigne 17 %, le nombre de familles de brevets a dépassé celui des publications scientifiques correspondantes, une tendance qui s'est maintenue chaque année depuis. Cette évolution s'accompagne d'un changement dans le rapport entre ces travaux académiques et les familles de brevets. Depuis 2020, on observe environ deux familles de brevets déposées pour une publication scientifique de ce corpus. En 2022, ce ratio a atteint 2,2 familles de brevets pour une publication.

Cette évolution reflète, parmi les chercheurs impliqués dans le dépôt de brevets, une orientation progressive de la recherche fondamentale vers l'innovation appliquée. On observe l'attention crois-

sante, à l'échelle mondiale, portée sur la protection de la propriété industrielle et la commercialisation des technologies, qui rivalisent avec les publications académiques, indicatrice de la maturation du domaine de l'informatique quantique.

Parallèlement, l'analyse de ce corpus révèle des tendances collaboratives notables depuis 2020. Au cours de la dernière décennie, 96 % de ces travaux ont été réalisés en collaboration entre plusieurs auteurs.

Cette étude a également permis d'identifier environ 1 900 entités distinctes auxquelles ces auteurs-inventeurs sont affiliés, dont 120 sont françaises⁹.

⁷ Mots clés utilisés dans OpenAlex : « quantum computer », « quantum computation », « quantum computing », « quantum processing », « quantum processed », « quantum processor », « quantum process », « quantum calcul », « quantum processable », « quantum calculation », « quantum calculate », « quantum calculator », « quantum calculative », « quantum calculating »

⁸ Sur l'ensemble des 116 000 publications, on dénombre environ 10 400 auteurs distincts. Parmi ceux-ci, 870 ont des patronymes en caractères chinois ou coréens

⁹ L'analyse des affiliations institutionnelles dans cette étude a été réalisée par une approche d'harmonisation des noms d'établissements

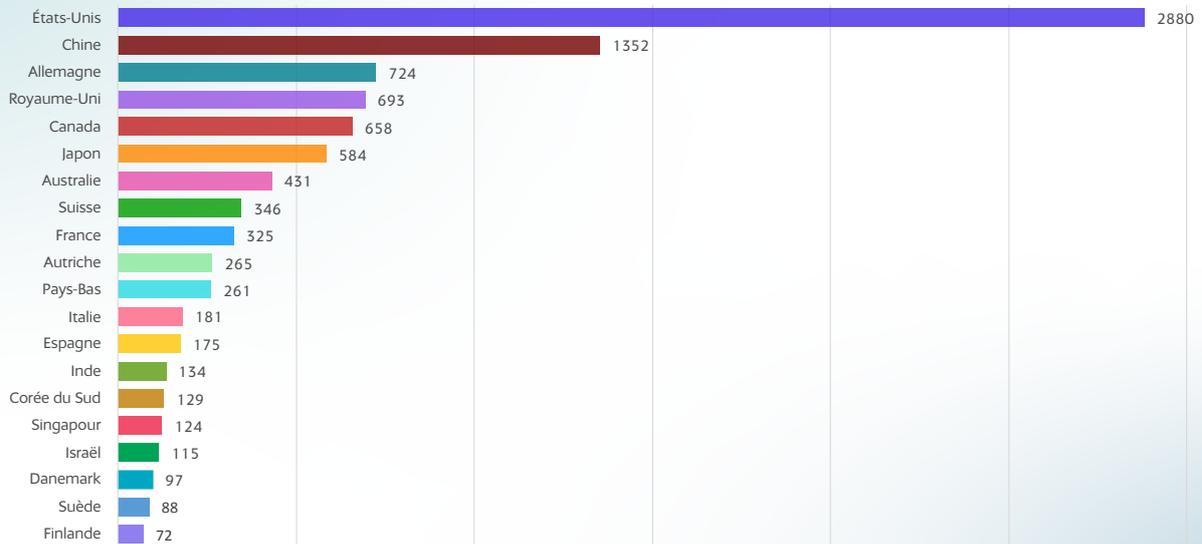
2 - CLASSEMENTS INTERNATIONAUX

Dans le corpus spécifique des publications dont les auteurs sont également inventeurs de brevets, le classement des pays par nombre de publications révèle une domination nette des

États-Unis, avec plus du double des publications de la Chine, en deuxième position.

La France se positionne au 9^{ème} rang.

Classement des 20 premiers pays selon le nombre de publications scientifiques par chercheurs affiliés aux entités des pays



Source OpenAlex, Traitement INPI 2024

Sur la base du nombre de ces publications affiliées, les dix principaux acteurs mondiaux dans le domaine de l’informatique quantique, sont les suivants :

Classement mondial des principales institutions en fonction du nombre de travaux issus de chercheurs également cités comme inventeurs dans des brevets du domaine de l’informatique quantique

Institution	Publications scientifiques dans le domaine de l’informatique quantique, basées sur le nombre de travaux publiés par leurs chercheurs affiliés	Familles de brevets dans l’informatique quantique depuis 2000
MIT (Institut Technologique du Massachusetts) 🇺🇸	277	76
Université des Sciences et Technologies de Chine 🇨🇳	273	0
Université du Maryland College Park 🇺🇸	215	194
Université de Harvard 🇺🇸	194	44
Institut de Technologie de Californie 🇺🇸	186	28
Université de Tsinghua 🇨🇳	184	78
Université de Waterloo 🇨🇦	182	0
Université de Chicago 🇺🇸	172	32
Université Technique de Delft 🇳🇱	170	0
ETH Zürich (École polytechnique fédérale de Zurich) 🇨🇭	167	4

Sources Derwent, OpenAlex, Traitement INPI 2024

Parmi les dix principaux acteurs mondiaux identifiés dans ce corpus, le Commissariat à l’Énergie Atomique et aux Énergies Alter-

natives (CEA) est le premier représentant français, occupant la 11^{ème} place avec 166 publications.

Les quinze entités françaises les plus représentées dans ce corpus spécifique sont des entités académiques. On note que la société ATOS se classe au 16^{ème} rang avec 12 publications. :

Classement français des principales institutions en fonction du nombre de travaux issus de chercheurs également cités comme inventeurs dans des brevets du domaine de l'informatique quantique

	Publications scientifiques dans le domaine de l'informatique quantique, basées sur le nombre de travaux publiés par leurs chercheurs affiliés	Familles de brevets dans l'informatique quantique depuis 2000
CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives)	166	45
CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique)	133	38
Sorbonne Université	53	0
Université Paris-Saclay (dont Université Paris Sud)	47 (17)	0
Université Grenoble Alpes	43	0
Université Paris Cité	39	14
Institut polytechnique de Grenoble	31	2
École Normale Supérieure - PSL	28	0
Institut Néel	26	0
Laboratoire Charles Fabry - Palaiseau	19	0
Laboratoire Kastler Brossel	17	0

Sources Derwent, OpenAlex, Traitement INPI 2024

Les dix premières entités américaines sont :

Classement américain des principales institutions en fonction du nombre de travaux issus de chercheurs également cités comme inventeurs dans des brevets du domaine de l'informatique quantique

	Publications scientifiques dans le domaine de l'informatique quantique, basées sur le nombre de travaux publiés par leurs chercheurs affiliés	Familles de brevets dans l'informatique quantique depuis 2000
MIT (Institut Technologique du Massachusetts)	277	76
Université du Maryland College Park	215	194
Université de Harvard	194	44
Institut de Technologie de Californie	186	28
Université de Chicago	172	32
Université de Californie, Berkeley	150	18
Microsoft	149	250
Université de Yale	148	42
Université de Californie, Santa Barbara	140	6
Joint Quantum Institute	137	0

Sources Derwent, OpenAlex, Traitement INPI 2024

Aux États-Unis, 415 structures sont affiliées à des auteurs de ce corpus. Alphabet (Google) et IBM se distinguent respectivement aux 12^{ème} rang (avec 129 travaux académiques) et 15^{ème} rangs (avec 88 travaux académiques), derrière les universités de Princeton (124) et de Stanford (118).

Au Japon, parmi les 90 entités recensées, les organismes de recherche et les universités dominent largement le classement. L'institut national de recherche scientifique RIKEN se distingue en 1^{ère} position avec 115 publications attribuées à ses inventeurs-chercheurs, suivi de l'Université de Tokyo avec 106 publications. NTT (Nippon Telegraph and Telephone) se classe au 9^{ème} rang avec 36 publications (il détient aussi 94 familles de brevets), tandis que Toshiba est en 11^{ème} position avec 31 publications (et 113 familles de brevets).

Dans le paysage allemand, qui compte 161 structures identifiées, l'université RWTH d'Aix-la-Chapelle arrive en tête avec 65 publications (aucun portefeuille de brevets dans le domaine). Les établissements d'enseignement supérieur dominent presque entièrement ce classement. Le Centre de Recherche de Jülich, qui se classe 3^{ème} avec 55 publications (aucun portefeuille de brevets), fait partie des institutions qui bénéficieront prochainement d'un processeur quantique développé par Pasqal¹². La présence des entreprises est plus discrète. Siemens occupe la 30^{ème} place avec 11 publications, suivie par Volkswagen à la 34^{ème} place avec 10 publications, et IQM à la 42^{ème} place avec 7 publications.

En ce qui concerne le Royaume-Uni, 87 entités ont été identifiées. L'Université d'Oxford se distingue avec 164 publications, presque le double de l'University College London, qui est 2^{ème} avec 87 publications. La société Riverlane se classe 12^{ème} avec 19 publications, tandis qu'Element Six et Quantum Motion Technologies affichent chacune 17 publications.

Ainsi, dans ce corpus de publications dont les auteurs sont également inventeurs de brevets, on observe une contribution notable des entreprises privées dans tous les pays étudiés. Cependant, les États-Unis se distinguent par un phénomène particulièrement marqué. Les géants industriels américains, déjà leaders en matière de portefeuilles brevets, montrent une implication significative dans cette intersection entre recherche académique et innovation brevetée. Deux exemples illustrent cette tendance :

- ▶ Dans ce corpus, Alphabet (Google) présente un volume de publications académiques comparable à celui du CNRS.
- ▶ Les chercheurs affiliés à IBM contribuent à deux fois plus de publications de ce type que ceux de l'Université Grenoble Alpes.

3 - INFORMATIONS RELATIVES AUX COLLABORATIONS

L'analyse suivante examine les collaborations internationales dans le corpus des articles scientifiques dont au moins un auteur est également répertorié comme inventeur dans un brevet.

La Chine se distingue par une collaboration internationale limitée. Plus de la moitié des publications sont purement nationales, un quart implique un seul partenaire étranger.

Les États-Unis affichent une forte production nationale, avec 45 % des publications (plus de 900) impliquant uniquement des institutions américaines. Environ un tiers des publications est réalisé en partenariat avec un seul autre pays.

Le Japon présente un profil équilibré : 65 % des publications sont purement nationales, tandis que 30 % impliquent au moins une entité étrangère.

Le Royaume-Uni montre une ouverture internationale plus marquée, avec 85 % des publications réalisées en collaboration avec d'autres pays. Près d'un tiers de ces collaborations implique un seul partenaire étranger, majoritairement aux États-Unis.

L'Allemagne se révèle également très ouverte à la collaboration internationale, avec 87 % de ses publications impliquant des partenaires étrangers.

L'Espagne se démarque par une forte propension à la collaboration internationale, avec seulement 2 % de ses publications limitées aux institutions nationales.

La France affiche un taux de collaboration internationale élevé de 85 % de publications impliquant des partenaires étrangers, comparable à celui de l'Allemagne et du Royaume-Uni. Un tiers de ces collaborations se font avec deux pays différents, et près d'une publication sur cinq implique trois pays.

4 - INFORMATIONS SUR LES AUTEURS

Dans ce corpus spécifique de publications dont les auteurs sont également inventeurs de brevets, les contributeurs les plus prolifiques ont produit entre 30 et 43 articles chacun. Leurs affiliations principales sont des institutions académiques, avec une prédominance chinoise (6 sur les 10 premiers), suivies par des institutions nord-américaines et allemandes.

Les organisations les plus représentées dans ce corpus incluent :

- ▶ **Des universités chinoises** : Sciences et Technologies (Pékin, Heifei notamment), Postes et Télécommunications (Xi'an, Pékin), Géosciences et l'Académie des Sciences de l'Information Quantique de Pékin.
- ▶ **Des institutions nord-américaines** : NASA, Pacific Northwest National Laboratory, Universités de Toronto, Washington et Texas à El Paso.
- ▶ **Des institutions allemandes** : Institut pour l'information quantique (Université RWTH d'Aix-la-Chapelle) et Institut Peter Grünberg pour la Nanoélectronique Théorique (Centre de Recherche de Jülich).
- ▶ **Des entreprises privées** : Intel et IonQ aux États-Unis et la startup Coherent Computing Inc.

12 Voir la fiche dédiée à l'entreprise Pasqal



LES FINANCEMENTS ÉTRANGERS DANS LES TECHNOLOGIES DU QUANTIQUE ET L'ORDI-NATEUR QUANTIQUE

La course mondiale aux technologies quantiques s'intensifie, avec des investissements massifs de la part des gouvernements et du secteur privé. Selon un rapport récent publié sur le site de la société IQM Quantum Computers, 33 pays se sont engagés à investir entre 40 et 50 milliards de dollars dans ce domaine pour la période 2024-2034. Parmi eux, 20 pays ont déjà établi des feuilles de route spécifiques¹³.

États-Unis :

- ▶ Les États-Unis ont lancé le National Quantum Initiative Act¹⁴ en 2018, qui représente un programme national quantique majeur. Ce programme bénéficie d'un budget de 1,2 milliard de dollars sur cinq ans et vise à maintenir le leadership américain dans le domaine de l'informatique quantique. Plusieurs agences, dont la National Science Foundation (NSF), le Department of Energy (DOE) et le National Institute of Standards and Technology (NIST), sont impliquées dans cette initiative. Par ailleurs, des entreprises comme IBM, Alphabet (Google) et Microsoft investissent massivement dans la recherche quantique.
- ▶ En août 2020, le gouvernement américain a annoncé un plan d'investissement dans l'informatique quantique et l'intelligence artificielle¹⁵, s'élevant à près d'un milliard de dollars. Ce programme comprend 625 millions de dollars alloués par le ministère de l'Énergie pour financer la création de 12 nouveaux centres de recherche sur cinq ans, spécifiquement axés sur l'informatique quantique. En complément, 340 millions de dollars proviennent des secteurs privé et académique, illustrant ainsi une collaboration entre les différentes parties prenantes pour stimuler l'innovation.
- ▶ Une coalition dirigée par le Chicago Quantum Exchange a reçu en avril 2024 une subvention de 1 million de dollars de la NSF¹⁶ dans le cadre du programme Regional Innovation Engines. Cette subvention vise à renforcer les technologies quantiques dans le Midwest, à approfondir les partenariats et à élaborer des stratégies pour traduire la recherche en applications concrètes, ainsi qu'à former une main-d'œuvre pour l'économie quantique émergente. Cette subvention fait partie du premier concours NSF Engines, établi par le CHIPS and Science Act de 2022, qui vise à maintenir la compétitivité des États-Unis dans les technologies clés. Elle intervient après la désignation de Chicago comme pôle technologique américain pour les technologies quantiques.

Chine :

La stratégie chinoise dans le domaine quantique met l'accent sur l'autosuffisance technologique, visant à réduire la dépendance aux technologies étrangères. Dans ce contexte, le pays semble investir massivement.

- ▶ Dans un rapport d'activité de 2024, le gouvernement chinois aurait annoncé un plan d'investissement¹⁷ de 10 milliards de dollars sur 5 ans dans les technologies quantiques, mais ce chiffre doit être pris avec précaution en raison de l'absence de source officielle pour le vérifier et du risque de surestimation.
- ▶ Le développement des technologies quantiques a été désigné comme une priorité nationale dans le 14^{ème} plan quinquennal chinois couvrant la période 2021-2025.
- ▶ La Chine a établi des centres de recherche quantique majeurs dans les villes de Hefei et Shanghai, démontrant son engagement dans ce domaine.
- ▶ Des entreprises chinoises spécialisées dans le quantique, comme Origin Quantum, bénéficient d'importants financements, avec notamment une levée de fonds de 148 millions de dollars en 2024.

Japon :

- ▶ Le Japon a lancé une initiative quantique nationale qui comprend des investissements s'élevant à plusieurs centaines de millions de dollars.
- ▶ En 2023, le gouvernement japonais a annoncé un investissement de 4,2 milliards de yens (équivalent à environ 31,7 millions de dollars américains)¹⁸ pour soutenir l'expansion de l'informatique quantique partagée par le biais d'une plateforme dans le cloud accessible aux entreprises.

Canada

- ▶ Le Canada a investi plus d'un milliard de dollars canadiens entre 2012 et 2022 dans la science quantique.
- ▶ En janvier 2023, le gouvernement a lancé la Stratégie quantique nationale du Canada qui prévoit un investissement de 360 millions de dollars canadiens (environ 260 millions de dollars américains) sur sept ans¹⁹.
- ▶ La stratégie canadienne se concentre sur trois piliers principaux : la recherche, la commercialisation et le développement des talents. Elle vise également à développer des capacités souveraines dans le domaine quantique, renforçant ainsi l'autonomie technologique du pays.

Europe :

- ▶ Le Quantum Flagship, lancé en 2018, est un programme européen²⁰ doté d'un budget d'un milliard d'euros sur

13 Source : IQM Quantum Computers, « *The 2024 State of Quantum* », Janvier 2024

14 Source : Congrès américain, 2017-2018 « *H.R.6227 - An act to provide for a coordinated Federal program to accelerate quantum research and development for the economic and national security of the United States* » et site du *National Quantum Initiative*

15 Source : « *White House announces \$1B investment for AI and quantum computing hubs* », TechCrunch

16 Source : National Science Foundation (NSF), « *NSF Engines Development Award: Advancing quantum technologies in the Midwest (IL, WI)* »

17 Sources multiples, dont La Tribune : « *La Chine prévoit de mettre l'accent sur l'informatique quantique et l'IA* »

18 Source : Team France Export, « *Le Japon offre une aide de 30 M USD pour le service cloud d'ordinateurs quantiques pour l'industrie et la finance* », Mai 2023

19 Source : Gouvernement du Canada, « *Canada's National Quantum Strategy* » Janvier 2023

20 Source : Commission européenne, « *The Quantum Technologies Flagship* »



dix ans. Il vise à consolider et à étendre le leadership scientifique européen dans le domaine quantique, en réunissant institutions de recherche, industriels et financeurs publics.

- ▶ Dans le cadre du programme Horizon Europe 2023-2024, la Commission européenne a annoncé un financement de plus de 112 millions d'euros pour des projets dans les domaines de l'intelligence artificielle (IA) et des technologies quantiques²¹.

Sur ce montant total, 40 millions d'euros sont spécifiquement alloués à la recherche dans le développement de l'informatique quantique, des capteurs quantiques, de la communication quantique et de la métrologie quantique.

25 millions d'euros sont destinés au développement d'un réseau européen de gravimètres quantiques. Ce réseau comprendra au moins huit gravimètres et vise à démontrer la supériorité de la gravimétrie quantique par rapport aux technologies classiques.

15 millions d'euros sont consacrés à stimuler la recherche et le développement transnationaux dans les technologies quantiques de nouvelle génération.

31 pays de la zone Europe ont élaboré des plans pour financer le développement de leur secteur des technologies quantiques²². Notamment :

Royaume-Uni

- ▶ Le Royaume-Uni a lancé en 2014 le National Quantum Technologies Programme (NQTP)²³ pour renforcer son engagement dans le domaine des technologies quantiques et traduire la recherche académique en technologies quantiques commercialisables.
- ▶ Ce programme prévoit un investissement d'environ 1 milliard de livres sterling (1,2 milliard d'euros) sur une période de dix ans.

- ▶ Le NQTP cherche à stimuler l'économie britannique en positionnant le pays comme un leader mondial dans les marchés émergents des technologies quantiques et à améliorer les capacités technologiques du Royaume-Uni dans ce domaine.

- ▶ Le programme repose sur une collaboration dynamique entre l'industrie, le milieu universitaire et le gouvernement.

- ▶ En 2023, le gouvernement britannique a annoncé une nouvelle stratégie quantique nationale, s'engageant à dépenser 2,5 milliards de livres sterling (3 milliards d'euros) sur les dix prochaines années pour la recherche et l'innovation liées aux technologies quantiques.

Allemagne

- ▶ En avril 2023, le gouvernement fédéral allemand a adopté un plan d'investissement d'environ 2,18 milliards d'euros pour le développement des technologies quantiques destiné à renforcer la recherche et le développement dans le domaine des technologies quantiques, y compris l'informatique quantique²⁴.

- ▶ Le « Concept d'action pour les technologies quantiques » a été présenté au Bundestag en mai 2023, soulignant l'ambition de placer l'Allemagne « au sommet dans le domaine des technologies quantiques ».

- ▶ Le gouvernement allemand a fixé des étapes pour réaliser ce cadre d'ici 2026, avec notamment la mise à disposition d'ordinateurs quantiques universels compétitifs au niveau international.

- ▶ En plus des 2,18 milliards d'euros provenant du gouvernement, les organisations scientifiques doivent contribuer à hauteur de 850 millions d'euros supplémentaires.

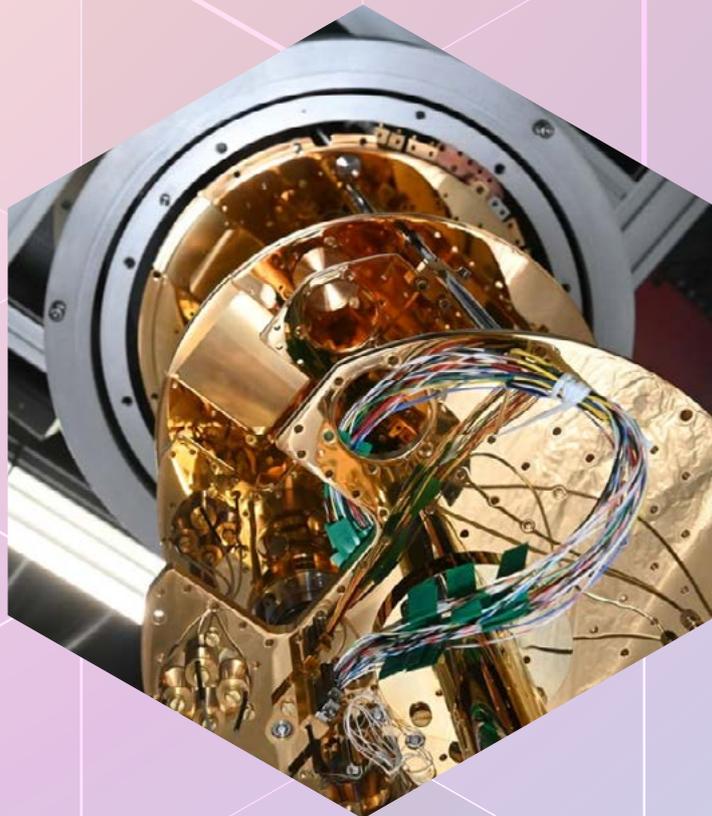
²¹ Source : « La Commission investit 112 millions d'euros dans l'intelligence artificielle et la recherche et l'innovation quantiques », Avril 2024

²² Source : QUANTERA, « Quantum Technologies Public Policies in Europe », 2023

²³ Source : Sites officiels des programmes « UK National Quantum Technologies Programme (NQTP) » et « Quantum computing & Simulation Hub »

²⁴ Source : Ambassade de France en Allemagne, « L'Allemagne veut s'assurer une place de leader mondial dans les technologies quantiques », 26 avril 2023

Crédits : C12 Quantum Electronics



PORTRAIT

C12 QUANTUM ELECTRONICS

LA PIONNIERE DANS L'USAGE DES
NANOTUBES DE CARBONE

C12 QUANTUM ELECTRONICS

LA PIONNIERE DANS L'USAGE DES NANOTUBES DE CARBONE

Créée en 2020 par Pierre et Matthieu Desjardins, deux frères polytechniciens, C12 Quantum Electronics est une startup française issue du laboratoire de physique de l'École Normale Supérieure de Paris. Forte de plus de dix ans de recherches menées par des experts tels que Takis Kontos, Matthieu Delbecq et Jérémie Viennot, tous cofondateurs et membres du comité scientifique, la startup se distingue dans le domaine de l'informatique quantique grâce à une technologie novatrice : l'utilisation de nanotubes de carbone pour améliorer la stabilité des qubits.

UNE TECHNOLOGIE PROMETTEUSE : LES QUBITS DANS LES NANOTUBES DE CARBONE

C12 Quantum Electronics a pour objectif de construire un ordinateur quantique universel avec une fidélité élevée en piégeant des électrons dans des nanotubes de carbone pour créer des qubits de spin. L'enjeu clé de cette approche réside dans la réduction de la décohérence des qubits, un problème majeur dans l'informatique quantique. Les nanotubes de carbone, grâce à leur capacité à isoler les qubits de leur environnement, permettraient de limiter les erreurs de calcul en réduisant les interactions perturbatrices. En 2023, la startup a démontré la faisabilité de qubits avec des temps de cohérence supérieurs d'au moins un ordre de grandeur à ceux de l'état de l'art. Cette avancée est significative dans le domaine des technologies quantiques, car elle indique que les qubits développés par C12, basés sur des nanotubes de carbone, offrent des performances améliorées en termes de stabilité et de durée de cohérence par rapport aux technologies existantes.

C12 a développé des innovations dans le domaine des systèmes quantiques, notamment des procédés pour manipuler des nano-objets et les transférer sur des circuits électroniques, des composants quantiques, ainsi que des méthodes de calibrage. L'entreprise possède un portefeuille de 9 brevets répartis en 4 familles ainsi que des demandes en cours, selon les responsables. Ce portefeuille inclut un brevet co-déposé avec l'université de Lorraine et le CNRS sur un composant magnétique quantique. Ces brevets visent à consolider la position de C12 dans un secteur où la compétition internationale est forte.

UNE STRATÉGIE PI AU SERVICE DE LA CONFIANCE DES INVESTISSEURS

La stratégie de propriété intellectuelle est en premier lieu guidée par la nécessité de garantir la liberté d'exploitation des technologies développées. Elle s'intègre également à d'autres actifs intellectuels afin de renforcer au maximum la protection des innovations. L'entreprise a notamment établi un comité interne de propriété intellectuelle chargé de traiter les questions liées à ce domaine

Depuis ses débuts, C12 Quantum Electronics a accordé de l'importance à la protection de ses actifs immatériels, en s'appuyant sur un ensemble de droits de propriété intellectuelle, incluant des brevets. Cette démarche lui a permis de s'imposer sur le marché et de rassurer les investisseurs, facilitant ainsi une première levée de fonds de 10 millions d'euros en phase d'amorçage en juin 2021 auprès de Bpifrance, Airbus Ventures ou encore Octave Klaba, le fondateur d'OVHcloud, notamment.

Outre cette levée de fonds, C12 quantum Electronics a également obtenu une subvention de 2,5 millions d'euros du Conseil Européen de l'Innovation (EIC) en juin 2022.

En juin 2023, C12 Quantum Electronics a été sélectionnée parmi les 125 lauréats de la première promotion French Tech 2030. Ce programme vise à soutenir des startups innovantes qui répondent aux objectifs stratégiques de France 2030, en mettant l'accent sur le renforcement de la souveraineté industrielle et technologique française.

En juin 2024, la startup a levé 18 millions d'euros auprès d'investisseurs historiques (360 Capital, Bpifrance, BNP Paribas Développement) et de nouveaux investisseurs (Varsity Capital, EIC Fund, Verve Ventures) pour accélérer ses développements. Ce financement servira à poursuivre ses travaux de R&D, notamment la démonstration de l'intrication de deux qubits distants, une avancée clé pour prouver la viabilité de leur technologie.

La startup indique que sa démarche en matière de propriété intellectuelle a contribué à rassurer les investisseurs lors de la phase d'amorçage. Elle considère que cette démarche a également renforcé sa crédibilité auprès de potentiels partenaires, facilitant ainsi l'établissement de nouvelles relations. De plus, l'entreprise estime que cela a soutenu sa capacité à attirer des financements supplémentaires.

DÉVELOPPEMENT INDUSTRIEL ET PARTENARIATS

Un an après l'inauguration de sa première ligne de production au cœur de Paris, la startup continue de structurer son réseau de partenaires industriels pour accélérer le développement de ses technologies et leurs applications. Interrogée sur ses collaborations avec les acteurs de l'industrie, l'entreprise a mentionné son récent accord avec Air Liquide, visant à explorer les applications de l'informatique quantique dans le secteur chimique. Elle s'appuie sur son portefeuille de propriété intellectuelle, associé à son expertise technique, pour attirer des partenariats stratégiques et progresser vers la commercialisation.

1. INFORMATIONS RELATIVES AUX DÉPÔTS DE BREVETS ET AUX DÉPOSANTS

En informatique quantique, comme en informatique classique, le compilateur est l'outil qui traduit le code source écrit dans un langage de programmation de haut niveau en code machine exécutable par l'ordinateur. Cependant, dans le contexte quantique, la compilation représente un défi technique majeur, bien plus complexe que son équivalent classique. Cette complexité découle des propriétés uniques des qubits, telles que la superposition et l'intrication, ainsi que de leur sensibilité à la décohérence.

Les compilateurs quantiques doivent non seulement traduire les algorithmes de haut niveau en instructions exécutables, mais aussi optimiser ces instructions pour minimiser les erreurs quantiques et maximiser l'utilisation du temps de cohérence limité des qubits. De plus, ils doivent s'adapter à diverses architectures quantiques, chacune ayant ses propres contraintes physiques et ensembles de portes logiques. La gestion de l'interaction entre les calculs quantiques et classiques ajoute une couche supplémentaire de complexité. L'absence de standards universels pour les langages de programmation quantique complique davantage le processus.

Les publications scientifiques portant sur la compilation sont relativement récentes et peu nombreuses.

Sur la période d'étude 2000-2023, le sous-domaine de la compilation représente 3,8 % des familles de brevets publiées relatives à l'informatique quantique²⁵.

On recense environ 400 familles de brevets publiées, déposées entre 2000 et 2023, avec une intensification notable à partir de 2017 (+655 %). Cette évolution récente de l'activité sur la compilation, tout comme celle sur la correction d'erreurs, est cohérente avec les avancées dans le développement des composants matériels, notamment les qubits. L'émergence des brevets sur la compilation et les codes d'erreurs coïncide avec la commercialisation et la mise à disposition des premiers ordinateurs quantiques, que ce soit via le cloud ou par vente directe.

L'analyse des brevets et des publications scientifiques sur la compilation en informatique quantique montre que les pays et régions impliqués restent similaires à ceux observés dans l'ensemble du domaine, mais avec de grandes disparités. Les États-Unis dominent clairement ce secteur, avec 58 % des familles de brevets

Évolution du nombre de familles de brevets par année de priorité dans le sous-domaine de la compilation



Source Derwent, Traitement INPI 2024

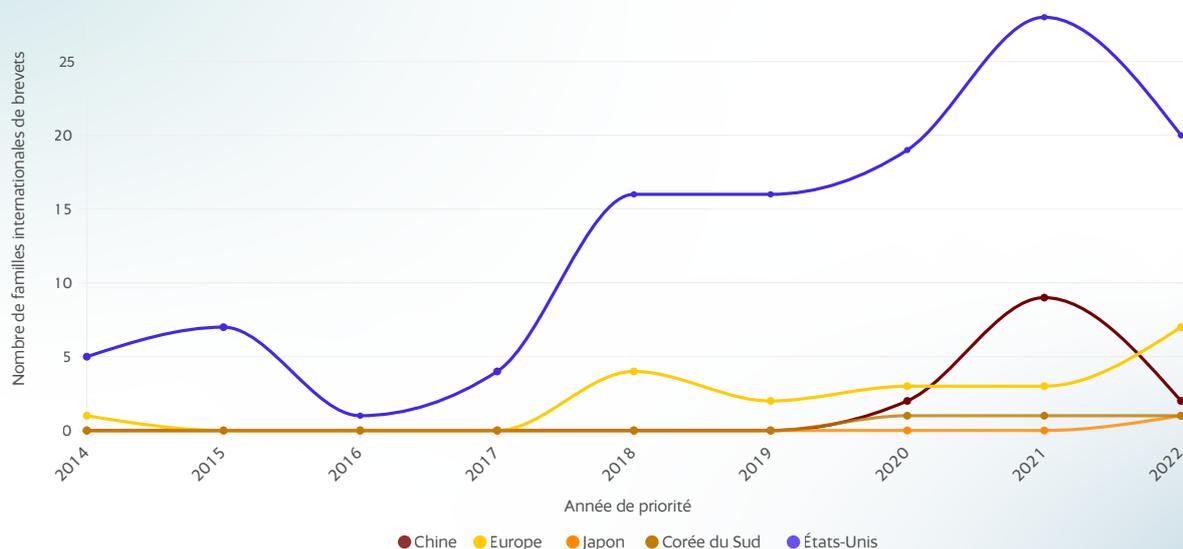
25 A noter, cette proportion est sensiblement identique (3,6 %) si on écarte les priorités chinoises de la population étudiée

sur la compilation déposées en priorité aux États-Unis entre 2000 et 2023. Cette domination américaine se manifeste également dans les publications scientifiques, où les entités américaines ont contribué à environ 160 publications.

La prépondérance des **États-Unis** dans le domaine de la compilation quantique peut s'expliquer par deux facteurs :

- Premièrement, les inventions dans ce sous-domaine ont commencé à être déposées aux États-Unis dès le début des années 2010, avec une croissance annuelle moyenne de 21 % entre 2013 et 2022.
- Deuxièmement, les États-Unis concentrent une majorité d'entreprises développant des ordinateurs quantiques complets, comme IBM, Alphabet (Google) et Microsoft, qui ont déjà établi de solides stratégies de propriété intellectuelle dans l'ensemble du domaine quantique.

Évolution du nombre de familles internationales de brevets par années de priorité et par zone de priorité dans le sous-domaine de la compilation



Source Derwent, Traitement INPI 2024

Les **acteurs chinois**, bien que moins présents dans le sous-domaine de la compilation quantique, montrent des signes de renforcement de l'activité dans ce secteur spécifique depuis 2017. Cette évolution se manifeste principalement par une stratégie de dépôt de familles internationales de brevets.

Au **niveau européen**, les familles de brevets sur la compilation sont étendues à l'international dans 91 % des cas, contre 82 % pour l'ensemble du domaine quantique.

Malgré la présence de conglomérats industriels comme Hitachi, Toshiba et NEC Corporation dans le domaine quantique, le volume de familles sous priorité japonaise ou coréenne est faible. En outre, les **acteurs japonais et sud-coréens** semblent particulièrement discrets en termes de dépôts de brevets, indépendamment de l'office de priorité choisi. Cela peut indiquer qu'ils ne se positionnent pas sur cet aspect de la chaîne de valeur de l'ordinateur quantique ou qu'ils privilégient d'autres modes de protection que le brevet.

Principales zones géographiques de dépôt de brevets dans le sous-domaine de la compilation



Source Derwent, Traitement INPI 2024

La compilation quantique se distingue par une présence académique plus marquée parmi les principaux déposants de brevets internationaux. En effet, environ 30 % des acteurs du classement des principaux déposants dans ce domaine sont issus du monde académique, contre seulement 10 % pour l'ensemble de l'informatique quantique.

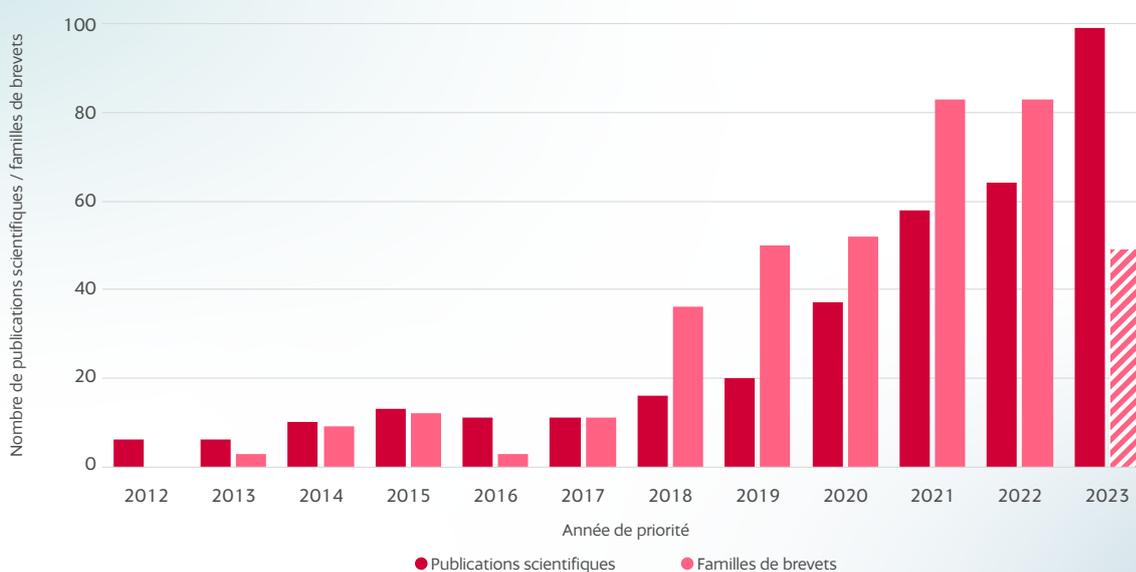
Les acteurs américains représentant plus de la moitié des principaux déposants avec un éventail diversifié d'acteurs : grands groupes technologiques (IBM, Microsoft, Amazon), universités (Maryland, Harvard) et startups spécialisées (Rigetti, Zapata). Dans ce contexte, la présence des acteurs européens est limitée.

2. INFORMATIONS RELATIVES AUX PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

Le développement de compilateurs repose en grande partie sur des méthodes mathématiques et des programmes d'ordinateur, ce qui rend la protection par brevet parfois difficile. Pour mieux caractériser l'activité de recherche et d'innovation dans ce sous-domaine, l'analyse a été élargie pour inclure l'ensemble des publications scientifiques répertoriées dans OpenAlex. Cette section ne se limite pas aux travaux des auteurs également

inventeurs de brevets²⁶. Cette approche plus exhaustive vise à offrir une perspective plus complète de l'état de l'art et des tendances de recherche en compilation quantique. Elle permet de capturer l'ensemble des avancées scientifiques, y compris celles qui ne se traduisent pas nécessairement par des innovations brevetables, fournissant ainsi une image plus fidèle de l'activité de recherche et d'innovation.

Évolution du nombre de publications scientifiques et des familles de brevets dans le sous-domaine de compilation



Sources Derwent, OpenAlex, Traitement INPI 2024

Les publications scientifiques et les brevets sur la compilation quantique montrent des tendances similaires, avec une forte croissance entre 2017 et 2022 (+480 % pour les publications, +655 % pour les brevets). Le sujet émerge significativement dans les publications à partir de 2013, coïncidant avec les premiers dépôts de brevets, ce qui suggère un lien étroit avec la maturité technologique des qubits.

Géographiquement, les institutions américaines dominent avec environ 25 % des publications, soit 3,5 fois plus que l'Allemagne, second pays contributeur. Cependant, en considérant le ratio publications/institutions, les organismes de recherche européens se

révèlent au moins aussi prolifiques que leurs homologues américains en termes de publications. Le ratio publications par université varie de 1,2 pour l'Italie à 7,3 pour l'Autriche, tandis qu'il atteint environ 1,18 pour les États-Unis.

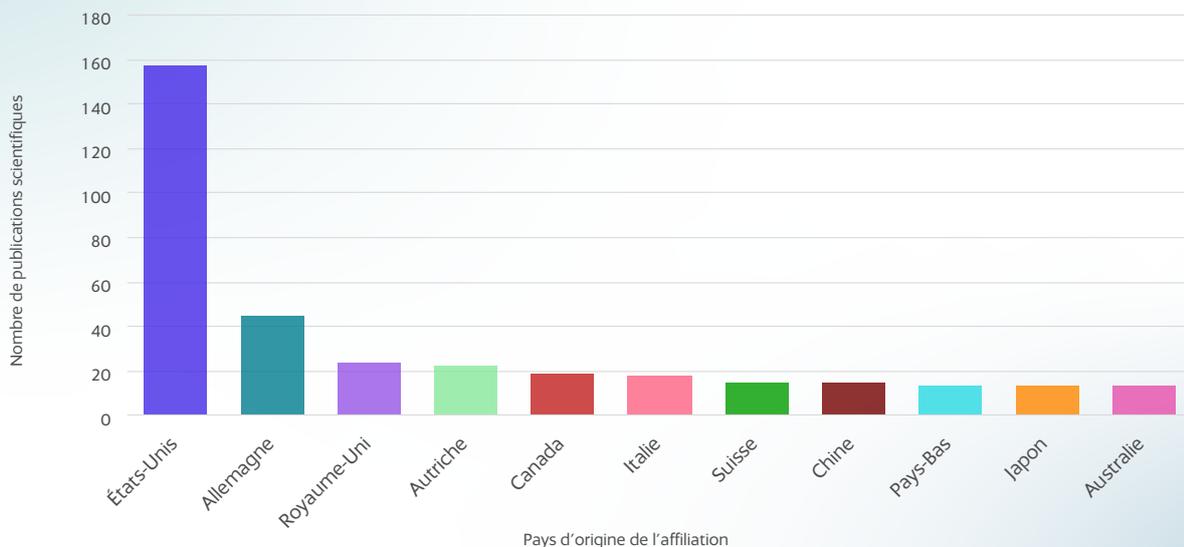
L'analyse des publications scientifiques sur la compilation quantique met en évidence l'engagement de plusieurs acteurs dans la zone Europe, tels que l'Allemagne, le Royaume-Uni, l'Autriche, l'Italie, la Suisse et les Pays-Bas. Cette observation contraste avec l'analyse des brevets, où seuls quelques acteurs européens, dont Atos en France, se démarquent.

26 Les champs et les mots-clés utilisés sont consultables dans la partie Méthodologie du rapport

Cette distribution suggère une complémentarité entre les pays en Europe dans ce domaine. Certains, comme l'Allemagne, le Royaume-Uni et l'Autriche se distinguent particulièrement dans la production de publications scientifiques. La France, quant à elle, apparaît peu présente dans les publications scientifiques en compilation quantique et semble davantage se positionner sur les aspects matériels.

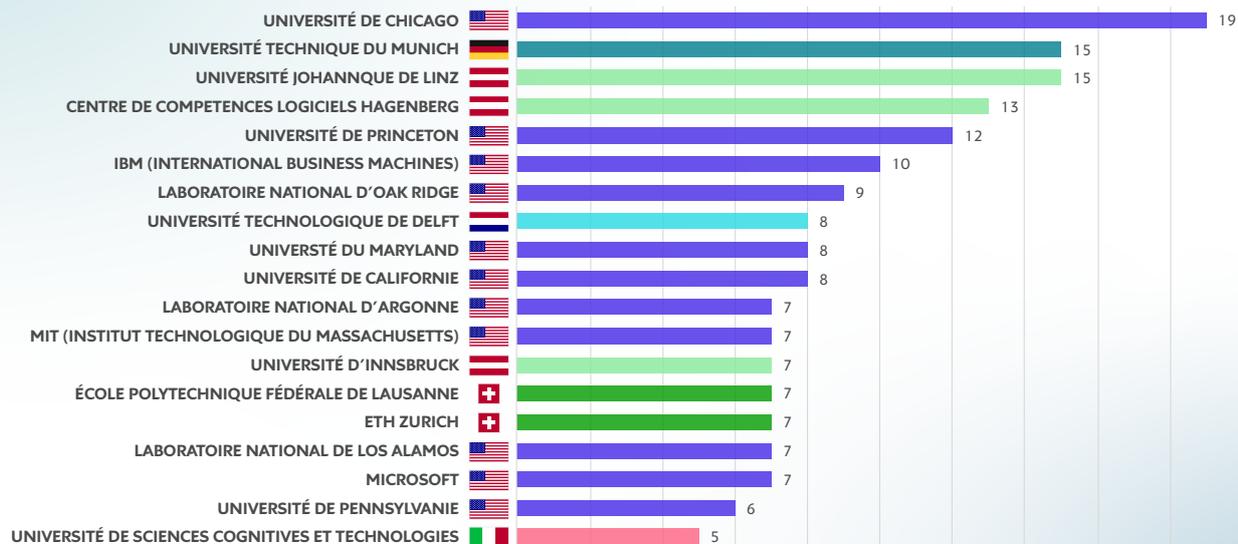
Cette diversité d'approches pourrait refléter des stratégies nationales distinctes, couvrant différents maillons de la chaîne de valeur de l'informatique quantique. Cette complémentarité pourrait s'avérer particulièrement avantageuse dans le cadre de projets européens collaboratifs.

Nombre de publications scientifiques par origine géographique des affiliations dans le sous-domaine de la compilation



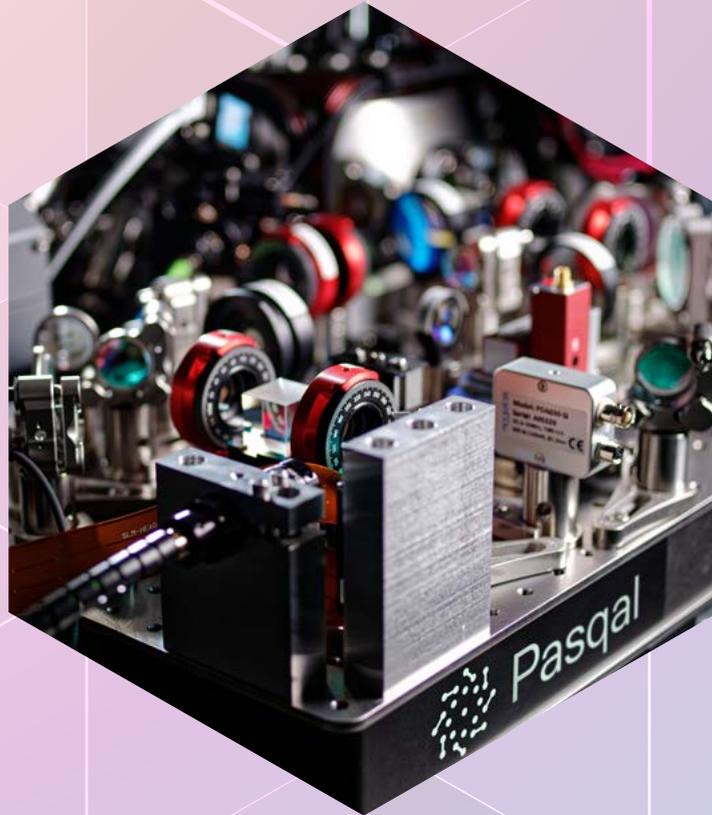
Source OpenAlex, Traitement INPI 2024

Principales institutions par volume de publications scientifiques portant sur la compilation



Source OpenAlex, Traitement INPI 2024

Crédits : Pasqal



PORTRAIT

PASQAL

LA SCALE UP FRANÇAISE DE L'INFORMATIQUE QUANTIQUE

LA SCALE UP FRANÇAISE DE L'INFORMATIQUE QUANTIQUE

Pasqal est fondée en 2019 par un groupe de physiciens renommés et d'entrepreneurs visionnaires. Parmi ses fondateurs figurent Alain Aspect, lauréat du prix Nobel de physique 2022 pour ses travaux sur l'intrication quantique, Antoine Browaeys, chercheur à l'Institut d'Optique et membre de l'Académie des Sciences, et Thierry Lahaye, chercheur au CNRS. Ils sont rejoints par Georges-Olivier Reymond, actuel PDG de Pasqal, et Christophe Jurczak, également co-fondateur de Quantonation, un fonds de capital-risque spécialisé dans les technologies quantiques.

Cette scale-up se spécialise dans la conception de processeurs quantiques (QPU) utilisant des atomes froids. Son approche intégrée couvre l'ensemble de la chaîne de valeur, de la conception matérielle à l'implémentation logicielle. Pasqal capitalise sur plusieurs décennies de recherche académique menée à l'Institut d'Optique sur la manipulation d'atomes froids par lasers, offrant ainsi une base solide à ses innovations technologiques.

UNE TECHNOLOGIE DE POINTE BASÉE SUR LES ATOMES FROIDS

Au cœur de l'innovation de Pasqal se trouvent des qubits constitués d'atomes neutres piégés et refroidis par lasers. Cette technologie offre une polyvalence remarquable, permettant deux approches de calcul quantique :

- ▶ Des calculs quantiques analogiques caractérisés par un contrôle continu des paramètres, ils excellent non seulement dans la simulation directe de phénomènes physiques complexes, mais aussi dans la résolution de problèmes d'optimisation, l'apprentissage automatique (Machine Learning) et diverses autres applications.
- ▶ Des calculs digitaux à portes quantiques utilisant une séquence de portes logiques permettant l'implémentation d'une vaste gamme d'algorithmes via des circuits logiques.

La différence entre les approches analogique et digitale réside principalement dans le mode de contrôle. Cette double capacité confère à Pasqal un avantage compétitif significatif, lui permettant d'adapter sa technologie à diverses exigences de calcul quantique. La startup a déjà démontré l'efficacité de sa technologie en obtenant des résultats probants sur des cas d'usage concrets, particulièrement dans le domaine du calcul analogique.

Le 25 juin 2024, l'entreprise a annoncé une avancée technologique majeure en réussissant à piéger plus de 1 000 atomes simultanément dans son processeur quantique. Elle est parvenue à confiner 1 110 atomes de rubidium dans environ 2 000 pièges optiques, au sein d'un environnement cryogénique maintenu à 6 K. Cette prouesse illustre la viabilité de l'informatique quantique à grande échelle basée sur des atomes neutres et marque un pas décisif vers l'expansion des ordinateurs quantiques. Cette étape s'inscrit comme un jalon essentiel dans la feuille de route de Pasqal, qui vise le développement des processeurs quantiques dépassant les 1 000 qubits, avec l'objectif d'atteindre 10 000 qubits d'ici 2026-2027.

UNE STRATÉGIE DE FINANCEMENT AMBITIEUSE

Dès sa création, Pasqal a bénéficié du soutien financier de Quantonation, un fonds de capital-risque spécialisé dans les technologies quantiques et a obtenu une subvention de 2,5 millions d'euros du Conseil Européen de l'Innovation (EIC) en octobre 2020.

En 2021, deux ans après sa création, Pasqal a réalisé une levée de fonds en série A de 25 millions d'euros, menée par Quantonation et le Fonds Innovation Défense (géré par Bpifrance pour le compte du Ministère des Armées), et soutenue par Runa Capital, Eni Next, EIC Fund et Daphni.

La même année, l'entreprise a fusionné avec Qu & Co, une startup néerlandaise spécialisée dans les logiciels pour ordinateurs quantiques. Cette fusion a permis à Pasqal d'intégrer trois demandes de brevets déposées par Qu & Co en 2020 et 2021, portant sur la simulation quantique et la résolution d'équations différentielles via un système hybride classique-quantique. Cette opération a ainsi renforcé l'offre intégrée de Pasqal, combinant expertise matérielle et logicielle.

En 2023, Pasqal a effectué un tour de table en série B de 100 millions d'euros, mené par le fonds singapourien Temasek. Cette levée, à laquelle ont participé Bpifrance, Daphni, Wa'ed Ventures, Quantonation, Eni Next, EIC Fund et le Fonds Innovation Défense vise à accélérer le développement technologique et l'industrialisation de l'entreprise, tout en multipliant les cas d'usage.

En juin 2023, Pasqal a été sélectionnée parmi les 125 lauréats de la première promotion French Tech 2030. Ce programme vise à soutenir des startups innovantes qui répondent aux objectifs stratégiques de France 2030, en mettant l'accent sur le renforcement de la souveraineté industrielle et technologique française.

Aujourd'hui présente dans neuf pays, Pasqal utilise l'apport de capital pour renforcer sa présence internationale, particulièrement en Amérique du Nord, en Asie, en Europe et au Moyen-Orient, régions où se trouvent ses principaux partenaires et clients.

RECONNAISSANCE INTERNATIONALE ET PARTENARIATS

Pasqal fait partie des rares entreprises à commercialiser des processeurs quantiques (QPU) à l'échelle mondiale. Soutenue par ses partenaires français et européens, la société a déjà livré une machine au centre de calcul GENCI en collaboration avec le CEA, marquant une première en France. Dans les mois à venir, l'entreprise prévoit d'équiper l'université de Jülich en Allemagne.

En mai 2024, Pasqal a conclu un accord avec la multinationale pétrolière saoudienne Aramco pour l'installation du premier ordinateur quantique en Arabie Saoudite. Le dispositif, doté d'un processeur de 200 qubits sera installé, maintenu et exploité par Pasqal, avec un déploiement prévu pour le second semestre 2025. Cette

LA SCALE UP FRANÇAISE DE L'INFORMATIQUE QUANTIQUE

collaboration vise à introduire des capacités de calcul quantique avancées dans le royaume, notamment dans le secteur de l'énergie. Cette transaction marque une étape importante pour Pasqal, la positionnant parmi les premières entreprises à vendre un processeur quantique à une entité privée.

Interrogée sur ses rapports avec l'industrie, Pasqal illustre les relations qu'elle tisse avec les grands groupes à travers des partenariats stratégiques récents et des collaborations.

- ▶ Le 6 juin 2024, Pasqal et IBM ont annoncé un partenariat technologique visant à développer une approche commune du supercalcul quantique. L'objectif est d'intégrer l'informatique quantique et le calcul classique avancé pour créer une nouvelle génération de superordinateurs. Les deux entreprises s'engagent à définir une architecture logicielle open-source pour orchestrer les flux de travail entre différents systèmes quantiques et classiques. Ce partenariat, alliant l'expertise d'IBM en circuits supraconducteurs et celle de Pasqal en ordinateurs quantiques à atomes neutres, cible l'adoption industrielle dans les sciences des matériaux et la chimie. Pour promouvoir l'initiative, un forum technique sur le calcul haute performance sera co-sponsorisé en Allemagne, avec des plans d'expansion.
- ▶ Un partenariat commercial notable est celui annoncé en juillet avec CMA CGM, leader dans le secteur maritime. Ce partenariat vise à intégrer les technologies quantiques dans les opérations logistiques de CMA CGM. Dans ce cadre, un Centre d'Excellence Quantique sera créé au sein de TANGRAM, le hub d'innovation de CMA CGM. Ce centre aura accès à un processeur quantique développé par Pasqal et proposera une formation en informatique quantique pour le personnel de CMA CGM. L'objectif principal de cette collaboration est de développer des cas d'usage, avec un accent particulier sur l'optimisation de la gestion des conteneurs, afin d'améliorer l'efficacité, la réactivité et l'adaptabilité des opérations de transport et de logistique. Un autre exemple significatif est le partenariat avec Capgemini, qui s'inscrit dans le cadre du consortium EQUALITY.
- ▶ D'autres cas d'usage sont également en développement avec des grands groupes comme EDF sur la question de la recharge intelligente des véhicules électriques, ou Thales sur la planification des satellites. En collaboration avec le Crédit Agricole, l'accent est mis sur l'optimisation des portefeuilles financiers.

Ces initiatives illustrent les collaborations de Pasqal avec des leaders industriels pour développer des solutions concrètes basées sur les technologies quantiques.

LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE AU CŒUR DE LA STRATÉGIE D'INNOVATION

Dans le domaine hautement concentré et compétitif de l'informatique quantique, Pasqal a développé une stratégie de propriété industrielle axée sur l'utilisation des brevets pour protéger ses inventions. L'entreprise possède un portefeuille de 24 familles de brevets publiés à date, y compris ceux issus de l'acquisition de Qu & Co, ainsi que plusieurs demandes de brevets non publiées à ce jour, selon les responsables de l'entreprise. Ces brevets protègent non seulement la technologie centrale de Pasqal, mais couvrent également des aspects périphériques, créant ainsi une barrière de protection plus large autour de ses innovations.

« La propriété intellectuelle est primordiale pour une startup dans un domaine de la deep-tech, où les développements sont longs et hautement technologiques », souligne un représentant de Pasqal. « Nous utilisons tous les outils à notre disposition, et plus particulièrement les brevets, pour protéger les travaux de recherche et de développement réalisés en interne ou avec des partenaires. »

Les inventions protégées par Pasqal couvrent une variété de dispositifs et de procédés. Parmi celles-ci figurent entre autres des lasers pour l'excitation d'atomes dans un processeur quantique, des circuits quantiques, des procédés d'allocation de qubits logiques ou encore des procédés de piégeage. La publication de 24 familles de brevets à ce jour témoigne de la dynamique d'innovation de l'entreprise.

Selon les informations fournies par les représentants de l'entreprise, une stratégie de propriété industrielle robuste a été mise en place pour renforcer sa position dans l'écosystème quantique. Cette approche comprend notamment la création d'un comité brevets chargé de sélectionner les inventions en adéquation avec la feuille de route technologique de l'entreprise et d'assurer une veille. Tout en privilégiant le dépôt de brevets en son nom propre, Pasqal maintient une stratégie de co-dépôts ciblés avec des partenaires académiques de renom. Parmi ces collaborations, on peut citer le CNRS et l'Institut d'Optique sur des technologies avancées en optique et en physique atomique. Cette approche mixte permet à Pasqal de consolider sa position dans l'écosystème quantique tout en bénéficiant d'expertises complémentaires issues de la recherche fondamentale.

Dans un environnement où l'activité de dépôts de brevets est intense, cette stratégie permet à Pasqal de consolider sa position technologique et de valoriser ses innovations sur le marché international. En protégeant ses avancées, Pasqal se positionne comme un acteur innovant et un partenaire potentiel pour de futures collaborations et investissements dans le domaine quantique.

1. INFORMATIONS RELATIVES AUX DÉPÔTS DE BREVETS

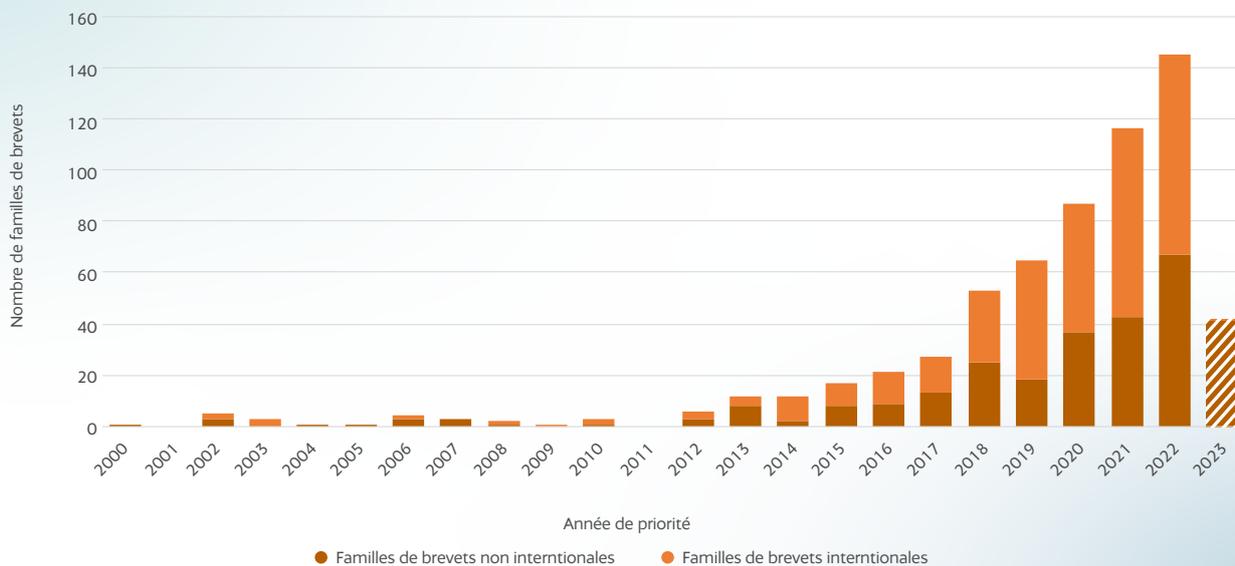
Les erreurs sont omniprésentes dans les systèmes quantiques actuels, affectant toutes les étapes : calcul, préparation des qubits, mesure, et même au niveau de l'électronique de contrôle.

Un défi majeur dans la construction d'ordinateurs quantiques est notamment la gestion de la décohérence des qubits. Extrêmement sensibles aux perturbations environnementales (radiations, chaleur, ...), ils perdent facilement leur état quantique, compromettant les propriétés de superposition et d'intrication essentielles au calcul quantique. L'isolation totale des qubits est impossible en pratique, car une certaine interaction est nécessaire pour leur manipulation et leur mesure. Le défi consiste à concevoir des qubits suffisamment isolés pour minimiser les erreurs de décohérence, tout en maintenant leur contrôlabilité. Ces erreurs constituent un obstacle majeur à l'implémentation d'algorithmes quantiques complexes.

La gestion efficace de ces erreurs est cruciale pour réaliser un ordinateur quantique universel, ou « Fault Tolerant Quantum Computer ». Ce terme souligne l'importance de créer des systèmes quantiques fiables malgré la présence inévitable d'erreurs. Le développement de techniques robustes de correction d'erreurs quantiques est donc essentiel pour franchir cette étape critique dans l'évolution de l'informatique quantique.

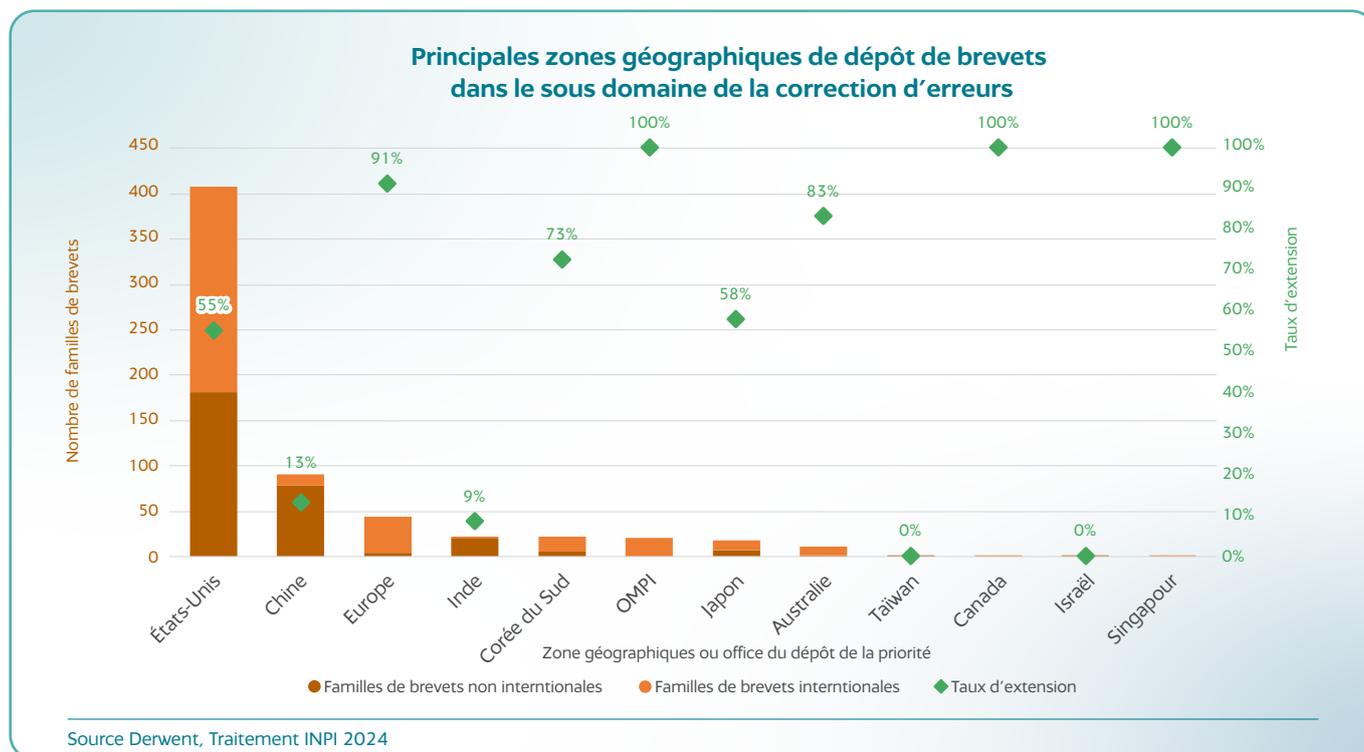
On recense 627 familles de brevets portant sur la correction d'erreurs déposées entre 2000 et 2023. Les acteurs du domaine se sont intéressés relativement tôt à la problématique de la correction d'erreurs puisque dès 2013 on voit apparaître les premiers brevets sur le sujet. Cette temporalité coïncide avec la tendance des dépôts de brevets sur l'informatique quantique en général.

Évolution du nombre de familles de brevets par année de priorité dans le sous domaine de la correction d'erreurs



Source Derwent, Traitement INPI 2024

Les dépôts de brevets sur la correction d'erreurs quantiques ont connu une croissance spectaculaire, augmentant de 1 108 % entre 2013 et 2022. Fait notable, environ la moitié des familles de brevets dans ce domaine a été déposée après 2020, soulignant l'accélération récente de l'innovation dans ce secteur crucial de l'informatique quantique.



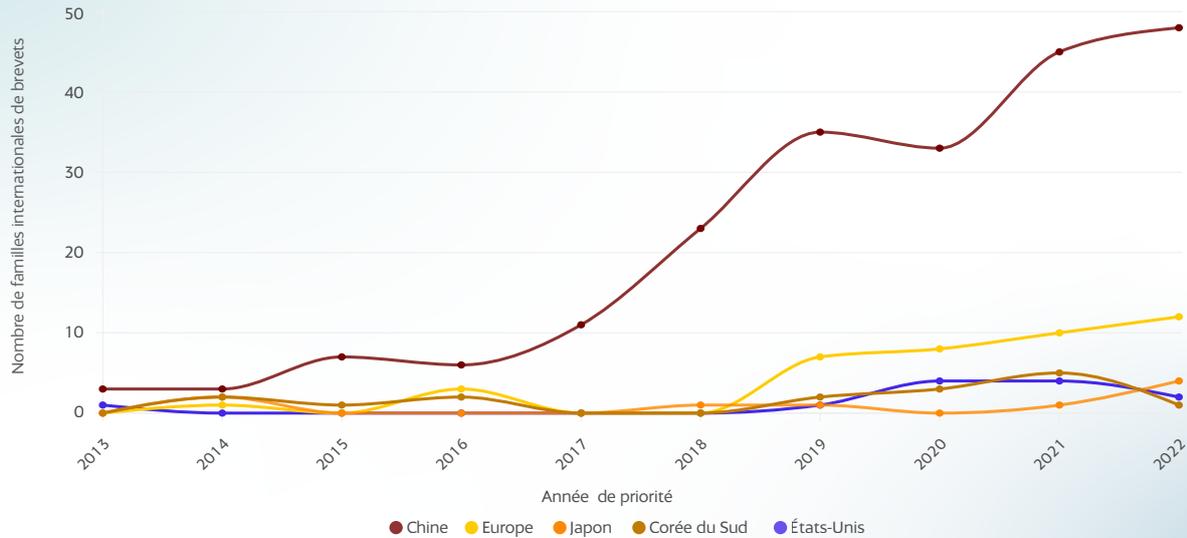
La prédominance des familles de brevets d'origine américaine est encore plus marquée sur la correction d'erreurs que sur les autres sous-domaines. Les familles de brevets déposées auprès de l'office américain représentent environ deux tiers des documents sur ce sujet, une proportion supérieure à celle observée dans les autres sous-domaines de l'informatique quantique. Cette domination, observée dès le début des années 2010, s'explique par la présence d'un écosystème dynamique et bien établi aux États-Unis. Cet écosystème comprend des géants technologiques tels que les GAFAM, qui sont implantés depuis longtemps et disposent de ressources considérables pour la recherche et le développement. Il inclut également des startups innovantes comme Rigetti, fondée en 2013, ainsi que des entreprises étrangères telles que D-Wave, une startup canadienne qui dépose ses brevets en priorité aux États-Unis. Cette combinaison d'acteurs

variés, alliant la puissance des grandes entreprises à l'agilité des startups, a permis aux États-Unis de se positionner en tête de l'innovation dans le domaine de la correction d'erreurs quantiques.

L'Europe se positionne comme la deuxième zone de priorité avec 41 familles internationales de brevets, devançant la Chine (12 familles internationales). Bien que le volume de dépôts européens soit neuf fois inférieur à celui des États-Unis, l'Europe affiche une croissance plus dynamique : 71 % entre 2019 et 2022, contre 37 % pour les États-Unis sur la même période.

Ce décalage entre les deux continents peut s'expliquer par l'émergence plus tardive des acteurs européens dans ce domaine. L'Europe compte proportionnellement moins de grands groupes industriels spécialisés en informatique, comme les GAFAM américains.

Évolution du nombre de familles internationales de brevets selon la zone de priorité et l'année de priorité sur le sous domaine de la correction d'erreurs



Source Derwent, Traitement INPI 2024

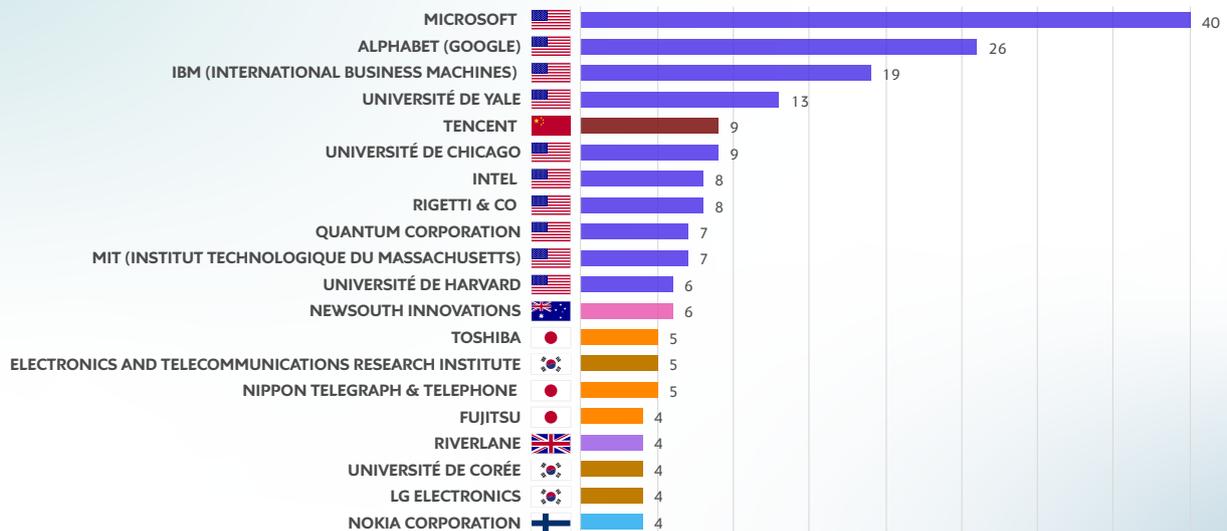
L'analyse des principaux déposants de familles internationales de brevets dans le domaine de la correction d'erreurs quantiques révèle une forte corrélation avec les acteurs majeurs de l'informatique quantique en général. Cette concordance s'explique par le lien étroit entre les technologies de correction d'erreurs et les composants matériels, notamment les types de qubits utilisés. Étant donné que la correction d'erreurs est liée à la couche inférieure de la chaîne de valeur quantique, il est donc logique que l'on retrouve parmi les déposants des acteurs également impliqués dans ces aspects fondamentaux.

Parmi les 20 principaux déposants de brevets en correction d'erreurs quantiques, on trouve 5 acteurs académiques, dont 4 sont américains et 1 coréen.

On observe que les grands acteurs chinois comme Origin Quantum et Baidu, pourtant très présents dans les brevets d'informatique quantique en général, sont absents de ce classement spécifique sur la correction d'erreurs. Cette absence s'explique probablement par leur entrée plus tardive dans le domaine et leur focus sur les aspects logiciels plutôt que matériels. La correction d'erreurs, étant étroitement liée au matériel, ne figurerait donc pas parmi leurs priorités de recherche.

Dans ce classement des 20 principaux déposants, Tencent Holdings se démarque comme l'unique représentant chinois. Cette entreprise, connue pour ses services internet diversifiés, occupe ainsi une position singulière dans l'écosystème technologique chinois en matière de recherche quantique. Son implication dans ce domaine témoigne d'une approche stratégique différente par rapport aux autres géants technologiques chinois.

Classement mondial et évolution des portefeuilles des 20 premiers déposants en nombre de familles internationales de brevets sur le sous domaine de la correction d'erreurs



Source Derwent, Traitement INPI 2024

2. INFORMATIONS RELATIVES AUX PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

De manière analogue à l'approche adoptée pour la compilation quantique, l'analyse du sous-domaine de la correction d'erreurs a été élargie pour englober l'ensemble des publications scientifiques répertoriées dans OpenAlex. Cette étude ne se limite pas aux travaux des auteurs également inventeurs de brevets, mais inclut toutes les contributions académiques dans ce domaine. Cette approche plus exhaustive vise à offrir une perspective plus complète de l'état de l'art et des tendances de recherche en correction d'erreurs quantiques. Elle permet de capturer l'ensemble des avancées scientifiques, y compris celles qui ne se traduisent pas nécessairement par des innovations brevetables, fournissant ainsi une image plus fidèle de l'activité de recherche et d'innovation.

On recense environ 3 000 publications scientifiques dans le domaine de la correction d'erreurs²⁷. Les premières publications

scientifiques sur ce sujet remontent à au moins deux décennies, témoignant d'un intérêt académique précoce. Les brevets dans ce domaine n'ont commencé à apparaître que récemment, coïncidant avec l'essor général des brevets dans l'ensemble du secteur quantique.

L'évolution du nombre de publications issues de la recherche académique et du nombre de familles de brevets présentent des dynamiques contrastées. Sur la décennie 2012-2022, les publications ont connu une croissance de plus de 550 %, dans le même temps, le nombre de familles de brevets ont augmenté de plus de 4 700 %.

Pour la période 2018-2022, le volume de travaux scientifiques dans ce segment de la chaîne de valeur dépasse le double du nombre de familles de brevets déposées.

Évolution du nombre de publications scientifiques et des familles de brevets dans le sous-domaine de la correction d'erreurs

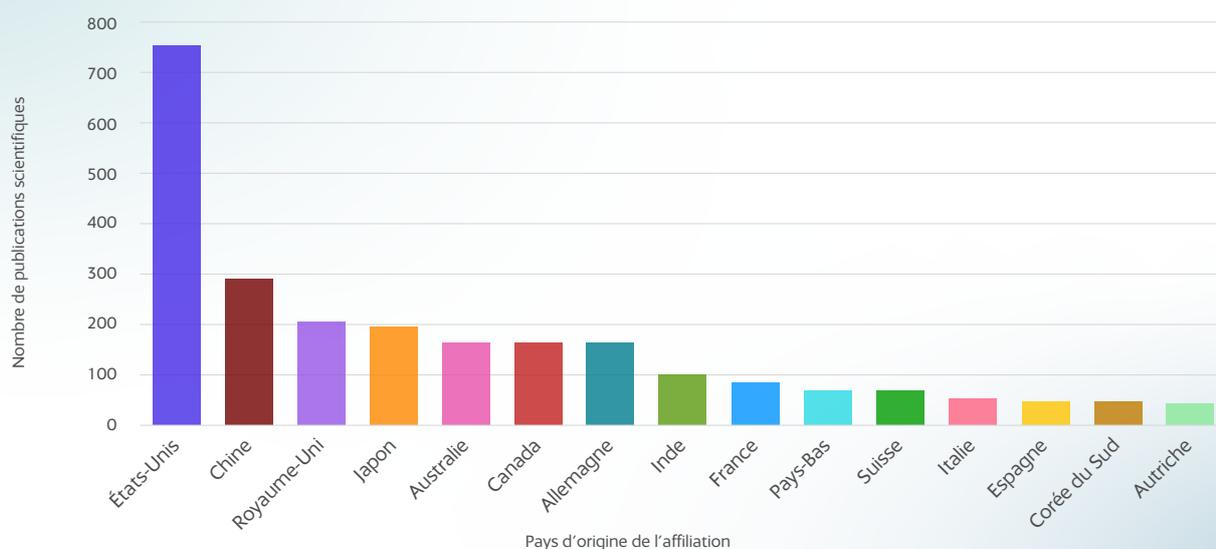


Sources Derwent, OpenAlex, Traitement INPI 2024

Ce décalage entre publications et brevets met en lumière la nature fondamentalement théorique des premiers travaux sur la correction d'erreurs quantiques. Les chercheurs ont pu explorer ces concepts bien avant l'émergence d'applications pratiques brevetables, en s'appuyant sur une compréhension précoce des sources d'erreurs dans les systèmes quantiques, telles que la décohérence des qubits.

²⁷ La mots-clés et les champs de recherches utilisés sont consultables dans la partie Méthodologie du rapport

Nombre de publications scientifiques par origine géographique des affiliations portant sur la correction d'erreurs



Source OpenAlex, Traitement INPI 2024

L'élaboration de codes de correction d'erreurs spécifiques au domaine quantique, intégrant des principes comme le théorème de non-clonage, illustre cette phase initiale de recherche théorique. Cette approche a permis de poser les bases conceptuelles nécessaires, bien avant que la technologie ne soit suffisamment mature pour donner lieu à des innovations brevetables.

L'analyse géographique révèle que les institutions américaines dominent les publications scientifiques, représentant environ un quart du volume total. Cependant, on note une présence significative de la Chine et du Japon dans les publications scientifiques sur la correction d'erreurs, contrastant avec leur faible représentation dans les brevets, particulièrement pour la Chine. Cela pourrait s'expliquer par une internalisation de la recherche dans les centres académiques chinois et une collaboration étroite entre industrie et universités en Chine.

En janvier 2024, l'entreprise Baidu a annoncé qu'elle ferait don de son laboratoire de recherche quantique à l'Académie de l'informa-

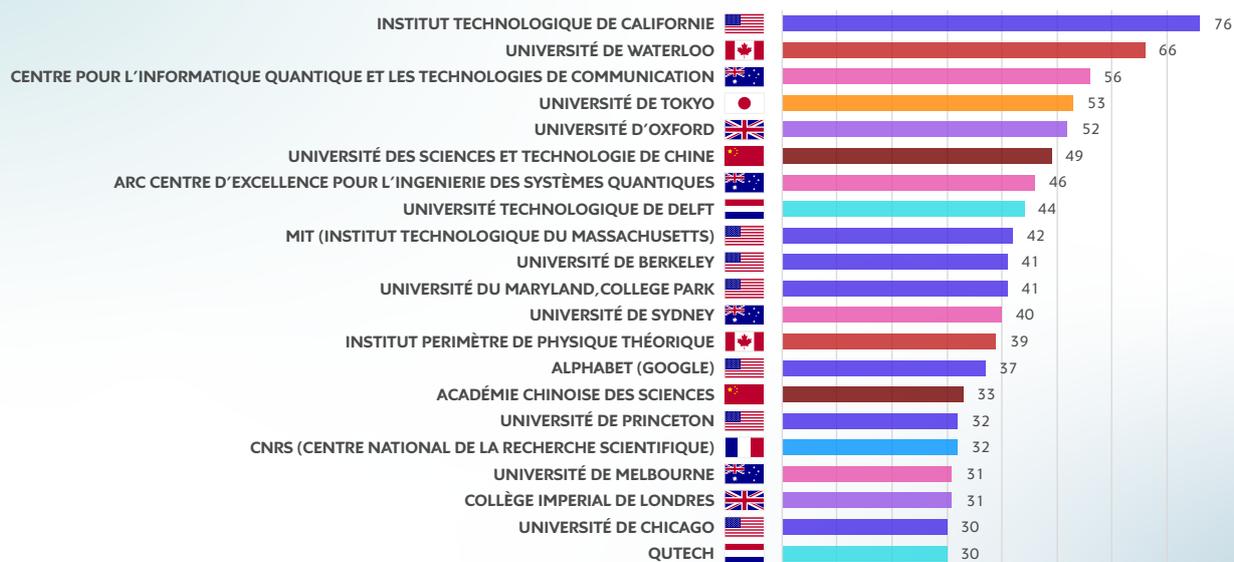
tion quantique de Pékin (BAQIS), tandis qu'Alibaba a également fermé son laboratoire et a transféré ses équipements à l'Université de Zhejiang. Ces deux entreprises étaient parmi les principaux déposants de brevets dans ce secteur, mais leur retrait suggère un changement dans leurs priorités stratégiques²⁸.

L'étude des principales institutions scientifiques met en lumière les écosystèmes quantiques dans le monde. L'Amérique du Nord se distingue, avec le Canada comme foyer important de la recherche en informatique quantique, donnant naissance à de nombreuses startups innovantes comme D-Wave, Xanadu et 1Qbit.

Dans ce classement, la France apparaît grâce aux 32 publications affiliées au CNRS, ce qui représente environ la moitié du volume produit par l'université de Waterloo au Canada. Cette contribution positionne l'organisme de recherche français au 16^{ème} rang, illustrant son implication notable dans la recherche en correction d'erreurs quantiques à l'échelle mondiale.

28 Source : Reuters « [Baidu to donate quantum computing lab equipment to Beijing institute](#) », Janvier 2024

Principales institutions par volume de publications scientifiques portant sur la compilation



Source OpenAlex, Traitement INPI 2024

Crédits : © Inna Fedorenko & Adrian Tulbure



PORTRAIT

QUOBLY

LA STARTUP QUANTIQUE FRANÇAISE QUI PARIE SUR LES SEMI-CONDUCTEURS

LA STARTUP QUANTIQUE FRANÇAISE QUI PARIE SUR LES SEMI-CONDUCTEURS

Fondée en 2022, Quobly est basée à Grenoble, au cœur de l'écosystème des semi-conducteurs. Créée par Maud Vinet, Tristan Meunier et François Perruchot, l'entreprise repose sur quinze années de recherches menées conjointement par des équipes du CEA Grenoble et de l'institut Néel du CNRS. L'entreprise vise à développer un ordinateur quantique universel basé sur des qubits de spin sur silicium, une technologie qui pourrait directement bénéficier des investissements déjà réalisés dans l'industrie des semi-conducteurs en France.

UNE TECHNOLOGIE AMBITIEUSE À LA CROISÉE DES CHEMINS

Quobly mise sur l'utilisation de qubits de spin sur silicium réalisés à partir d'une technologie classique de fabrication des transistors pour se différencier dans le monde de l'informatique quantique. L'approche retenue, basée directement sur les solutions en production dans l'industrie de la microélectronique, présente un avantage de taille : elle permettrait une mise à l'échelle plus aisée, car elle repose sur des processus de fabrication déjà bien maîtrisés et en production. Cette approche innovante pourrait, selon les fondateurs de Quobly, faciliter la transition vers une informatique quantique universelle, en s'appuyant sur des infrastructures existantes et sur le savoir-faire en microélectronique de Grenoble. Après avoir démontré la faisabilité de son approche pour réaliser des qubits en utilisant les infrastructures du CEA-Leti, Quobly s'attelle à l'adaptation de sa technologie à un procédé industriel existant. L'entreprise se concentre sur le développement d'une porte à deux qubits intégrée dans un dispositif fabriqué selon des standards industriels.

FINANCEMENT ET RECONNAISSANCE

En seulement un an d'existence, la startup a rapidement suscité l'intérêt des investisseurs. En juin 2023, Quobly a réalisé une levée de fonds d'amorçage de 19 millions d'euros auprès de huit investisseurs clés, parmi lesquels Quantonation, Supernova Invest, Innovacom et Bpifrance. Ce financement témoigne de la confiance que la communauté scientifique et industrielle place en cette jeune pousse.

Outre cette levée de fonds, Quobly a obtenu une subvention de 2,5 millions d'euros du Conseil Européen de l'Innovation (EIC) pour son projet MCSQUARE. Ce dernier vise à développer un premier démonstrateur de processeur quantique FD-SOI (Fully Depleted Silicon on Insulator), démontrant ainsi une architecture adaptée à une mise à l'échelle industrielle.

En juin 2023, Quobly a été sélectionnée parmi les 125 lauréats de la première promotion French Tech 2030. Ce programme vise à soutenir des startups innovantes qui répondent aux objectifs stratégiques de France 2030, en mettant l'accent sur le renforcement de la souveraineté industrielle et technologique française.

LA PLACE DE LA PI ET DES BREVETS CHEZ QUOBLY

Pour François Perruchot, Chief Strategy Officer de Quobly, la gestion des brevets a été une priorité dès la création de l'entreprise. « Dès le départ, c'était un élément important. Nous sommes partis avec un portefeuille de brevets probablement plus élevé que la moyenne des startups issues de laboratoires plus académiques. » affirme-t-il. Cette approche concernant les brevets vise principalement à assurer la liberté d'exploitation des technologies développées par la société, évitant ainsi toute entrave juridique qui pourrait ralentir leur progression.

L'entreprise ne considère pas les brevets uniquement comme une barrière concurrentielle, mais adopte une approche plus large de la propriété intellectuelle. L'avantage concurrentiel de Quobly repose également sur sa capacité à innover rapidement et sur son expertise unique dans les semi-conducteurs. Pour François Perruchot les brevets s'inscrivent dans une stratégie plus large et cohérente avec les autres actifs intellectuels de l'entreprise. « La barrière à l'entrée pour développer une technologie industrielle à base de semi-conducteurs est très forte. Nos brevets ne sont pas déposés uniquement pour empêcher nos concurrents d'utiliser les options technologiques que nous avons retenues ; nous avons d'autres éléments pour nous différencier : notre savoir-faire très fort en modélisation, caractérisation ou définition de procédé pour la réalisation de composants semi-conducteurs, la vitesse à laquelle nous sommes capables d'activer un écosystème complet. Cependant, nous sommes conscients que le dépôt stratégique de brevets peut parfois freiner l'innovation, aussi nous agissons de manière proactive pour nous en prémunir ».

Les brevets jouent donc un rôle clé dans la protection de leur propriété intellectuelle, servant aussi de levier de négociation telles que des licences croisées ou pour sécuriser l'exploitation de leurs innovations.

Avec un portefeuille comprenant une quarantaine de licences de brevets issues du CEA et du CNRS couvrant à la fois la fabrication de dispositifs quantiques, les techniques de mesure ou le contrôle et la manipulation du spin des électrons, la collaboration avec ces institutions reste au cœur de la stratégie de Quobly. De nouveaux dépôts de brevets sont d'ailleurs en préparation pour renforcer leur position sur le marché.

LA STARTUP QUANTIQUE FRANÇAISE QUI PARIE SUR LES SEMI-CONDUCTEURS

UN ENVIRONNEMENT COMPÉTITIF ET COMPLEXE

Dans cet environnement encore émergent, le principal concurrent technologique de Quobly est aujourd'hui le géant américain Intel, également engagé dans la course à l'ordinateur quantique basé sur le silicium. Mais comme le souligne François Perruchot, l'écosystème du quantique est encore émergent et extrêmement concentré : « Pour l'instant, il y a très peu d'entreprises. Toutes les startups du secteur s'intéressent à la chaîne de valeur complète, ce qui crée des opportunités mais aussi des risques en terme de propriété intellectuelle. »

En effet, les défis technologiques liés à la complexité des systèmes quantiques sont multiples, et chaque maillon de la chaîne de valeur peut potentiellement représenter un obstacle ou une opportunité. Pour Quobly, la clé est de garder une longueur d'avance en maîtrisant non seulement leur technologie centrale, mais aussi les éléments périphériques essentiels à leur développement.

Dans ce contexte, Quobly reconnaît l'importance de diversifier son portefeuille de brevets à l'avenir. Au-delà de la protection de sa technologie cœur, l'entreprise envisage de déposer des brevets sur des aspects périphériques pour créer une barrière de protection plus large. Cette stratégie vise à anticiper les risques potentiels provenant non seulement des concurrents directs, mais aussi d'acteurs développant des technologies différentes qui pourraient trouver des applications similaires ou connexes dans le domaine quantique.

VERS QUEL AVENIR POUR QUOBLY ?

Pour l'instant, l'avenir du secteur quantique reste imprévisible. Comme le souligne François Perruchot : « Il existe plusieurs modèles économiques possibles ; nous devons donc prendre en compte ce fait pour anticiper autant que possible quelles propriétés intellectuelles seront nécessaires pour exploiter pleinement les technologies que nous développons. »

L'informatique quantique se révèle aujourd'hui comme un domaine en pleine expansion, illustré par une croissance exponentielle des familles de brevets (2 000 % sur 10 ans) et une intensification de la concurrence mondiale. Cette étude met en lumière une course internationale aux brevets, dominée par les États-Unis et la Chine, tandis que l'Europe et d'autres régions renforcent leurs contributions dans des segments spécialisés.

L'essor des brevets, combiné à une forte implication des chercheurs dans la production scientifique, souligne le passage de la recherche théorique à des applications concrètes. La montée des co-dépôts et des collaborations scientifiques internationales démontrent l'importance stratégique de l'informatique quantique et la concurrence mondiale accrue.

L'analyse révèle un retard des acteurs européens dans la protection de la couche logicielle. En Europe, on observe une séparation nette entre les brevets matériels (dominés par les institutions académiques) et les brevets logiciels (concentrés chez les acteurs industriels). Cette spécialisation contraste avec la stratégie plus intégrée des États-Unis et donc de stratégie de protection par le brevet plus globale. La faible proportion de brevets logiciels européens (14% des familles internationales) suggère un potentiel inexploité dans ce domaine.

Bien que les brevets sur le matériel quantique restent prédominants, l'évolution du secteur montre une importance croissante des innovations logicielles et de correction d'erreurs, reflétée par l'augmentation progressive des brevets dans ces domaines. Cette tendance souligne la nécessité pour les acteurs européens d'adopter une approche plus équilibrée entre les aspects matériels et logiciels.

La diversité des approches et la complémentarité des déposants européens reflètent des stratégies nationales variées, pouvant constituer un atout pour le développement de projets collaboratifs à l'échelle européenne. L'importance croissante des collaborations, particulièrement dans le secteur académique (taux de co-dépôts atteignant 25% en France), couplée à l'augmentation des publications scientifiques liées aux brevets, indiquent une maturation du domaine.

Au-delà des statistiques, les dynamiques de brevets mettent en évidence les défis et les opportunités d'un secteur en transition vers l'industrialisation et d'une compétition entre grandes puissances pour développer le premier ordinateur quantique universel. Les entreprises, les institutions académiques et les gouvernements doivent intensifier leurs investissements et encourager les partenariats afin de maintenir leur compétitivité. Dans ce contexte, la protection de la propriété intellectuelle devient un levier essentiel pour sécuriser et valoriser les avancées technologiques du quantique, conforter le positionnement de nos industries où l'innovation représente à la fois un enjeu de souveraineté et de leadership technologique.

BREVET

L'étude porte sur les demandes de brevets en cours d'examen publiés et les brevets délivrés, ainsi que les certificats et modèles d'utilité publiés.

COMPTAGE

Cette étude repose sur un compte de présence qui est une méthode par décompte entier. Dès que l'acteur est présent dans une demande de brevet, il est crédité d'une participation unitaire. C'est une logique de participation.

CONSOLIDATION

Les données ont été extraites à l'aide de requêtes sur l'outil Derwent Innovation. Cet outil permet d'harmoniser les noms des déposants de brevets, en unifiant les différentes dénominations sous lesquelles un déposant peut apparaître (par exemple, CEA, C.E.A, Commissariat à l'énergie atomique, etc.). De plus, les données sont consolidées pour associer les titres de brevets à l'entité mère du groupe. Cette méthode offre une vision plus claire de l'entité qui détient réellement les droits de propriété intellectuelle.

DÉPOSANT - TITUAIRE

Le déposant est la personne morale ou physique qui soumet une demande de brevet auprès d'un office de propriété intellectuelle. Lorsqu'une demande de brevet est acceptée, le déposant obtient un droit exclusif sur l'exploitation de son innovation. Dans le cadre de cette étude, le terme « déposant » est utilisé de manière plus large pour désigner le détenteur des droits du brevet. Cela peut inclure non seulement le déposant lui-même, mais aussi sa maison mère ou une entité tierce à laquelle le déposant a cédé ses droits.

EXTENSION ET FAMILLES INTERNATIONALES DE BREVETS

Un brevet est considéré comme étendu lorsque l'invention est protégée dans son pays d'origine ainsi que dans au moins un autre pays.

Dans le cadre de cette étude, la notion de « familles internationales de brevets » est utilisée par convention pour désigner des familles de brevets composées d'au moins deux publications dans des juridictions nationales distinctes ainsi que les publications européennes (EP) et les demandes internationales PCT (WO) car ces juridictions permettent de cibler plusieurs pays. La procédure PCT (Traité de coopération en matière de brevets) se compose d'une phase internationale d'une durée de 30 ou 31 mois, suivie d'une entrée en phase nationale ou régionale.

FAMILLE DE BREVETS

L'unité de compte des portefeuilles de brevets est le nombre de familles de brevets. Une famille de brevets regroupe l'ensemble des publications de brevets d'une même invention, sur un ou plusieurs territoires. Chaque famille est identifiée grâce à la demande de brevet publiée la plus ancienne, appelée « priorité ». L'année de

la priorité est utilisée pour dater l'invention et le code de l'office de la priorité permet d'identifier la voie de dépôt initiale qui, lorsqu'elle est nationale, permet d'identifier l'origine géographique de l'invention.

PAYS DE PRIORITÉ

La priorité permet d'identifier la voie de dépôt initiale, qui, lorsqu'elle est nationale, révèle l'origine géographique de l'invention. Le premier dépôt peut également être effectué auprès d'un office régional, tel que l'Office Européen des Brevets (OEB), ou à l'Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI).

PAYS DE PROTECTION

Ce terme désigne les pays où une protection est demandée, c'est-à-dire ceux dans lesquels un dépôt de brevet a été effectué, que ce soit par le dépôt de la priorité ou par le principe de l'extension. Cela inclut également les pays qui seront validés ou désignés à l'issue des procédures européennes ou internationales.

CORPUS BREVETS

Les différents corpus de familles de brevets analysées durant cette étude sont issus de la base de données Derwent Innovation.

Technologies	Equation
Informatique quantique	(AIC=(G06N0010*) OR (AIC=(G06N0099*) AND CTB>(*quantum)))
Matériel (autres)	Le corpus 'Matériel (autres)' comprend les brevets d'informatique quantique excluant ceux liés aux logiciels et aux qubits. Il est obtenu en soustrayant du corpus général les brevets concernant la compilation, la correction d'erreurs, les logiciels, les applications et les qubits.
Matériel (qubits)	<p>Requête Atomes Froids :</p> <p>TAB=((((*cold or neutral) adj atom*) or *cold-atom* or neutral-atom*)) not ((((*cold or neutral) adj atom*) or *cold-atom* or neutral-atom*) near8 (supraconduct* or spin* or phonon* or photon* or silicium or ion* or dot*)) or ((((*cold or neutral) adj atom*) or *cold-atom* or neutral-atom*) near20 (quantum dot*))))</p> <p>Requête Supraconducteurs :</p> <p>TAB=(supraconduct* or superconduct*) OR (TAB=(josephson) and all=(supraconduct* or superconduct*))</p> <p>Requête Ions Piégés :</p> <p>TAB=((ion* near trap*) or ion-trap*)</p>

Matériel (qubits)	<p>Requête qubit à oscillation plasmique : TAB=((oscillation or transmon) adj3 (qbit* or qubit* or (quantum bit*))))</p> <p>Requête structure de diamant : TAB=((diamond) adj3 (qbit* or qubit* or (quantum bit*))) or (nitrogen-vacancy center) or (n-v center) or (nv center) or (NV-based))</p> <p>Requête qubit de Silicium : TAB=((silic*) adj4 (qbit* or qubit* or (quantum bit*))) or simos) not TAB((((silic*) adj4 (qbit* or qubit* or (quantum bit*))) or simos) near superconduct*)</p> <p>Requête qubit de spin : TAB=(spin* adj (qbit* or qubit* or (quantum bit*)))</p> <p>Requête qubits à partir de nanotube de carbone : TAB=((carbon* or graphen*) adj4 (qbit* or qubit* or (quantum bit*)))</p> <p>Requête qubit à effet Hall : TAB=((hall*) near4 (qbit* or qubit* or (quantum bit*))) or (quantum Hall effect))</p>
Correction d'erreurs	((AIC=(G06N0010*) OR (AIC=(G06N0099*) AND CTB=(quantum*))) AND (CL1=(error adj (correct* or suppr* or mitigat*)) OR (fault adj tolerant)) or TAB=(error correction code))
Compilation	((AIC=(G06N0010*) OR (AIC=(G06N0099*) AND CTB=(quantum*))) AND (CL1=(compil*)))
Logiciel (hors correction d'erreurs et compilation)	((AIC=(G06N0010*) OR (AIC=(G06N0099*) AND CTB=(quantum*))) AND ((CL1=(algorithm* or simulat* or model* or calcul* or comput* or process* or *executable* or operation or instruction or (task distribution) or (solving method) or (storage method) or (optimization method) or software or program or ((neuronal or neural) adj network*))) NOT ((CL1=((fabric* or manufactur*) near2 (method or process))) NOT (AIC=(G06F*))) OR (CL1=(processor* or computer* or ((quantum or calcul* or process* or comput* or integrat*) near3 (syst* or device or circuit or apparatus or unit or element* or cluster or chip* or machine)))) NOT (AIC=(G06F*) or CL1=(algorithm* or simulat* or executable or (gate operation) or (quantum program) or (computer-implemented method) or (method of operation) or compilation or (compiled near program)))) OR ((AIC=(G06N001040* or B82Y0010*) NOT (CL1=(softw*)))

Applications	Apprentissage supervisé: CTB=((machine learning) or (neural network*) or (artificial intelligence) or (deep learning) or (supervised learning)) or AIC=(G06N0020*)
	Informatique hybride: (CTB=((hybrid near (comput* or processor* or hardware)) or HPC-Quantum or (hybrid digital/quantum) OR ((classical-quantum or (classical adj quantum)) adj (comput* or loop))))

CORPUS PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

Les corpus de publications scientifiques utilisés sont été construit via des données extraites de OpenAlex (base de données Open Source).

Domaine étudié	Champs de recherche	Requête
Informatique quantique	(titre OR abstract) au sein de l'ensemble « liste des articles »	quantum AND (computer OR computing OR computation OR processing OR processed OR process OR processor OR processable OR calcul OR calculation OR calculate OR calculator OR calculative OR calculating)
Informatique quantique Informatique quantique limité au corpus des publications académiques dans lesquelles un auteur est également mentionné comme inventeur dans un brevet du domaine	((titre OR abstract) OR (concept)) AND (nom d'auteur au sein de l'ensemble « liste des noms d'inventeurs » ²⁹)	(«quantum computer» OR «quantum computation» OR «quantum computing» OR «quantum processing» OR «quantum processed» OR «quantum processor» OR «quantum process» OR «quantum calcul» OR «quantum processable» OR «quantum calculation» OR «quantum calculate» OR «quantum calculator» OR «quantum calculative» OR «quantum calculating»)
Compilation quantique	Titre OR Abstract	((quantum AND (computer OR computing OR computation)) AND compilation)
Correction d'erreurs quantiques	Titre OR Abstract	((quantum AND (computing OR computation OR computer)) AND ((error AND (correction OR suppression OR mitigation)) OR fault tolerant))

8 BIBLIOGRAPHIE

- ▶ Gouvernement français, « [Dossier de presse du lancement de la stratégie quantique](#) », Janvier 2021
- ▶ Olivier Ezratty, « [Understanding Quantum Technologies \(Sixth Edition\)](#) », 2023
- ▶ QUANTERA, « [Quantum Technologies Public Policies in Europe](#) », 2023
- ▶ X. Fu, L. Riesebos, L. Lao, C. G. Almudever, F. Sebastiano, R. Versluis, E. Charbon, and K. Bertels. « [A heterogeneous quantum computer architecture](#) ». Proceedings of the ACM International Conference on Computing Frontiers (CF '16), Association for Computing Machinery, New York (USA), 2016, p. 323–330
- ▶ M. Purkeypille « [Cove: A Practical Quantum Computer Programming Framework](#) », arXiv.org, Novembre 2009
- ▶ IQM Quantum Computers, « [The 2024 State of Quantum](#) », Janvier 2024
- ▶ Michel Kurek, « [Quantum Technologies : Patents, Publications & Investissements Landscape](#) », Septembre 2020
- ▶ V.Hassija, V.Chamola, V.Saxena, V.Chanana, P.Parashari, S.Mumtaz and M.Guizani, « [Present landscape of quantum computing](#) », IET Quantum Communication, 2020

9 REMERCIEMENTS

L'INPI tient à exprimer ses sincères remerciements aux entreprises qui ont contribué à cette étude, à savoir :

- ▶ C12 Quantum Electronics
- ▶ Pasqal
- ▶ Quobly



www.inpi.fr



statsdatapi@inpi.fr



INPI Direct

+33 (0)1 56 65 89 98



L'INPI près de chez vous :
liste et adresses sur
www.inpi.fr ou INPI Direct

f in X

INPI France