

Barlomiej K. Wroblewski/Shutterstock.com

ÉCONOMIE

Juillet 2021 • www.institutparisregion.fr

L'ÉCOSYSTÈME QUANTIQUE FRANCILIEN ACCÉLÈRE SA CROISSANCE

112

ÉQUIPES DE RECHERCHE EN ÎLE-DE-FRANCE

850

CHERCHEURS PUBLICS

4^e

POSITION MONDIALE DE L'ÎLE-DE-FRANCE POUR LE NOMBRE DE START-UP QUANTIQUES CRÉÉES, APRÈS LES ÉTATS-UNIS, LE ROYAUME-UNI ET LE CANADA

LES TECHNOLOGIES QUANTIQUES, LIÉES À L'INFINIMENT PETIT, VONT RÉVOLUTIONNER UN LARGE PAN DE NOS ACTIVITÉS. ELLES REPRÉSENTENT UN FORT ENJEU DE SOUVERAINETÉ PAR LEUR CAPACITÉ À CONFÉRER UN AVANTAGE DÉCISIF DANS LES DOMAINES DE LA COMMUNICATION, LA SÉCURITÉ ET LA PUISSANCE DE CALCUL. LA FRANCE ET L'ÎLE-DE-FRANCE FIGURENT PARMI LES LEADERS MONDIAUX EN MATIÈRE DE RECHERCHE FONDAMENTALE, ET L'ON OBSERVE L'ÉMERGENCE D'UN ÉCOSYSTÈME RÉGIONAL, QUE LES RÉCENTS PLANS QUANTIQUES NATIONAL ET RÉGIONAL DEVRAIENT RENFORCER.

Les promesses du quantique se précisent. Plusieurs applications sont d'ores et déjà sorties des laboratoires de recherche fondamentale, et ce n'est que le début. La France est l'un des principaux acteurs mondiaux en matière de recherche, mais elle a souffert d'un relatif retard en matière de structuration de son écosystème, alors que les États-Unis, le Royaume-Uni, le Canada et d'autres pays en Europe ont mis en place des stratégies quantiques assorties d'importants financements plus tôt. Néanmoins, une accélération des investissements dans ce domaine est en cours, permettant de renforcer et de structurer l'écosystème, qui va aussi bénéficier de l'impulsion du plan quantique national et du renforcement des actions quantiques régionales, déjà anciennes, par des annonces faites début 2021.

LE QUANTIQUE, POUR QUOI FAIRE ?

Les technologies quantiques utilisent les propriétés naturelles particulières des objets de l'infiniment petit pour créer des applications dans de nombreux domaines : informatique, communications, sécurité, énergie, chimie, santé, transports... On parle de « physique » et « d'ingénierie » quantique, puis d'« informatique quantique » pour développer les applications envisagées.

L'informatique quantique promet des puissances de calcul multipliées par un facteur considérable par rapport aux supercalculateurs actuels, qui utilisent l'informatique classique, le gain en puissance de calcul dépendant des opérations spécifiques réalisées.

L'avènement du quantique sonnera ainsi le glas de la sécurité des données telle que nous la connaissons avec la cryptographie (technique de chiffrement des messages) actuelle. Il offrira

LA STRATÉGIE NATIONALE POUR LES TECHNOLOGIES QUANTIQUES

Le plan quantique français annoncé en janvier 2021 dispose d'un budget de 1,8 milliard d'euros sur cinq ans. Il vise à financer la recherche dans toutes ses composantes, et à soutenir des programmes de maturation technologique, le développement industriel et la croissance des start-up. Il favorise aussi la montée en puissance des filières de formation ou encore le transfert industriel.

des solutions de chiffrement des données d'un niveau inégalé. Il devrait permettre la mise en place d'un Internet sécurisé de bout en bout et, d'une manière générale, une sécurisation de l'ensemble des communications.

Le développement d'une large gamme de capteurs quantiques aux performances augmentées aura des applications dans la navigation autonome, l'imagerie, les radars, etc.

Le quantique permettra aussi d'augmenter fortement les capacités de simulation et d'optimisation des systèmes complexes, voire de très grande taille, pour de nombreuses applications. Ainsi, il permettra à l'intelligence artificielle de sauter un pas en accélérant fortement ses capacités d'apprentissage (*machine learning*). Dans la santé, il facilitera ou accélérera la découverte de nouvelles molécules, permettant la création de nouveaux médicaments, avec une meilleure capacité de simulation des interactions entre molécules médicamenteuses, d'une part, et avec le patient, d'autre part, et accélérant en même temps les essais cliniques.

Simulation et optimisation des réseaux énergétiques, optimisation de la gestion de production complexe dans l'industrie, de la gestion de flottes dans le transport, de la gestion des vols et des passagers dans les aéroports... l'ensemble de ces cas d'usage figurent parmi les applications en cours d'évaluation par des acteurs économiques que l'on qualifie d'« utilisateurs précoces ».

Ces usages illustrent le caractère stratégique que revêt la maîtrise de la technologie quantique, tant pour développer de nouveaux marchés et applications que pour conserver la souveraineté des données. Ce n'est d'ailleurs pas un hasard si les acteurs du monde de la Défense font partie des premiers à avoir manifesté leur intérêt.

Le quantique représente un marché mondial estimé à environ 500 millions de dollars en 2020, qui devrait croître fortement d'ici 2030 pour atteindre plus de 3 milliards de dollars, selon le cabinet d'études de marché Yole Développement (voir Figure 1).

OÙ EN EST LA RECHERCHE ?

Il existe plusieurs axes principaux de recherche et de développement des technologies quantiques.

L'informatique quantique (matériels)

Le matériel spécifique pour fabriquer un ordinateur quantique fait l'objet de nombreuses recherches dans le monde, avec principalement des acteurs nord-américains, chinois et européens, parmi lesquels des britanniques, français, finlandais et autrichiens. Cependant, l'avènement d'un ordinateur quantique universel (ordinateur quantique pouvant assurer tout type de calcul pour tout type de problème) est encore lointain, voire impossible, selon certains spécialistes. De multiples voies sont explorées simultanément, et l'on se dirige actuellement vers des solutions hybrides, couplant des supercalculateurs classiques (*High Performance Computing*, HPC – calcul haute performance) à des modules de calcul quantiques.

Les logiciels quantiques

Le domaine des logiciels spécialisés pour simuler ou faire fonctionner un ordinateur quantique est l'un des plus avancés. De nombreux acteurs mondiaux sont positionnés sur ce créneau, notamment nord-américains, et des offres sont déjà disponibles soit avec du matériel physique soit via le *cloud* (informatique en nuage). Le constructeur français Atos est le leader européen dans ce domaine.

Les capteurs quantiques

Ces dispositifs utilisent les propriétés quantiques pour proposer des appareils de mesure ultra-précis : magnétomètres, accéléromètres, horloges atomiques... Ce domaine est le plus mature, car il fait appel à des technologies plus accessibles, avec déjà de nombreuses applications et un marché important.

La communication quantique

Il s'agit de développer un réseau de communication terrestre et satellitaire, et un Internet fondé sur les technologies quantiques. Ces communications bénéficieront d'un niveau de sécurité ultra-renforcé grâce aux technologies de cryptographie quantique et permettront l'interconnexion des calculateurs quantiques. Ce domaine fait l'objet de recherches avancées sur tous les continents, à commencer par les États-Unis et la Chine, mais aussi l'Union européenne et l'espace européen au sens large, avec le Royaume-Uni et la Suisse.

La cryptographie quantique

Il s'agit de solutions de cryptographie fondées sur les propriétés quantiques. Ce domaine est fortement associé aux communications quantiques. Bien que l'ordinateur quantique ne soit pas encore une réalité, son avènement ou l'apparition de modules quantiques ajoutés aux supercalculateurs est de nature à révolutionner le chiffrement des données. Les acteurs de la cryptographie proposent d'un côté des solutions de cryptographie post-quantique (utilisant des outils mathématiques dont le déchiffrement ne serait théoriquement pas possible, même par un ordinateur quantique) et de l'autre des solutions de cryptographie quantique (utilisant les propriétés physiques du quantique, offrant une sécurité absolue). On se dirige actuellement vers l'utilisation d'une combinaison de ces techniques pour la sécurisation des communications à court et à long termes. L'arrivée de la 5G, ainsi que la *blockchain* (technologie de stockage et de transmission d'informations sans organe de contrôle) devraient fortement augmenter les besoins en la matière.

QUELLE EST LA PLACE DE L'ÎLE-DE-FRANCE ?

Selon le rapport de la députée Paula Forteza¹, l'Île-de-France et la région de Grenoble représentent 80 % du potentiel quantique français, et l'Île-de-France accueille deux des trois principaux pôles d'excellence quantiques français. À l'origine du développement de l'écosystème quantique

L'ÉCOSYSTÈME QUANTIQUE FRANCILIEN

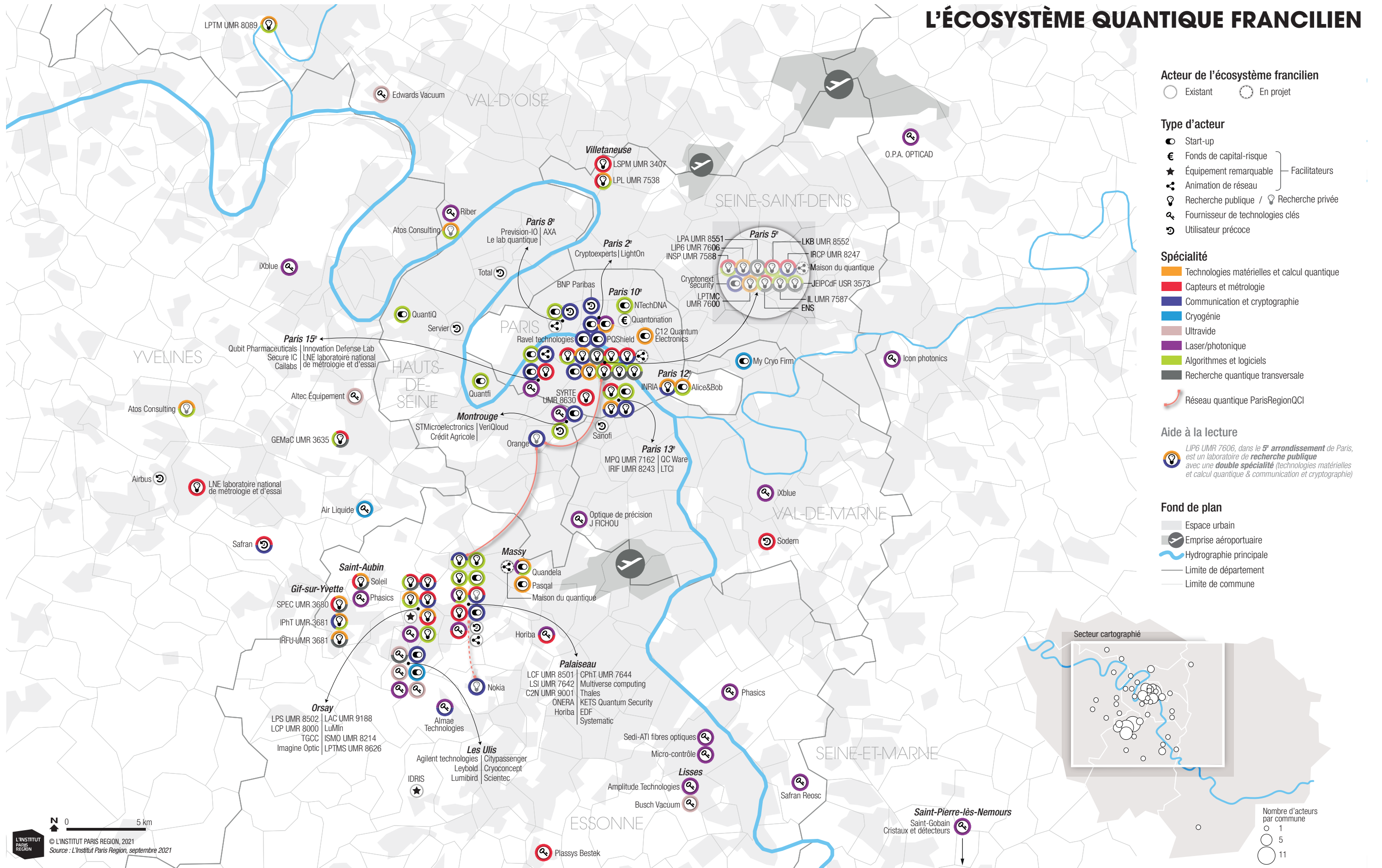


figure l'importante communauté de recherche fondamentale structurée autour des pôles de Paris (Paris Center for Quantum Technologies) et de Paris Saclay (Quantum Paris Saclay), soutenue par le DIM (domaine d'intérêt majeur) Sirteq (Science et ingénierie en région Île-de-France pour les technologies quantiques). Elle regroupe 848 personnels de recherche publics, dont 250 chercheurs équivalent temps plein² qui travaillent sur ce sujet au sein de 33 laboratoires et de 112 équipes de recherche. Parmi ses membres, on compte notamment le CNRS, le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), l'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (Inria), l'Université Paris Saclay, Sorbonne Université, l'Université Paris Sciences & Lettres (PSL), l'Université de Paris...

La force de la recherche francilienne, outre son excellence reconnue mondialement, réside dans la variété des thématiques abordées (voir carte).

Start-up et grands groupes

Au-delà de la recherche, qui reste essentielle pour ces technologies encore émergentes, le jeune écosystème quantique francilien compte, en 2021, plus de 60 acteurs privés, dont une vingtaine de start-up, 24 entreprises fournissant des technologies « habilitantes » (nécessaires à l'avènement de l'ordinateur quantique) et 14 grands groupes, acteurs privés de la recherche sur le quantique ou « utilisateurs précoces », dont Atos (voir Figure 2). Ce dernier, fournisseur d'équipements de calcul haute performance et de solutions logicielles de simulation, est la première entreprise industrielle européenne du quantique, avec son programme Atos Quantum. D'autres grands groupes mènent des activités de recherche dans le domaine du quantique, comme Thales (sur la sécurité des réseaux, les capteurs et la métrologie, c'est-à-dire la science des mesures), Orange et Nokia (sur la communication et la cryptographie), ou encore Total Énergies et EDF (sur le calcul intensif). L'intérêt de ces acteurs économiques pour ces technologies constitue un autre atout pour l'écosystème francilien. En procédant à des preuves de concept en vue d'une intégration de ces technologies à leurs activités et en proposant des cas d'usage, ces « utilisateurs précoces » accélèrent la sortie des technologies quantiques des laboratoires et l'émergence de start-up. Pour favoriser l'adhésion des industriels et soutenir les start-up de l'écosystème francilien, la Région Île-de-France a mis en place, depuis 2020, le programme PAck Quantique (PAQ), lancé et porté conjointement par le Grand équipement national de calcul intensif (Genci) et le Lab Quantique, avec un financement de 1,5 million d'euros sur trois ans (voir encadré ci-contre).

L'écosystème francilien montre aussi son dynamisme à travers l'éclosion de start-up, souvent issues des laboratoires publics de recherche, dont plusieurs leaders dans leur domaine. Selon le rapport de l'expert Olivier Ezratty et nos propres estimations, l'Île-de-France compte, en 2021,

22 start-up dans le domaine du quantique. La région abrite ainsi trois start-up quantiques françaises sur quatre³. C'est plus que le nombre de start-up quantiques identifiées pour toute l'Allemagne (13), ce qui place l'Île-de-France à la 4^e place mondiale en matière de création et d'accueil de start-up quantiques, après les États-Unis, le Canada et le Royaume-Uni. Parmi celles-ci, on peut citer Quandela (elle propose un dispositif unique d'émission de photons individuels) et Pasqal (son futur simulateur quantique à base d'atomes froids sera couplé au supercalculateur Joliot-Curie du Genci et du CEA), ou encore Alice&Bob, LightOn et C12 Quantum Electronics, aussi positionnées sur l'ordinateur quantique (voir Figure 3).

L'écosystème bénéficie aussi de la présence d'acteurs et de fortes compétences dans les technologies habilitantes : la cryogénie (températures inférieures à -150 °C), l'ultravide (niveau de vide très poussé), l'optique et le laser. Les start-up Cryoconcept et Mycryofirm, par exemple, sont spécialisées dans la cryogénie. L'écosystème compte aussi des acteurs plus anciens, comme Riber et Agilent Technologies (dans l'ultravide), Ixblue et, à nouveau, Riber (dans les lasers et la photonique), ou encore Plassys Bestek (dans les couches minces et les capteurs). Cryoconcept a fait l'objet d'une prise de participation majoritaire de la part d'Air Liquide en 2020, permettant à ce dernier de se positionner sur le marché du quantique.

Un écosystème très intégré

L'écosystème quantique est fortement intégré, avec d'importantes synergies entre les acteurs académiques, ceux de la recherche publique et de l'industrie, et les start-up. La participation à de nombreux projets de recherche communs, qu'ils soient français ou européens, reflète cette synergie et participe à son renforcement.

L'écosystème quantique francilien bénéficie aussi de l'action de facilitateurs divers, qu'ils soient issus du monde de la recherche ou du privé. Du côté de la recherche, outre le DIM Sirteq, deux structures fédèrent et animent localement le pôle parisien, avec le Paris center for quantum technologies (PCQT), et celui de Paris Saclay, avec Quantum Paris Saclay. Ces actions locales ont vocation à se poursuivre, en articulation avec les actions nationales et régionales.

Ces structures sont complétées par l'action du pôle de compétitivité Systematic Paris Region, dédié aux *deeptechs* (technologies de rupture), qui joue un rôle d'animateur de la communauté entrepreneuriale. La création, en 2018, du fonds d'amorçage privé Quantonation, seul de sa catégorie en Europe à être spécifiquement consacré aux technologies quantiques et aux *deeptechs*, a indéniablement renforcé cette dynamique. Désormais doté d'un fonds de 20 millions d'euros, il participe au capital de douze start-up, dont trois créées en Île-de-France et trois étrangères, qui sont venues s'y implanter. Pour compléter ce tour d'horizon, le Lab Quantique participe à l'animation de la communauté quantique française.

LES ACTIONS FRANCILIENNES EN MATIÈRE DE QUANTIQUE

Le DIM Sirteq, doté d'un budget de 12 millions d'euros sur quatre ans (2017-2021), a joué un rôle précurseur pour fédérer et organiser la recherche académique francilienne, et notamment faire émerger des start-up.

La Région Île-de-France a soutenu par la suite plusieurs actions, avec une ambition plus marquée de développement économique, pour un budget voté, à date, de plus de 3 millions d'euros : le PAck Quantique (PAQ) finance l'implémentation de technologies quantiques issues des start-up franciliennes pour démontrer, si possible, un avantage quantique. En 2020, trois preuves de concept ont ainsi été lancées, impliquant notamment les start-up Pasqal et Qubit Pharmaceuticals, ainsi que Total Énergies et EDF. Le projet Paris Région QCI (Quantum Communication Infrastructure), coordonné par Orange, vise le déploiement d'un réseau de communication quantique entre Saclay, Châtillon et Paris pour tester des solutions de communications sécurisées, notamment.

Enfin, la Région a apporté son soutien au projet Quarbone et à la start-up C12 pour concevoir un accélérateur quantique fondé sur les nanotubes de carbone.

Parmi les autres atouts de la région, citons la présence de deux centres de calcul haute performance en Essonne : le Très grand centre de calcul (TGCC), à Bruyères-le-Châtel, et l'Institut du développement et des ressources en informatique scientifique (Idris), à Orsay, où l'on trouve les supercalculateurs du Genci, opérés respectivement par le CEA et le CNRS. Ces deux machines disposent de capacités de calcul classique multipétaflopiques (unité de mesure de quantité de calculs numériques) dédiées à la recherche académique et industrielle ouverte, française et européenne. Dans le cadre de la stratégie quantique nationale, le supercalculateur Joliot-Curie, hébergé au TGCC, va offrir des services de simulation de calcul hybrides HPC/quantique via son couplage au simulateur Fresnel de la start-up Pasqal.

UNE NETTE ACCÉLÉRATION DEPUIS 2019

L'écosystème francilien connaît une phase d'accélération et d'internationalisation. Douze start-up ont été créées entre 2017 et 2020 en Île-de-France. En 2021, trois start-up étrangères s'y sont aussi installées, avec l'appui de Choose Paris Region : KETS Quantum Security et PQShield (Royaume-Uni), ainsi que Multiverse Computing (Espagne) s'ajoutent à la start-up QCWare (États-Unis), implantée depuis septembre 2019. D'autres projets d'implantations sont à l'étude. Cette internationalisation témoigne de l'attractivité de l'Île-de-France dans ce domaine, qui offre de nombreuses perspectives grâce aux projets collaboratifs auxquels participent ces start-up étrangères, et à la présence d'utilisateurs précoces comme Orange, EDF, Airbus, Total Énergies, Sanofi, Servier et, plus récemment, Crédit Agricole CIB, qui sollicitent leurs services afin de tester des solutions (voir Figure 4).

UN PLAN QUANTIQUE NATIONAL ET DES ACTIONS EN ÎLE-DE-FRANCE

Déjà impliqué dans le projet européen Quantum Flagship, doté d'un budget de 1 milliard d'euros pour financer des projets de recherche collaboratifs, l'écosystème quantique francilien va bénéficier de deux annonces récentes : le plan quantique national, en janvier 2021, qui propose 1,8 milliard d'euros (un montant similaire aux plans anglais, allemand ou américain), et l'action régionale en faveur du quantique (dans la lignée de l'investissement de la Région de 12 millions d'euros dans le DIM SIRTEQ), qui financera des projets de recherche et des infrastructures quantiques franciliennes, avec 3 millions d'euros pour consolider l'écosystème et attirer de nouveaux acteurs.

D'autres projets sont à l'étude, comme la création d'une ou deux « Maisons du quantique », lieux totems destinés à incarner l'écosystème quantique francilien, à travers l'accueil de conférences, de sessions de mentorat, de domiciliation de start-up étrangères et, potentiellement, d'industriels, afin de favoriser les synergies.

L'écosystème quantique francilien est au début d'une histoire prometteuse, qui va continuer à nécessiter un important appui à la recherche fondamentale. Par ailleurs, l'animation de l'écosystème reste un enjeu clé, notamment à travers les projets collaboratifs de recherche, mais aussi à travers les projets autour de cas d'usage pour attirer de nouveaux acteurs. Enfin, le grand défi pour cette communauté est de gérer les concurrences territoriales et nationales, notamment au niveau européen, principalement avec l'Allemagne, qui reste le seul autre poids lourd du quantique depuis le Brexit. Une collaboration à tous les niveaux est nécessaire pour pouvoir peser face à des écosystèmes importants (États-Unis et Chine en tête) dotés de moyens très importants. L'échelle européenne est la seule échelle à laquelle il sera possible de bâtir une souveraineté dans le domaine du quantique. ■

Thierry Petit, économiste
département Économie (Vincent Gollain, directeur)

- « Quantique, le virage technologique que la France ne ratera pas », rapport parlementaire dirigé par Mme la Députée Paula Forteza, janvier 2020.
- Il s'agit d'une estimation à partir de données incomplètes.
- Selon le rapport d'Olivier Ezratty, il existait 25 start-up actives dans le domaine du quantique en France en septembre 2020. À cette date, selon nos estimations, il y en avait 19 en Île-de-France, soit 76%. « Comprendre l'informatique quantique », Olivier Ezratty, septembre 2020.

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

Fouad Awada

DIRECTRICE DE LA COMMUNICATION

Sophie Roquelle

RÉDACTION EN CHEF

Laurène Champalle

MAQUETTE

Jean-Eudes Tilloy

INFOGRAPHIE/CARTOGRAPHIE

Pascale Guéry

MÉDIATHÈQUE/PHOTOTHÈQUE

Inès Le Meledo, Julie Sarris

FABRICATION

Sylvie Coulomb

RELATIONS PRESSE

Sandrine Kocki

33 (0)1 77 49 75 78

L'Institut Paris Region

15, rue Falguière
75740 Paris cedex 15
33 (0)1 77 49 77 49

ISSN 2724-928X
ISSN ressource en ligne
2725-6839



institutparisregion.fr



RESSOURCES

- Ezratty Olivier, « Comprendre l'informatique quantique », *ebook*, 2020.
- « Stratégie nationale sur les technologies quantiques », dossier de presse, janvier 2021.
- « L'ordinateur quantique va-t-il tuer la blockchain ? », Bilan, mars 2021.
- Roger Renaud, Mot Alexandre (CEIS), De la Ménardièrre Basile (CEIS), « La cybersécurité : de la maîtrise des risques au développement des territoires », *Note rapide Économie*, n° 827, L'Institut Paris Region, décembre 2019.

L'INSTITUT
PARIS
REGION