



GOUVERNEMENT

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Stratégie nationale sur les technologies quantiques



SACLAY
21 janvier 2021



Sommaire

Le quantique : un « Big Bang » technologique.....	5
Les impacts socio-économiques	6
Mieux se soigner	6
Mieux se nourrir.....	6
Mieux combattre le changement climatique et ses effets	7
Mieux anticiper les catastrophes naturelles	7
Mieux se déplacer	8
Mieux produire.....	8
Mieux se protéger des menaces sur la sécurité des communications	9
Mieux se préparer aux conflits de demain	9
Les atouts de la France dans la course à l'ordinateur quantique universel	10
La France dans la compétition internationale	10
Stratégie quantique : 5 ans pour asseoir la France dans le premier cercle mondial.....	11
Les objectifs clés	12
Les chiffres clés.....	12
Synthèse des financements	13
1. Développer et diffuser l'usage des simulateurs et accélérateurs NISQ [352 M€]	14
2. Développer l'Ordinateur Quantique Passant à l'Echelle LSQ [432 M€]	15
3. Développer les technologies et applications des Capteurs Quantiques [258 M€]	16
4. Développer l'offre de Cryptographie Post-Quantique [156 M€]	17
5. Développer les systèmes de communications quantiques [325 M€]	18
6. Développer une offre de technologies habilitantes compétitive [292 M€]	19
7. Structurer transversalement l'écosystème	20
Opportunités de coopération internationales	21
Mise en œuvre	22
Les faits marquants dans l'écosystème quantique national, ces 6 derniers mois	23
Prochains appels à projets / 1 ^{er} semestre 2021	25

Editorial



Emmanuel Macron
Président de la République
Française

Les technologies quantiques nous projettent dans la France de 2030, celle que nous construisons à travers France Relance et les investissements d'avenir : un monde où les performances des ordinateurs seront fulgurantes et la sensibilité des capteurs extrêmes, un monde où nous pourrions identifier très rapidement le remède à un agent pathogène, simuler des molécules, décrypter des messages aujourd'hui indéchiffrables et communiquer de façon parfaitement sécurisée.

Une nouvelle révolution technologique se profile et la France y prendra toute sa part. Pour viser haut, nos regards doivent porter loin. Si, dans la gestion d'une crise sanitaire, la réactivité compte, les forces profondes d'un pays se construisent au minimum sur des années, sinon des décennies. Ce temps long du travail scientifique, cette anticipation que demandent la découverte et l'expérimentation, est au cœur de notre politique d'investissement dans la recherche et le développement technologique.

Aujourd'hui la France a toutes les clefs en main pour ouvrir les portes de l'innovation quantique. L'excellence de notre tradition scientifique évidemment. La qualité de nos formations. Des femmes et des hommes de talent. Un écosystème scientifique, entrepreneurial et industriel en pleine effervescence. Des acteurs qui bâtissent entre leurs compétences des ponts qui les rendent plus forts. De fait, dans la course à ces nouvelles technologies, nous sommes en très bonne place. Et nous allons encore forcer l'allure.

La stratégie quantique de la France donnera un grand coup d'accélérateur aux formations, aux recherches scientifiques et aux expérimentations technologiques, tout en renforçant les chaînes de valeur industrielles. Avec ce plan, nous entendons asseoir durablement la France dans le premier cercle des pays qui maîtrisent les technologies quantiques. Il s'agit de rien moins que de conquérir notre souveraineté dans ce domaine technologique qui façonnera le futur.

Cet élan s'accompagne d'une responsabilité, que nous portons en conscience, pour que cette révolution quantique bénéficie au bien commun, car elle est pleine de promesses pour l'avenir, pour notre santé, notre sécurité, nos communications. La France, pionnière de la recherche dans le domaine, se donne ainsi toutes les chances de saisir l'opportunité technologique qui s'ouvre à elle.

Cette stratégie, qui représente un engagement global de 1,8 Mds€, nécessitera un effort cumulé de l'Etat de près de 1 Md€ à l'horizon 2025, et comprend des financements européens et industriels.

Au-delà de cette dynamique nationale puissante, la France cherchera à entraîner d'autres pays européens, dont l'Allemagne et les Pays-Bas, vers un horizon commun, avec l'ambition de faire de l'Europe le centre de gravité mondial des technologies quantiques.

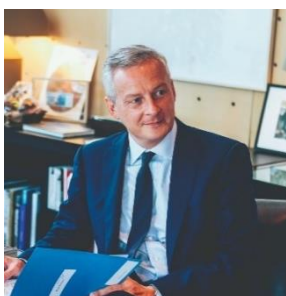
Au cœur de cette crise, je crois profondément que nous devons agir, penser, chercher en explorateurs, en inventeurs, en pionniers, en poursuivant la grande épopée européenne de l'esprit scientifique.

Nous avons toutes les raisons d'y croire.

Editorial



Florence Parly
Ministre des Armées



Bruno Le Maire
Ministre de l'Économie,
des Finances et de la
Relance



Frédérique Vidal
Ministre de l'Enseignement
Supérieur, de la Recherche
et de l'Innovation



Cédric O
Secrétaire d'Etat au numérique

Dans le contexte de relance globale, la France peut et doit se positionner à la pointe des technologies qui feront le monde de demain. Par le déport avant sans précédent qu'elles annoncent, les technologies quantiques constituent à la fois une menace et une opportunité.

Bien qu'encore exigeantes à mettre en œuvre, les premières applications nous laissent entrevoir les immenses capacités des ordinateurs, réseaux de communication et capteurs quantiques, dont la maîtrise conférerait un avantage stratégique, souvent rêvé en terme de 'suprématie', mais pourtant bien réel pour les Etats qui en disposeraient, et constituerait une source d'asymétrie dans tous les domaines multilatéraux.

C'est l'ampleur hors-norme du défi de souveraineté auquel nous sommes confrontés, et que la France a choisi de relever avec sa stratégie quantique. En s'appuyant sur l'héritage d'une recherche d'excellence dans le domaine, d'un écosystème industriel favorable et d'une ardeur entrepreneuriale enthousiasmante, cette stratégie donne des moyens et un sens commun dans la durée aux multiples acteurs de cette communauté, pour ancrer et pérenniser la France dans le premier cercle des puissances quantiques.

Ce sera une aventure scientifique et intellectuelle captivante, dont émergera une nouvelle discipline à la croisée des sciences physiques, informatiques, et des mathématiques, qui devra surmonter de nombreux verrous conceptuels et techniques aux frontières de notre maîtrise de la matière. Ce sera également un parcours technologique et industriel structurant, au cœur des actions que nous mènerons dans les 5 prochaines années, avec l'objectif permanent de créer de la valeur économique, durablement adossée à une filière industrielle complète, aux talents que nous formerons et aux nouveaux emplois qui en découleront.

Nous porterons de toutes nos forces cet élan, pour qu'il contribue à créer une dynamique européenne féconde, et que les technologies quantiques rejoignent la liste des réalisations fondatrices de notre histoire commune, lorsque nous sommes alignés au meilleur de nous-même.

Le quantique : un « Big Bang » technologique

Le raccourcissement des temps de calcul d'un facteur de un milliard, qu'apporteront les ordinateurs quantiques d'ici 5 à 10 ans, constitue une rupture technologique majeure. L'industrie bénéficiera de nouveaux outils de simulation et d'optimisation avec des impacts sociétaux importants, notamment en matière de santé, environnement ou énergie, grâce à la possibilité de simuler dynamiquement les molécules et leur action, ouvrant une nouvelle ère de la chimie, ou encore de prédire finement les propagations épidémiques ou d'optimiser le trafic de manière systémique en temps réel. Par ailleurs, les techniques d'ultra-refroidissement des atomes permettront de dépasser la précision de nos horloges atomiques et les capteurs quantiques bouleverseront nos futurs champs de bataille, en apportant de nouvelles fonctionnalités de navigation sans satellite, ou encore des capacités de détection inédites.

Les technologies quantiques représentent des enjeux de compétitivité et de souveraineté importants et nous serons demain en difficulté si nous ne disposons pas à terme de capacités technologiques propres dans le domaine ou si nous n'adaptions pas nos outils à ces nouvelles réalités. La puissance des ordinateurs quantiques permettrait par exemple, à qui en bénéficie le premier et en aurait l'intention, de casser de manière unilatérale les clefs de chiffrement aujourd'hui inviolables, notamment celles qui sont basées sur le protocole de chiffrement RSA, utilisé par exemple pour nos paiements sécurisés par carte bleue. C'est pourquoi il est crucial de se protéger de ce type de menaces avec des mesures cryptographiques appropriées, et d'en éprouver la robustesse avec nos propres moyens de calcul quantiques.

Les technologies et ordinateurs quantiques conféreront à moyen terme un avantage stratégique certain aux acteurs économiques qui s'en seront saisis. Au regard des enjeux de croissance économique et de souveraineté, et à l'instar des principales grandes puissances mondiales, les Etats-Unis, la Chine, le Royaume-Uni ou l'Allemagne, nous mettons aujourd'hui en place un programme national ambitieux : la France a les moyens de saisir l'opportunité des technologies quantiques et de devenir un leader mondial en la matière.

Aujourd'hui, la France possède les principaux atouts pour s'imposer comme un compétiteur scientifique et industriel majeur dans les technologies quantiques, notamment grâce au positionnement historique de sa recherche sur différentes briques technologiques clefs allant du composant à l'usage, mais aussi de ses industriels précurseurs et de son écosystème dynamique de startups.

En se fondant sur ces atouts, la stratégie quantique doit permettre à la France d'entrer dans le premier cercle des pays qui maîtrisent les technologies quantiques. Fortement systémique, cette stratégie vise à enrichir et affirmer notre capabilité sur le plan scientifique et technologique, mais aussi dans les chaînes de valeur industrielles, le développement du capital humain ou encore l'anticipation des besoins de compétences pour ces marchés, en doublant progressivement le vivier de spécialistes à l'horizon 2025, afin de garantir et pérenniser notre indépendance dans ce domaine technologique qui façonnera le futur.

Les impacts socio-économiques

Mieux se soigner



A l'heure où les supercalculateurs du monde entier sont mobilisés pour rechercher un remède adapté au Coronavirus, les ordinateurs quantiques pourraient devenir l'un des outils les plus puissants jamais conçus pour lutter contre les crises sanitaires, permettant d'identifier très rapidement le remède à un agent pathogène.

Dès aujourd'hui, plusieurs start-ups quantiques, dont certaines en France, développent des solutions logicielles hybrides entre supercalculateurs et ordinateurs quantiques pour

découvrir de nouvelles thérapies. Avec un ordinateur quantique, nous pourrions faire de la simulation avancée et ainsi concevoir des médicaments non plus de manière empirique, mais de façon déterministe. Les ordinateurs quantiques pourraient également fournir la puissance d'analyse nécessaire pour prédire la propagation d'un agent pathogène avant qu'il ne se transforme en épidémie.

Mieux se nourrir

Le procédé « Haber-Bosch » de fixation de l'azote pour la fabrication d'engrais à base d'ammoniac, commercialisé en 1913 et toujours utilisé de nos jours, a fortement contribué à l'éradication de la famine des pays développés. Néanmoins, en faisant intervenir des conditions de température et de pression extrêmes, ce procédé reste très énergivore.

Depuis des décennies, les chimistes tentent d'améliorer l'efficacité énergétique de ce processus. Grâce à leur capacité à simuler efficacement des interactions physiques et chimiques au niveau atomique, les ordinateurs quantiques pourraient contribuer à l'identification d'un catalyseur bio-inspiré efficace pour la production d'ammoniac dans des conditions normales de température et de pression. Des travaux de recherche menés sur ce sujet ont démontré qu'il suffirait d'une heure de calcul à un ordinateur quantique de quelques centaines de qubits pour résoudre ce problème. Ceci pourrait être atteint dans les prochaines années.

Avec 3 % de la production mondiale de gaz naturel utilisée pour le procédé Haber-Bosch, nous dépensons chaque année 11 Mds€ en gaz naturel, et émettons 7,6 Mds de tonnes de CO₂ pour créer de l'ammoniac destiné à produire des engrais. En contribuant à réduire l'empreinte énergétique de production d'engrais, le calcul quantique pourrait alors offrir des perspectives substantielles d'économies et de réduction de l'impact écologique de l'industrie agroalimentaire.

Mieux combattre le changement climatique et ses effets

Avec la santé et l'alimentation, la lutte contre le changement climatique est le domaine pour lequel l'informatique quantique porte le plus d'espoirs pour les deux prochaines décennies. Le CO₂ est naturellement absorbé par les océans et la végétation. Néanmoins, la production humaine de CO₂ dépasse le taux d'absorption naturel depuis de nombreuses décennies. Une façon d'inverser cette tendance consiste à capter le CO₂ pour le retransformer en une molécule plus complexe.

Nous connaissons un ensemble de catalyseurs capables de capturer le CO₂, mais la plupart nécessitent des métaux rares ou sont difficiles à produire et coûteux à déployer. L'observation des processus biologiques d'assimilation du CO₂, à l'image de la photosynthèse, conforte néanmoins l'idée qu'il puisse exister des catalyseurs permettant de capturer facilement le CO₂ à moindre coût. Cependant, trouver un tel catalyseur est une tâche ardue sans la possibilité de simuler les propriétés moléculaires des différents candidats.

Grâce à ses capacités de simulation de la dynamique moléculaire et de recherche dans les espaces chimiques combinatoires immenses, les ordinateurs quantiques pourraient permettre d'identifier un procédé économiquement viable permettant un recyclage efficace du CO₂ et une production de sous-produits d'intérêt à l'image de l'hydrogène ou du monoxyde de carbone.

Mieux anticiper les catastrophes naturelles

L'anticipation des catastrophes naturelles est le domaine où des capteurs quantiques embarqués dans des satellites prennent tout leur sens, notamment dans le contexte de changement climatique dans lequel nous vivons.

Le développement d'accéléromètres à atomes froids opérant dans des satellites en orbite basse pourront mesurer les variations de champ de gravité causés notamment par la variation de répartition de masses au sol. Cette répartition de masse peut avoir différentes causes en lien avec différents types de catastrophes naturelles :



- Le chargement des nappes phréatiques, signes avant-coureurs d'inondation ou de sécheresse ;
- Le développement de biomasse, avec le cycle saisonnier, dont la variabilité peut signaler des évolutions structurelles des écosystèmes ;
- Les mouvements de matière dans le sous-sol, qui peuvent créer des contraintes qui seront libérées lors de séismes.

Les informations collectées par ces capteurs pourront être précieuses pour anticiper et mieux gérer les crises environnementales. Au-delà des capteurs, le traitement des informations ainsi collectées par les futurs ordinateurs quantiques suffisamment puissants permettra de caractériser les signes avant-coureurs de catastrophes naturelles.

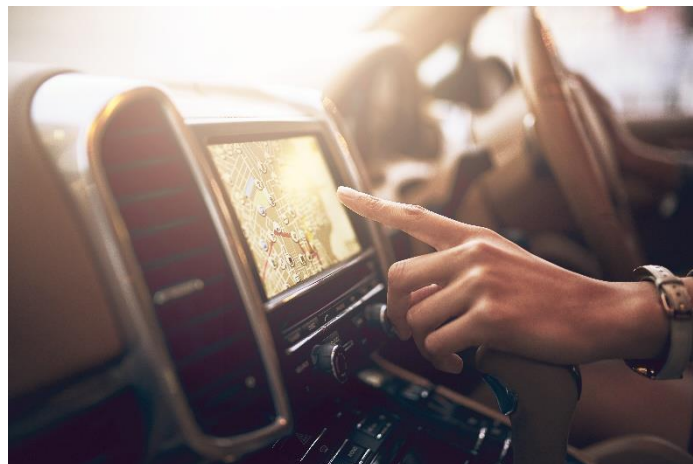
Mieux se déplacer

Aux heures de pointe, de nombreux conducteurs demandent en même temps les itinéraires les plus courts possibles, mais les services de navigation actuels traitent ces demandes de façon individuelle. Ils ne prennent pas en considération le nombre de demandes similaires, y compris dans les zones où d'autres conducteurs prévoient de partager les mêmes segments d'itinéraire. Avec des heures de départ similaires, une application GPS individuelle qui donne à chacun la même route pour aller à destination, créera inévitablement un engorgement au lieu de le fluidifier.

Que se passerait-il si nous pouvions développer un système de routage plus global – qui pourrait prendre en compte toutes les différentes demandes d'itinéraires des conducteurs et optimiser les suggestions d'itinéraires de manière à réduire au minimum le nombre de véhicules partageant les mêmes routes ?

Cela pourrait faire gagner du temps à tout le monde. Néanmoins le nombre de facteurs en jeu – des milliers de véhicules, des millions d'itinéraires et de destinations possibles – fait que même les supercalculateurs n'ont pas une puissance de calcul suffisante pour trouver la solution optimale en temps utile et optimiser le trafic à grande échelle.

Par leur aptitude à résoudre efficacement ce qui s'apparente au problème classique du « voyageur du commerce », les ordinateurs quantiques pourraient fournir aux conducteurs des itinéraires équilibrés, ce qui permettrait d'obtenir une circulation plus fluide, des trajets plus efficaces et même une réduction de la pollution.



Mieux produire

La chimie est une discipline encore largement empirique. Bien que la « chimie théorique » s'attache à décrire les mécanismes d'auto-assemblage et autres phénomènes en jeu dans les interactions, les chimistes privilégient encore les règles heuristiques pour faire des prédictions sur le comportement d'une molécule, d'un ensemble de molécules, ou d'un matériau.

En revanche, un ordinateur quantique permettrait de calculer avec précision le comportement des molécules les plus grosses. Les ordinateurs quantiques pourraient détenir la clé de la puissance prédictive qui fait défaut aux méthodes « classiques » de chimie théorique. En d'autres termes, les ordinateurs quantiques pourraient faire passer la chimie de l'art des règles empiriques à une science fondée sur la prédiction par la simulation numérique, ouvrant ainsi une nouvelle ère de cette discipline.

Mieux se protéger des menaces sur la sécurité des communications

La cryptographie est utilisée pour assurer la confidentialité et l'intégrité des communications face à des menaces d'écoute ou de modification mal intentionnée du trafic. Les mécanismes asymétriques employés aujourd'hui, tels que le RSA, seront menacés par l'éventualité d'un ordinateur quantique suffisamment puissant.



Face à cette menace, il est nécessaire de mettre en œuvre de nouvelles modalités de sécurisation des communications. C'est le domaine de recherche de la cryptographie post-quantique. Remplacer les mécanismes actuels par de nouveaux mécanismes résistants à l'ordinateur quantique permet de conserver inchangée l'infrastructure actuelle de communications.

S'agissant des mécanismes de chiffrement symétriques, utilisés pour sécuriser les informations très sensibles, rien ne permet d'affirmer, à l'heure actuelle, qu'ils seraient sérieusement menacés par les ordinateurs quantiques.

Mieux se préparer aux conflits de demain

Dans une conflictualité moderne où la supériorité technologique reste un atout majeur sinon décisif, le secteur de la défense exploite systématiquement les opportunités offertes par toutes les innovations, pouvant elles être issues du monde civil.

La mise en œuvre par des puissances étrangères d'équipements et systèmes d'armes intégrant des technologies quantiques leur confèrera un avantage stratégique. Or, ce renforcement de la puissance doit conduire à adapter notre outil de défense, sous peine de déclassement. Même si la mise en œuvre de solutions quantiques dans notre système de défense n'était pas recherchée, le plein investissement de cette filière par les Etats étrangers nécessiterait une réponse. La cryptographie post-quantique illustre très bien ce mécanisme.

Par ailleurs, les capteurs, la cryptographie, le calcul et les communications doivent faire l'objet d'un suivi permanent afin d'anticiper, de détecter et de s'approprier toute évolution pouvant constituer un « game changer » pour les opérations militaires.

Certaines applications, en particulier dans le domaine des capteurs et ordinateurs quantiques, ouvrent des perspectives intéressantes pour la défense :

- La navigation inertielle quantique, notamment à atomes froids, permet de se positionner dans l'espace sans les services de « Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites » (GNSS). Ces technologies pourraient atteindre une maturité opérationnelle dans un délai de 5 à 10 ans ;
- En contexte de guerre électronique, une meilleure précision dans la mesure du temps/fréquence donne un avantage stratégique aux forces armées en matière d'interception électromagnétique et de communications robustes. ;

Les atouts de la France dans la course à l'ordinateur quantique universel

La France dispose d'atouts différenciants pour devenir l'une des premières nations à réaliser l'exploit de développer un ordinateur quantique universel : l'excellence de sa recherche fondamentale en physique et en informatique (CNRS, INRIA, CEA, ONERA), ainsi que la force de frappe de sa recherche technologique et industrielle (Atos, STMicro, AirLiquide, Orano, et l'écosystème de startups), notamment dans les domaines de la microélectronique, des supercalculateurs et des technologies habilitantes.

En l'occurrence, la France est le berceau de plusieurs percées majeures à l'origine de l'avance actuelle des grandes entreprises technologiques mondiales. Par ailleurs, les technologies de la microélectronique sont l'une des rares options aujourd'hui identifiées comme susceptibles de permettre le passage à l'échelle de l'ordinateur quantique. Bien que les verrous scientifiques, conceptuels et technologiques restent considérables, le tissu industriel et les équipes de recherche françaises sont parmi les mieux placées au monde pour les surmonter.

Les qubits supraconducteurs utilisés par Google et IBM et les qubits à atomes froids sont issus des travaux de Daniel Estève et Michel Devoret au CEA de Saclay, ainsi que Claude Cohen-Tannoudji et Jean Dalibard à l'ENS Paris / Collège de France.

La France dans la compétition internationale

L'ambition de la France est d'être parmi les premières nations à développer un ordinateur quantique universel à grande échelle lui assurant une souveraineté technologique et contribuant à l'autonomie stratégique de l'Europe. La France est l'un des rares pays capable de relever ce défi d'échelle. Néanmoins, elle ne sera probablement pas la seule et devra composer avec les pays qui ont des communautés larges (eg. Chine et Etats-Unis) ou disposent également d'un plan national fort (Allemagne, Pays-Bas, Royaume-Uni).

Avec cette stratégie, la France souhaite prendre le leadership dans l'émergence d'entreprises pouvant devenir des leaders mondiaux des technologies quantiques., tout en renforçant les champions engagés dans le domaine (Atos, Thales, Orange, STMicro, Air Liquide, Orano,...) pour créer une industrie compétitive dans les domaines d'applications clés des technologies quantiques, avec des retombées directes dans la santé, l'énergie, le climat, l'agro-alimentaire, la pharmacie, la dissuasion et le renseignement.

Stratégie quantique : 5 ans pour asseoir la France dans le premier cercle mondial

La stratégie quantique bénéficiera des investissements exceptionnels que le Gouvernement a décidé de mener dans des secteurs et technologies d'avenir, pendant et après la relance, en mobilisant notamment le 4^e Programme d'investissements d'avenir (PIA4). Annoncées par le Gouvernement début janvier, ces premières stratégies nationales répondent à des besoins d'innovation prioritaires ou des failles de marché: l'Etat mobilise ainsi 12,5 milliards d'euros sur 5 ans à travers le PIA pour financer ces investissements, dont une partie dans le cadre du plan #FranceRelance. Le numérique y occupera une place centrale : quantique, cybersécurité, intelligence artificielle, 5G...

Pour en savoir plus sur les stratégies d'accélération du Gouvernement :
<https://www.gouvernement.fr/strategies-d-acceleration-pour-l-innovation>

La stratégie doit permettre à la France d'être parmi les premiers pays à maîtriser les technologies quantiques clés : accélérateurs et simulateurs quantiques, logiciels métiers pour le calcul quantique, capteurs quantiques, communications quantiques, cryptographie post-quantique, technologies habilitantes, etc.. Dans le domaine du calcul, thème central de la stratégie, elle deviendra le premier Etat à disposer d'un prototype complet d'ordinateur quantique généraliste de première génération dès 2023. Elle pourra également s'affirmer comme la première nation à disposer d'une filière complète productrice de Si 28 industriel pour les besoins de la production de qubits sur Silicium.

Le délai de maturation de ces technologies, les couches logicielles à développer, ou la formation des talents, requièrent de fédérer les acteurs et les efforts vers cette ambition de bâtir une filière industrielle complète : il s'agit de s'affirmer durablement comme un leader du domaine, avec l'objectif de création de 16 000 emplois directs à l'horizon 2030 et de représenter à terme entre 1 et 2 % des exportations françaises.

Fortement systémique, la stratégie quantique vise à enrichir et affirmer notre capabilité sur le plan scientifique et technologique, mais aussi dans les chaînes de valeur industrielles, le développement du capital humain ou encore l'anticipation des besoins de compétences pour ces marchés, en doublant progressivement le vivier de spécialistes à l'horizon 2025, afin de garantir et pérenniser notre souveraineté sur ces technologies critiques.

Elle s'articule selon les sept piliers suivants, dont 6 piliers technologiques et un pilier transverse.

Les objectifs clés

- Maîtriser les technologies quantiques offrant un avantage stratégique décisif, dont les accélérateurs, simulateurs et ordinateurs quantiques, les logiciels métiers pour le calcul quantique, les capteurs, les systèmes de communication.
- Dans le domaine du calcul, le thème central de la stratégie :
 - devenir le premier Etat à disposer d'un prototype complet d'ordinateur quantique généraliste de première génération dès 2023 ;
 - être un leader mondial dans la course à l'ordinateur quantique universel passant à l'échelle, en anticipant dès aujourd'hui les risques inhérents liés au faible niveau de maturité et à la complexité des technologies en cours d'exploration.
- Maîtriser les filières industrielles critiques dans le domaine des technologies quantiques, incluant les technologies habilitantes
- S'affirmer comme l'un des leaders mondiaux en matière de cryogénie ou de lasers pour les technologies quantiques.
- Être la première nation à disposer d'une filière complète productrice de Si 28 industriel, notamment pour les besoins de la production de qubits.
- Développer les compétences et le capital humain, renforcer les infrastructures technologiques, créer un environnement favorable à l'intensification de l'entrepreneuriat, au transfert de technologie, et promouvoir l'attractivité vis-à-vis des acteurs internationaux et des meilleurs talents mondiaux.

Les chiffres clés

- Financement cumulé de l'Etat d'environ 1 Md€ sur quatre ans, pour **un engagement global public-privé de 1,8 Mds€.**
- Création de 16 000 emplois directs à l'horizon 2030, en faveur d'une activité qui représentera à terme entre 1 et 2 % des exportations françaises.
- Formation de 5000 nouveaux talents aux technologies quantiques, techniciens, ingénieurs, docteurs.
- Formation par la recherche de près de 1700 jeunes chercheurs, avec un doublement du nombre de thèse par an : 200 nouvelles thèses et 200 post-docs par an d'ici 2025.
- Soutien à l'entrepreneuriat à hauteur de 120M€, sous la forme d'abondement de fonds dédiés aux start-ups, que ce soit en série A, B ou C.
- Soutien à la recherche via un Programme et Equipements Prioritaires de Recherche (PEPR) doté de 150M€.
- Accompagnement du déploiement industriel et de l'innovation d'un montant total de 350M€.

Synthèse des financements

Répartition par axe technologique

Axes technologiques de la stratégie nationale						Total 2021 – 2025 [M€]
NISQ	LSQ	Capteurs quantique	Communications quantiques	Cryptographie post quantique	Technologies capacitantes	
352	432	258	325	156	292	1815

Répartition par modalité de soutien

Total 2021 – 2025 [M€]	1815
Recherche (Organismes CNRS, CEA, INRIA, ONERA, CNES; programmes UE, infrastructures)	725
Formation (PhD, Ingénieurs, masters, techniciens)	61
Maturation Technologique	171
Innovation de rupture (ordinateur quantique)	114
Soutien au déploiement industriel (lignes pilotes et cryogénie)	224
Politique d'Achat Public (calcul, défense)	72
Entrepreneuriat (fonds d'investissement, incubateurs)	439
Intelligence Economique (standardisation, PI)	9

Répartition par origine du financement

Total 2021 – 2025 [M€]	1815
PIA 4	594
Subvention aux organismes de recherche	274
Autres contributions nationales	164
Financements européens	238
Secteur Privé	545

1. Développer et diffuser l'usage des simulateurs et accélérateurs NISQ [352 M€]

Enjeux

Depuis quelques années, les simulateurs et calculateurs « NISQ » (Noisy Intermediate Scale Quantum) exploitables commercialement sont devenues une réalité en attendant l'ordinateur quantique « LSQ » (Large Scale Quantum) capable de passer à l'échelle. Ces machines constituent, dès aujourd'hui, des outils d'apprentissage du calcul quantique. Des écosystèmes très fortement intégrés se constituent, dès aujourd'hui, autour de machines qui, bien qu'elles ne confèrent pas d'avantage quantique avéré, permettent d'anticiper les ruptures tout en fédérant et fidélisant un écosystème de développeurs autour d'outils de développements Hardware-dépendants.

Domaine d'action

En s'appuyant sur GENCI (Grand Equipement National de Calcul Intensif), chargé de l'équipement des centres nationaux de calcul intensif, et le CEA, concepteur et exploitant du TGCC (Très Grand Centre de Calcul), principal centre de calcul public français, la France hébergera la première infrastructure au monde d'ordinateurs quantiques hybrides, intégrant d'un point de vue logiciel et matériel des accélérateurs quantiques à un système de supercalculateurs classiques. La mise en place de cette infrastructure de rang mondial, intégrant différents émulateurs et ordinateurs quantiques basés sur des principes technologiques divers, représentera un levier d'action fort permettant de :

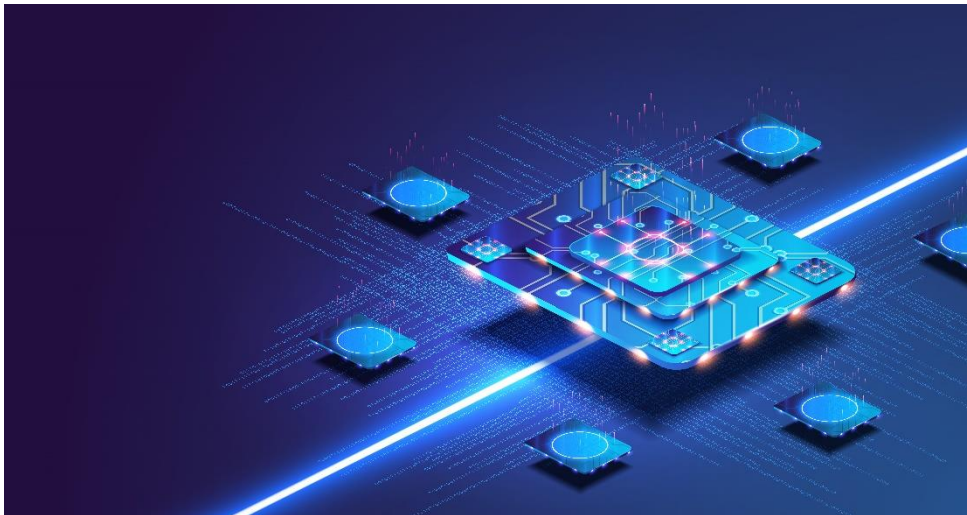
- Minimiser le risque de dépendance à une seule option technologique ;
- Développer l'écosystème logiciel, les applications et les usages ;
- Développer la légitimité et le rayonnement de la France à l'international.

Au moment opportun, l'industrialisation des accélérateurs quantiques sera notamment soutenue par le déploiement de lignes pilotes permettant d'affiner les procédés industriels en environnement représentatif de la production, tout en réduisant les risques et le temps de cycle de transfert à l'industrie.

2. Développer l'Ordinateur Quantique Passant à l'Echelle LSQ [432 M€]

Enjeux

Le développement d'ordinateurs quantiques capables de passer à l'échelle ou « LSQ » (Large Scale Quantum) vise à rendre possible des calculs et modélisations d'une complexité supérieure de plusieurs ordres de grandeur à ce qui peut être traité avec les supercalculateurs traditionnels, même accélérés avec de des qubits NISQ. A partir de quelques centaines/milliers de qubits tolérants aux défauts (qubits logiques), l'usage de ces machines permettra d'accélérer considérablement l'innovation et la mise sur le marché de produits issus des secteurs industriels qui reposent sur de longues phases de validation. La France est considérée comme l'un des rares pays capables de relever ce défi, grâce à l'excellence de son historique en recherche amont et technologique, et à son industrie micro-électronique ; c'est également le défi qui comporte le plus d'incertitudes sur le calendrier et de risques compte-tenu du faible niveau de maturité et de la complexité des technologies en cours d'exploration.



Domaine d'action

S'agissant des composants technologiques, les actions auront vocation à explorer, dérisquer et hybrider différentes solutions de conception et de fabrication de qubits robustes et de portes logiques performantes compatibles avec l'industrie microélectronique, puis sélectionner les candidats les plus prometteurs pour un passage à l'échelle, parmi les qubits de spin sur Silicium, les transmons sur Silicium, Silicium/Germanium, cat-qubits, qubits topologiques, qubits photoniques, flying qubits, etc.

Le développement de ces différentes voies d'architectures matérielles devra se tenir dans l'esprit d'un continuum entre le NISQ et le LSQ tout en mettant l'accent sur l'hybridation des plateformes technologiques compatibles avec une industrialisation, en termes de passage à l'échelle et de qualité de fabrication. Ces voies seront menées de front en s'enrichissant les unes les autres, le tout dans une approche globale pluridisciplinaire.

En matière d'architecture système, une action de soutien à l'Innovation visera à développer une microarchitecture de calcul et une électronique de pilotage, qui puissent contrôler et corriger les erreurs de diverses technologies de qubits passant à l'échelle.

Sur le plan algorithmique, l'action aura vocation à développer des algorithmes robustes au bruit et pouvant tirer pleinement profit d'un ordinateur quantique passant à l'échelle pour aborder les problèmes les plus complexes: repliement de protéines, séquestration du CO₂, production de catalyseurs bio-inspirés etc.

3. Développer les technologies et applications des Capteurs Quantiques [258 M€]

Enjeux

Les capteurs quantiques figurent parmi les technologies quantiques historiquement soutenues par l'Etat via son soutien aux recherches amont, dont les plus matures ouvrent vers différentes applications prometteuses : navigation, prospection géologique, observation de la terre, interception, détection, sismographie, magnétométrie, science des matériaux, etc. Néanmoins, la complexité de leur mise en œuvre et l'environnement extrême souvent nécessaire à leur fonctionnement limitent aujourd'hui les débouchés à des marchés très spécifiques, ce qui compromet la viabilité industrielle à long terme. Il est nécessaire d'accompagner l'incrémentation en maturité de ces technologies vers les applications et les marchés, tout en favorisant leur intégration dans les systèmes qui pourraient en bénéficier, afin de développer un marché civil, source de viabilité économique.

Domaine d'action

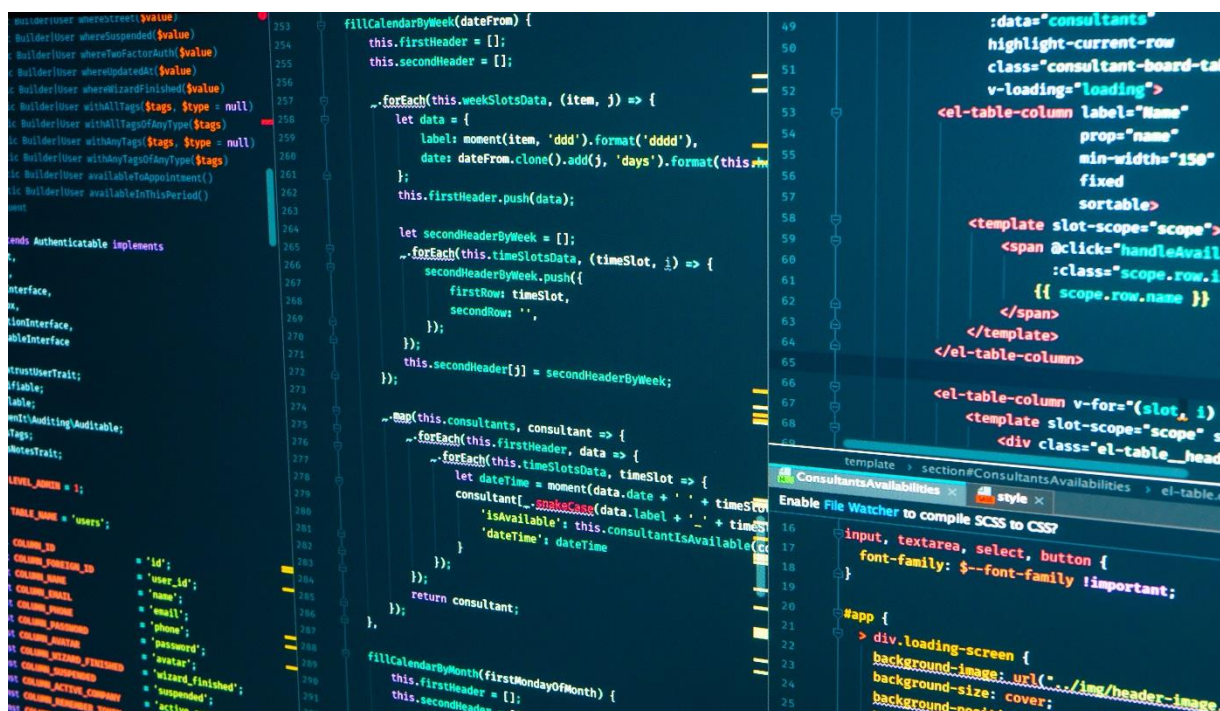
En matière de capteurs à atomes froids, les actions auront vocation à consolider la position de la France sur ces technologies et développer la prochaine génération de senseurs inertiels, de capteurs magnétiques et d'horloges atomiques. Pour les technologies les plus matures (atomes de Rydberg, supraconducteurs, impuretés dans le diamant, etc.), l'action aura pour objectif de soutenir l'intégration des briques élémentaires dans leur environnement système, notamment en améliorant leurs caractéristiques face aux contraintes d'embarcabilité, tout en répondant aux objectifs de souveraineté et de réappropriation des chaînes de valeurs en matière de capteurs.

Afin de maximiser la « surface marché » et renforcer la viabilité économique de ces technologies à plus long terme, une vague de « Challenges » visera, en 2022, à permettre l'identification de nouveaux marchés civils pour prendre le relais du marché de la défense : nano-IRM, contrôle industriel en milieu hostile, analyse de terrain, analyse moléculaire pour la chimie et la biologie, étude des matériaux sous haute pression pour le stockage de l'énergie, etc.

4. Développer l'offre de Cryptographie Post-Quantique [156 M€]

Enjeux

Dans « l'ère de l'ordinateur quantique » capable de déchiffrer, éventuellement rétroactivement, des données protégées par des algorithmes à clé publique actuels, les agences de sécurité recommandent de garantir la confidentialité et l'intégrité des systèmes d'informations et des communications de l'État dès aujourd'hui. Si la nécessité de développer et utiliser des algorithmes post-quantiques, c'est-à-dire résistants à une cryptanalyse quantique, fait maintenant consensus, il reste à définir ces algorithmes. Il existe plusieurs familles d'algorithmes de cryptographie post-quantique et divers problèmes mathématiques et variantes sont utilisés pour bâtir la sécurité de ces schémas. Cependant, pour la plupart d'entre eux, il n'y a pas encore de consensus international sur le niveau de confiance que l'on peut avoir dans leur sécurité.



```
fillCalendarByWeek(dateFrom) {
  this.firstHeader = [];
  this.secondHeader = [];

  ..forEach(this.weekSlotsData, (item, j) => {
    let data = {
      label: moment(item, 'ddd').format('dddd'),
      date: dateFrom.clone().add(j, 'days').format(this.#w
    );
    this.firstHeader.push(data);

    let secondHeaderByWeek = [];
    ..forEach(this.timeSlotsData, (timeSlot, i) => {
      secondHeaderByWeek.push({
        firstRow: timeSlot,
        secondRow: ''
      });
    });
    this.secondHeader[j] = secondHeaderByWeek;
  });

  ..map(this.consultants, consultant => {
    ..forEach(this.timeSlotsData, timeSlot => {
      let dateTime = moment(data.date + ' ' + timeSlot
      consultant[.toLocaleCase(data.label + ' ' + timeSlot
      'isAvailable': this.consultant.isAvailableCC
      'dateTime': dateTime
    });
  });
  return consultant;
});
}

fillCalendarByMonth(firstMondayOfMonth) {
  this.firstHeader = [];
  this.secondHeader = [];
```

```
:data="consultants"
highlight-current-row
class="consultant-board-table"
v-loading="loading">
<el-table-column label="Name"
prop="name"
min-width="150"
fixed
sortable>
<template slot-scope="scope">
<span @click="handleAvailability"
:class="scope.row.isAvailable"
{{ scope.row.name }}
</span>
</template>
</el-table-column>
<el-table-column v-for="(slot, i)"
<template slot-scope="scope">
<div class="el-table__head
```

Domaine d'action

Afin d'organiser la migration progressive vers la cryptographie post-quantique et de maîtriser les implémentations matérielles garantissant performances et sécurité, la stratégie quantique portera des travaux dans les domaines du développement algorithmique, de l'implémentation matérielle et de la validation expérimentale.

La transition vers les algorithmes post-quantiques ne se fera pas d'une manière brutale. Une période transitoire sera nécessaire, où les algorithmes post-quantiques cohabiteront avec les mécanismes actuels afin de se rassurer que les algorithmes post-quantiques n'introduisent pas de régressions par rapport à l'existant. Les algorithmes candidats à la standardisation étant plus consommateurs de ressources que leurs analogues classiques, une action aura vocation à explorer les possibilités d'implémenter ces nouveaux algorithmes dans des dispositifs matériels spécialisés à ressources limitées. Enfin, certains capteurs quantiques seront explorés à l'aune de ce domaine applicatif, car ils pourraient offrir à relativement court terme de nouvelles capacités de cryptanalyse et de caractérisation d'attaques physiques sur les équipements de cybersécurité.

5. Développer les systèmes de communications quantiques [325 M€]

Enjeux

En permettant la distribution d'états intriqués, les communications quantiques peuvent avoir plusieurs applications prometteuses inaccessibles avec les technologies actuelles : interférométrie à longue distance, référence de temps pour la synchronisation d'horloges atomiques, mise en réseau d'ordinateurs quantiques, distribution quantique de clés, etc. La mise en réseau de capteurs quantiques pour l'interférométrie à très longue distance et la distribution de temps ultra précise intéressera, par exemple, à la fois les scientifiques, les financiers, les fournisseurs d'énergie, etc. L'accès distant aux ordinateurs quantiques et le partage de calcul entre plusieurs ordinateurs quantiques permet d'associer plusieurs processeurs afin d'accroître leurs capacités de façon exponentielle, ainsi que de permettre de localiser ces machines dans des centres de calculs distants des utilisateurs.

L'Europe et la France en particulier ont été précurseurs sur ces technologies. En soutenant la recherche et l'innovation dans ce domaine, la France conservera son leadership scientifique, notamment pour accroître son autonomie vis-à-vis de dispositifs quantiques non maîtrisés en Europe.

Domaine d'action

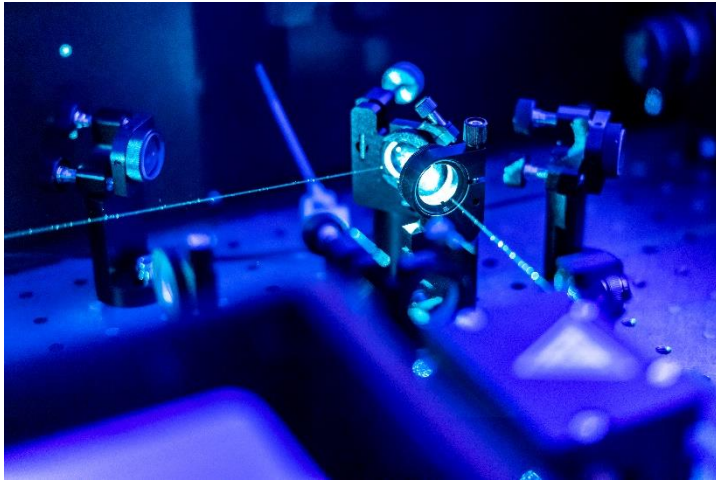
L'utilisation pratique des communications quantiques reposera sur la capacité à développer des composants photoniques quantiques pouvant s'intégrer dans les infrastructures de communications existantes sans nécessiter de déploiements spécifiques, ce qui constituera un axe majeur pour orienter les activités dans ce domaine. En outre, elles aboutiront à l'expérimentation et à l'évaluation du déploiement de composants photoniques quantiques dans des prototypes de réseaux de communication fibrée existants, mettant l'accent sur les aspects qui relèvent du triptyque débit, distance des liens établis, et critères de sécurité. En s'appuyant sur deux réseaux de communications fibrés expérimentaux, l'un dans la région de Nice, l'autre en Ile de France, les nouveaux composants et protocoles de communications seront testés et optimisés en conditions réelles. Par ailleurs, la France continuera à s'inscrire dans les travaux européens portés dans EuroQCI.

Sur le plan algorithmique, l'action aura vocation à développer de nouveaux protocoles de communications pour le calcul quantique distribué, le calcul quantique aveugle ou « Blind Quantum Computing », les protocoles d'interférométrie longue distance pour l'observation de la terre et de l'espace, la distribution d'horloge atomiques, ainsi qu'à imaginer les futures applications des communications quantiques.

En revanche, en raison de leur relative jeunesse, les communications quantiques n'ont pas été intensivement évaluées sur le plan de la cybersécurité, contrairement aux communications classiques. Sur ce plan, si théoriquement les communications quantiques sont invulnérables aux attaques sur la base des lois de la physique, les réalisations pratiques introduisent des vulnérabilités potentiellement exploitables par un attaquant. Afin de renforcer la résilience des dispositifs de communications quantiques aux attaques physiques, une action sera dédiée à l'identification et la correction des vulnérabilités des systèmes de communications quantiques.

6. Développer une offre de technologies habilitantes compétitive [292 M€]

Enjeux



La cryogénie, les lasers et l'électronique bas bruit sont des technologies habilitantes stratégiques pour les technologies quantiques ainsi que pour d'autres domaines (fusion nucléaire, astronomie, etc.), ce qui requiert de soutenir et développer notre autonomie sur le court terme, en faisant émerger une offre française compétitive et sécuriser les approvisionnements nationaux. Promouvoir la maîtrise par les acteurs industriels français de ces technologies à très court terme ouvre des débouchés intéressants à l'export, en

plus des technologies quantiques, dans les grands instruments scientifiques, les dispositifs médicaux, et l'électronique spatiale, dans un contexte international marqué par une polarisation autour d'un nombre limité d'acteurs. A long terme, la maîtrise de ces technologies pourrait permettre aux acteurs industriels français de devenir des fournisseurs de premier plan dans plusieurs secteurs.

Domaine d'action

Le besoin d'augmenter progressivement le nombre de qubits par processeur quantique exacerbe la contrainte d'opérer dans un environnement cryogénique extrême, qui ne réside pas dans l'atteinte de températures sub-Kelvin mais dans la puissance nécessaire pour refroidir de grands volumes comprenant les qubits, le câblage et l'électronique placée dans les étages intermédiaires. Les actions seront focalisées sur la recherche d'un point d'équilibre optimal entre la tolérance en température des qubits et la performance des technologies cryogéniques industrielles, qui est un prérequis pour envisager le passage des ordinateurs quantiques à l'échelle.

Par ailleurs, le développement de nouveaux lasers pour le refroidissement et la manipulation d'atomes bénéficiera d'un soutien qui aura vocation à améliorer fiabilité, rendements, puissance, agilité spectrale et stabilité des lasers existants, ainsi qu'à développer de nouveaux lasers capables de manipuler une nouvelle classe d'atomes aux propriétés quantiques prometteuses pour le calcul et les capteurs.

Enfin, pour favoriser l'embarcabilité et la tenue en environnement des composants au niveau système, les actions permettront d'appréhender les problématiques d'intérêt telle que la miniaturisation, le durcissement, afin de rendre les dispositifs compatibles avec les conditions d'emploi. En complément, des travaux seront également attendus sur les processus particuliers de maintien en condition opérationnelle que ces technologies spécifiques pourraient nécessiter.

7. Structurer transversalement l'écosystème

Enjeux

Pour soutenir et convertir en avantage concurrentiel pérenne les travaux scientifiques et techniques, il est essentiel de développer les compétences et le capital humain via la formation initiale et continue, le renforcement des infrastructures technologiques, de créer un environnement favorable à l'intensification de l'entrepreneuriat, au transfert de technologie, promouvant l'attractivité vis-à-vis des acteurs internationaux et des meilleurs talents mondiaux.

Domaines d'action

Développer les compétences et le capital humain

La stratégie devra permettre de créer 16 000 emplois directs et indirects à l'horizon 2030. Cette montée en puissance devra s'appuyer sur différents niveaux de formation, combinant formation initiale et formation continue, formation technique, d'ingénierie et formation par la recherche. Les équipes de développement industriel en hardware et software quantique pourront s'appuyer sur des experts dont la formation initiale sera centrée sur les technologies quantiques. Ces experts pourront encadrer des collaborateurs formés par un ambitieux programme de formation continue. La formation quantique initiale sera renforcée dans les écoles d'ingénieurs et dans les masters à travers des programmes interdisciplinaires alliant physique quantique, algorithmique quantique et ingénierie. Enfin, des modules de formation aux technologies quantiques seront introduits au niveau DUT, afin de former un nombre suffisant de techniciens capables de participer au développement industriel des technologies quantiques et de leurs technologies habilitantes.

Renforcer les infrastructures technologiques

Plateformes de fabrication : la qualité des moyens d'élaboration des matériaux sont essentiels pour obtenir des performances au meilleur niveau. En l'absence, les filières stratégiques seraient dépendantes de fourniture de services par des infrastructures étrangères. Les actions viseront donc à donner les moyens de se mettre au meilleur niveau international, notamment pour l'élaboration de nanomatériaux fonctionnels.

Plateforme de métrologie quantique : la métrologie joue un rôle essentiel dans l'industrialisation des technologies émergentes, au travers de la mesure fiable des performances. Elle permet la validation des technologies dont les performances sont supérieures aux technologies existantes, et ainsi leur adoption par l'industrie et le marché. Pour préserver sa compétitivité dans le domaine, assurer sa capacité à soutenir l'émergence de ses propres filières industrielles quantiques, et fournir à son industrie une traçabilité vis-à-vis du Système International d'Unités, la France se dotera d'une plateforme de métrologie quantique qui rassemblera les compétences et les installations de mesure du Réseau National de Métrologie.

Renforcer l'entrepreneuriat et le transfert de technologie

Sur le plan entrepreneurial, les technologies quantiques font face, comme d'autres domaines « à risque », à la difficulté d'accéder à du capital-risque de qualité auprès des fonds généralistes. Dans le cadre de la stratégie, deux fonds impliquant des sociétés de gestion à forte compétence quantique pourront venir compléter l'action du premier fonds dédié au domaine en France (Quantonation) et pourront être soutenus par l'Etat en fonds de fonds. Enfin, le fonds French Tech Souveraineté complètera le dispositif pour apporter le soutien nécessaire afin de protéger le capital des sociétés stratégiques.

Sur le plan du transfert de technologie, la stratégie accompagnera des initiatives de type « hub » qui auront vocation à densifier le maillage des relations entre acteurs industriels, startups et académiques, pour accompagner les projets entrepreneuriaux et établir des passerelles avec l'international.

Opportunités de coopération internationales

Par effet de levier, l'action de l'État permettra de mobiliser plus de 200 M€ de l'Europe, dont une partie via des co-financements paritaires de la Commission, abondés en contrepartie des financements nationaux. Un consortium est déjà sur les rails, cofinancé par l'entreprise commune EuroHPC, regroupant la France, l'Allemagne, l'Italie, l'Espagne, l'Irlande et l'Autriche, pour développer le premier prototype d'ordinateur hybride intégrant un accélérateur quantique d'au moins 100 qubits à l'horizon 2023, sur le site du Très Grand Centre de Calcul à Bruyères-Le-Chatel. Cette plateforme Hardware et logicielle constituera la première étape vers un 'hub quantique européen', qui portera les travaux des communautés d'utilisateurs scientifiques et industriels, en vue de développer les cas d'usage exploitant pleinement ces nouvelles capacités de calcul.

Cet élan sera relayé par un Grand Défi NISQ, un programme public-privé qui pourrait donner lieu à un élargissement de la dynamique collaborative avec l'Allemagne. L'objet de ce Grand Défi est de créer les conditions pour utiliser cette plateforme hybride comme une infrastructure commune 'bac à sable' pour les technologies quantiques, tant matérielles que logicielles, notamment pour mener un benchmark des performances en fonction de la nature de l'accélérateur quantique intégré (atomes froids, jonctions supraconductrices,...), avec la finalité d'explorer l'étendue des capacités qu'offrent les machines hybrides en termes d'applications. In fine, elle aura vocation à :

- tirer le plus grand bénéfice des accélérateurs quantiques existants en les intégrant dans le contexte plus global du calcul haute performance et en développant des solutions algorithmiques hybrides quantique-classique ;
- diffuser l'usage du calcul quantique dans les secteurs prioritaires en développant des solutions logicielles et des environnements de développement hardware-agnostiques sur la base de langages de programmations et bibliothèques dédiés aux secteurs différents applicatifs.

Il convient également de noter que la thématique du calcul quantique est en cours d'intensification dans le cadre des efforts que la Commission Européenne engage dans le domaine du calcul intensif, notamment via l'Entreprise Commune EuroHPC. La thématique des communications quantiques sera quant à elle portée au niveau européen par le groupement EuroQCI, qui est actuellement en cours de constitution sous l'égide de la Commission.

Par ailleurs, la France sera force de proposition pour intensifier les dynamiques historiques conjointes en matière de recherche avec les grandes nations des technologies quantiques en Europe (Pays-Bas, Angleterre,...), en explorant toutes les opportunités de collaborations avec l'ambition de repositionner le centre de gravité mondial des technologies quantiques vers l'Europe.

Mise en œuvre

L'exécution nécessitera un financement de l'Etat cumulé d'environ 1 Md€ sur quatre ans. Cette action de l'État sera complétée par les financements européens, et par le co-financement des industriels, dont l'implication sera déterminante pour le succès de cette stratégie, afin de renforcer leur activité en R&D, conquérir de nouveaux marchés ou relocaliser des activités en France.

En soutien à l'entrepreneuriat, les investisseurs institutionnels et les fonds de confiance se mobiliseront pour soutenir l'écosystème d'innovation naissant dans le domaine et pour faire émerger de nouveaux champions industriels nationaux.

L'ensemble permet d'aboutir à un engagement global public-privé de 1,8 Mds€.

Cet engagement est à la hauteur des enjeux et de l'ambition de s'affirmer durablement comme un leader du domaine, avec l'objectif de création de 16 000 emplois directs à l'horizon 2030, en faveur d'une activité qui représentera à terme entre 1 et 2 % des exportations françaises.

Le développement des compétences passe par la formation initiale et continue, soit près de 5000 nouveaux talents formés aux technologies quantiques d'ici 2025, chercheurs, ingénieurs, techniciens, avec de nouveaux cursus universitaires ouverts dès la rentrée prochaine.

La création d'un environnement favorable à l'intensification de l'entrepreneuriat et au transfert de technologie, contribuera à développer notre patrimoine intellectuel et industriel, tout en cultivant le rayonnement vis-à-vis des acteurs internationaux du domaine, afin d'attirer l'investissement ainsi que les meilleurs talents mondiaux. En particulier, le soutien à l'émergence et à la croissance des start-ups se fera notamment au travers de la mobilisation de fonds propres, avec l'ambition d'atteindre un montant total public-privé de 310 M€.

Un effort important sera consacré à la recherche, notamment via un Programme et Equipements Prioritaires de Recherche (PEPR) doté d'un montant total de 150 M€, autour de quatre thèmes structurants : qubits robustes « solid state », atomes froids, algorithmes quantiques, frontières de la calculabilité et de la sécurité.

La maturation, l'innovation et le transfert technologique, feront l'objet d'un soutien sans précédent selon une variété de modalités telles que les Grands défis d'Innovation, les programmes de maturation technologique ou de soutien au déploiement industriel, dont le cumul atteint 350M€, avec un effet d'entraînement multiplicateur attendu de l'investissement industriel.

Enfin, l'exécution de la stratégie sera portée par un coordinateur interministériel, qui en pilotera l'implémentation sous la responsabilité du Conseil interministériel de l'innovation, avec le souci constant de maximiser l'impact industriel, l'emploi et la création de valeur économique pérenne.

Les faits marquants dans l'écosystème quantique national, ces 6 derniers mois

- Juin 2020 : « Qubit Pharmaceuticals », une start-up française spin-off de la recherche (CNAM, CNRS, Sorbonne, University of Texas at Austin, Washington University), vient de clore un tour de pré-amorçage grâce à l'aide de Quantonation. Cette start-up porte une révolution dans le domaine des logiciels de simulation avancée pour le développement de médicaments, grâce à la prise en compte des effets quantiques dans la dynamique moléculaire. Aujourd'hui opérées et peaufinées sur des supercalculateurs, les solutions logicielles seront prêtes pour engendrer des ruptures radicales dès lors qu'elles tourneront sur les premiers ordinateurs quantiques.
- Juillet 2020 : La start-up Quandela, qui développe des sources mono-photon aux propriétés très attendues pour les ordinateurs quantiques optiques et les réseaux de communication, a clôturé sa levée de fonds d'amorçage à 1,5 M€, emmenée par Quantonation et suivie par French Tech Seed de Bpifrance.
- Été 2020 : Atos a amélioré son simulateur quantique commercial QLM avec une nouvelle architecture hardware, qui devient QLM E(nhanced), le simulateur quantique le plus performant au monde offrant jusqu'à 12 fois plus de puissance de calcul que son prédécesseur. Atos QLM E offre de nouvelles opportunités en matière de simulation pour les futurs ordinateurs quantiques NISQ, dont la commercialisation est prévue dans les prochaines années.
- Septembre 2020 : la startup Quandela lance Prometheus, sa nouvelle génération de générateur de photons indistingables exploitables dans le calcul et la cryptographie quantiques.
- Septembre 2020 : Air Liquide a acquis la PME française Cryoconcept, spécialisée dans la réfrigération à dilution, une technologie permettant d'atteindre de très basses températures. Ce mouvement marque l'engagement d'Air Liquide dans le domaine de la cryogénie extrême, proche du zéro absolu, qui constitue une technologie habilitante cruciale pour les technologies quantiques.
- Octobre 2020 : Thales développe des capteurs à puces atomiques, avec l'objectif de réaliser à terme une centrale inertielle complète (combinant des accéléromètres, une horloge et un gyromètre tri-axes) basée sur des atomes froids miniature et substantiellement plus performante que les technologies actuelles. Une des fonctionnalités clés a été démontrée, permettant la manipulation des nuages atomiques sur puce, à l'aide de courants radiofréquences.
- Novembre 2020 : Atos annonce un partenariat avec Pasqal pour développer un accélérateur quantique reposant sur la technologie des atomes neutres, destiné à équiper des systèmes de calcul haute performance. Cette technologie permettrait de renforcer les capacités de calcul des ordinateurs actuels et ainsi développer des systèmes hybrides quantique-HPC exploitables à court terme.
- Décembre 2020 : le consortium Européen HPCQS, construit autour de l'axe franco-allemand GENCI/Centre de Recherche de Jülich, a été sélectionné par EuroHPC pour réaliser en 2023 le premier ordinateur européen intégrant un accélérateur quantique d'au moins 100 qubits. Ce consortium regroupe les grands organismes français de recherche (CNRS, CEA, INRIA), ainsi qu'Atos et la start-up Pasqal, qui livreront respectivement le supercalculateur et l'accélérateur quantique qui lui sera intégré. Les travaux démarrent dès le premier semestre 2021.

- Décembre 2020 : Thales développe une antenne quantique supraconductrice basée sur l'utilisation de réseaux de SQUIDs (Superconductor Quantum Interference Devices) capable de détecter un large spectre de fréquences. La détection de signaux radiofréquences a été démontrée jusqu'à 100 MHz avec une antenne quantique de 1cm, alors que la taille d'une antenne classique est de 1,5m.
- Décembre 2020, Atos a dévoilé le « Q Score », la première métrique universelle qui rend possible l'objectivation de la performance des ordinateurs quantiques et la 'suprématie quantique'.
- Décembre 2020 : le CEA Leti échantillonne ses qubits à spins d'électron qui améliore le contrôle des qubits.
- Décembre 2020 : Pasqal et l'équipe d'Antoine Browaeys d'IQOQI publient plusieurs papiers avec un record de simulation quantique avec 196 qubits à base d'atomes froids.

Prochains appels à projets / 1^{er} semestre 2021

- **Programme et Equipements Prioritaire de Recherche (PEPR), pour soutenir l'effort de recherche de la communauté scientifique, doté de 150 M€ autour de quatre thèmes:** qubits robustes « solid state », atomes froids, algorithmes quantiques, frontières de la calculabilité et de la sécurité (premier trimestre 2021) ;
- **Grand Défi sur le développement d'accélérateurs quantiques de première génération (NISQ),** ou ordinateur quantique 'imparfait', pour préparer en 2022, une action d'innovation sur le développement de l'ordinateur quantique capable de passer à l'échelle (LSQ) , ou ordinateur quantique 'parfait' (au plus tard fin du premier semestre 2021) ;
- **Programme de Développement Industriel relatif aux technologies capacitantes,** à l'image du Si28, de la cryogénie et des lasers ; ce programme permet d'accompagner les activités de recherche et développement collaboratives public-privé à maturité technologique intermédiaire (TRL3-6), proche du marché mais au risque technologique non supportable par les acteurs privés seuls (à partir du premier trimestre 2021) ;
- **Programme de Maturation Technologique,** pour encourager les activités de recherche et développement collaboratives public-privé à maturité intermédiaire avec des perspectives de marché à moyen terme, concernant l'intégration des capteurs, les protocoles et corrections d'erreur, ainsi que l'algorithmique post-quantique (au plus tard fin du premier semestre 2021).

→ Pour en savoir plus et suivre la publication des appels à projets et programmes :

<https://www.entreprises.gouv.fr/fr/numerique/politique-numerique/strategie-nationale-pour-technologies-quantiques>

CONTACTS

- Cabinet de la ministre des Armées
Service de presse et de communication
cabinet-cc9.secretaire.fct@intradef.gouv.fr
01 42 19 67 16

- DICOd
Centre de presse
presse@dicod.fr
09 88 67 33 33

- Cabinet de Bruno Le Maire
presse.mineco@cabinets.finances.gouv.fr
01 53 18 41 13

- Secrétariat presse et communication
Ministère de l'Enseignement supérieur, de la
Recherche et de l'Innovation
secretariat.communication@recherche.gouv.fr
01 55 55 84 24

- Cabinet de Cédric O
presse@numerique.gouv.fr
01 53 18 43 10

- Secrétariat général pour l'investissement
presse.sgpi@pm.gouv.fr
01 42 75 64 58