

Chapitre 3 : Nos recommandations

La souveraineté numérique n'a de sens qu'au niveau européen, de part notamment la dépendance et la confiance entre les différents États qui composent l'Union européenne. Nos recommandations se situent volontairement dans le cadre français, partant du principe qu'il faut une France forte pour faire gagner l'Europe. Elles se basent sur les risques que nous avons mis en évidence tant pour le domaine du quantique que pour l'intelligence artificielle et sont le fruit des différents échanges avec les personnes rencontrées au long de la mission.

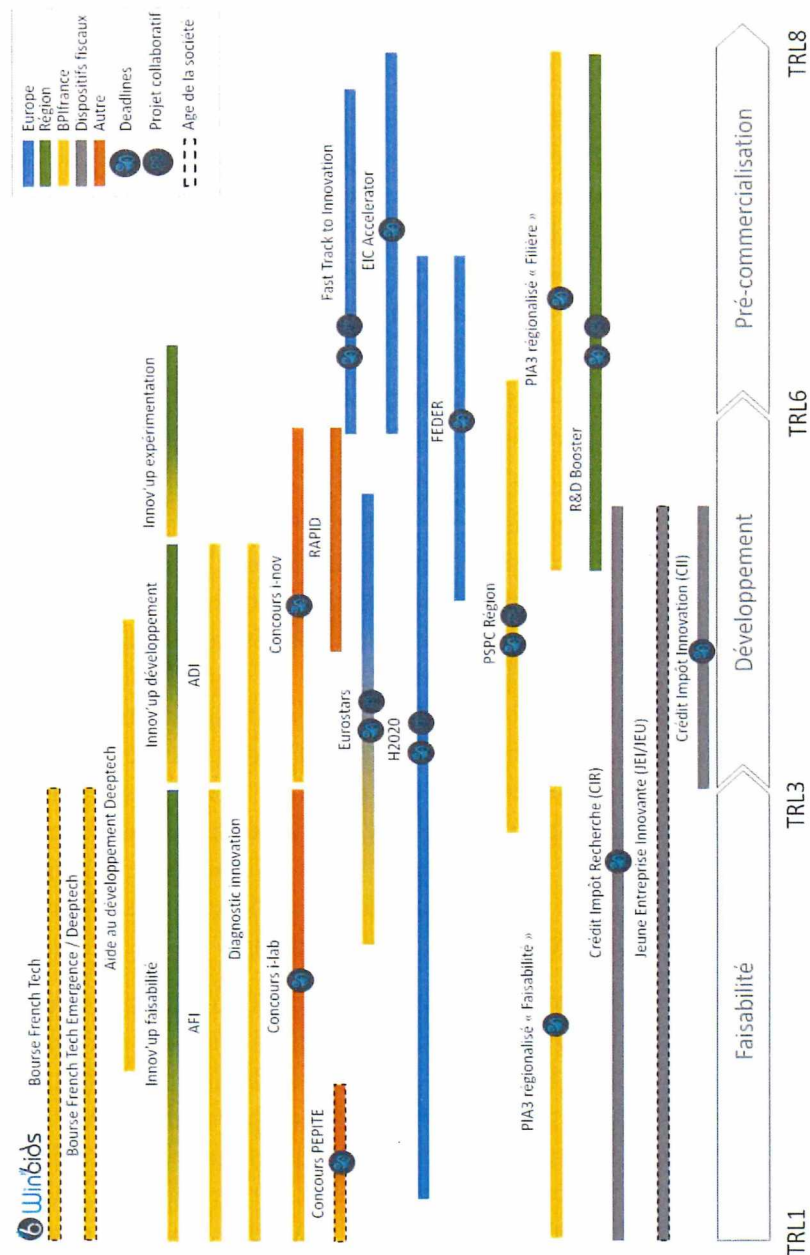
➔ Recommandation 1 - Concentrer les financements sur les phases d'industrialisation en sélectionnant quelques champions

Dans le financement de l'innovation issue des *deeptech* (technologies numériques de rupture issue des laboratoires de recherche scientifique), la maturation d'une technologie, de la recherche fondamentale jusqu'à l'industrialisation, requiert des financements de plus en plus importants à chaque phase de développement. Comme l'indiquent les sénateurs dans leur rapport du 8 Juin 2022, intitulé « *Transformer l'essai de l'innovation : un impératif pour réindustrialiser la France* »⁵⁷, le financement des innovations de rupture à vocation industrielle est particulièrement capitalistique. D'autre part, la durée pendant laquelle ces projets doivent être soutenus, de leurs phases d'amorçage jusqu'à la génération de premiers retours sur investissements, est particulièrement longue. Le même rapport du Sénat insiste sur la nécessité de créer de nouveaux outils de financement pour pallier « un manque de fonds de croissance capables de financer des innovations industrielles à hauteur de plusieurs dizaines de millions d'euros et surtout pour effectuer des levées de fonds supérieures à 100 millions d'euros ».

L'enjeu, dans le cas du développement de l'ordinateur quantique, est de réussir à financer les TRL 7 à 9, afin de permettre l'industrialisation des technologies qui auront réussi à convertir l'essai des premiers prototypes. La France possède à ce stade un ensemble assez dense d'outils de financements pour les phases les plus en amont du développement⁵⁸ (voir schéma ci-dessous), mais pour pouvoir financer les premiers ordinateurs quantiques à l'échelle industrielle, les montants nécessaires ne vont pas pouvoir être couverts par ces outils. Ceux-ci sont, en effet, plutôt destinés à des investissements nombreux mais sur des montants plutôt faibles, qui ne pourront jamais être suffisants pour les besoins de ce passage à l'échelle.

⁵⁷ Rapport d'information n° 655 (2021-2022) de Mme Vanina PAOLI-GAGIN, fait au nom de la Mission d'Information Excellence de la recherche/innovation, déposé le 8 juin 2022 du Sénat « *Transformer l'essai de l'innovation : un impératif pour réindustrialiser la France* » <http://www.senat.fr/rap/r21-655/r21-65512.html>

⁵⁸ <https://www.winbids.fr/aides-a-linnovation/>



Les différents outils de financement de l'innovation accessible en France

Par maturité de l'innovation⁵⁹

⁵⁹ <https://www.winbids.fr/aides-a-linnovation/>

En effet, les outils existants présents sur des TRL élevés ne couvrent que des enveloppes très limitées. A titre d'illustration, on peut citer :

- *Fast track to innovation* – outil européen – propose des financements de 1 à 3M€,
- *EIC Accelerator* – outil européen – propose des financements de 0,5 à 15M€,
- PIA 3 régionalisé « filière » - outil géré par Bpifrance – propose un financement maximum de 4M€,
- *R&D Booster* – outil régional – propose un financement allant jusqu'à 1M€.

D'autres outils publics existent mais ils sont également sur des montants de financement faibles.

Or, les montants qui vont devoir être financés dans ces prochaines phases, essentiels pour assurer la localisation en France d'une industrie quantique, seront de l'ordre la centaine de millions, voir du milliard d'euros, par technologie soutenue. On est donc bien loin du compte avec l'offre de financement actuelle.

Il devient donc impératif de proposer des financements qui pourront répondre aux besoins de cette prochaine phase.

Selon les acteurs du secteur que nous avons rencontrés, les montants qui seront nécessaires pour financer l'industrialisation de prototypes à l'échelle, seront de l'ordre du milliard d'euros, par technologie.

Même avec un fort soutien public, on ne peut alors imaginer soutenir l'ensemble des projets en cours, comme c'est souvent le cas dans les phases d'amorçage, en capital risque. Il faudra donc rapidement identifier les champions dont les prototypes seront les plus prometteurs, afin de focaliser les financements sur ceux-ci, et accroître ainsi l'efficacité des investissements.

Ce soutien financier pourra prendre plusieurs formes :

- Financement via des fonds de fonds des gestionnaires privés les plus performants afin de créer des « méga-fonds » avec la surface d'investissement nécessaire. On pourra par exemple suivre « Quantonation » qui a participé aux tours de table de très nombreux projets quantique.
- Maintien du financement public direct pour permettre de prendre les risques nécessaires à faire émerger de futurs champions. Les avances remboursables, ou prises de participations, seront à privilégier car elles garantissent une meilleure responsabilisation des entreprises que les simples subventions.
- Soutien des industriels à prendre part à des projets « quantique » majeurs via le financement public des grands groupes pertinents. On pourra par exemple considérer les acteurs de l'Energie, de la Chimie, du Médicament, du Transport, secteurs pour lesquels le quantique pourra permettre des débouchés économiques très rapides.

Il sera aussi important de soutenir le développement d'un écosystème de financement nouveau, puisqu'il devra répondre à plusieurs problématiques non adressées à ce jour, mise à part dans le secteur des biotechnologies dans le médicament :

- Risques d'échec élevés – puisque seuls une, ou tout au plus quelques technologies sortiront leur épingle du jeu, et que beaucoup d'entreprises de fait échoueront sans retombées économiques majeures.
- Besoins en financement très élevés – comme décrit précédemment l'échelle sera de l'ordre du milliard d'euros pour l'industrialisation des futurs champions.
- Délais importants avant un retour sur investissement. En effet, avant que des retours économiques concrets soient réalisés par les investisseurs plusieurs années de financement seront nécessaires, ce qui est assez éloigné des principes habituels des fonds de capital-risque.

Ces caractéristiques rapprochent ce mode de financement de ce qui est aujourd'hui pratiqué par le secteur des biotechnologies. Une réelle expertise s'est constituée sur ce type de financement dont devrait s'inspirer le législateur dans l'accompagnement du développement de l'écosystème de financement du quantique. C'est Bpifrance qui a notamment accompagné cette structuration et qui pourrait jouer un rôle de catalyseur dans la constitution de ce réseau, comme ce fut le cas avec le fonds Accélération Biotechnologies Santé qui, grâce aux financements du PIA, aura pu amorcer son développement. Pour soutenir ce développement Bpifrance pourra être appuyé par un organisme de type Secrétariat Général pour l'Investissement⁶⁰, qui, par sa capacité à proposer une vision transverse sur les soutiens publics au développement de l'innovation, pourrait imaginer des utilisations transverses de ces innovations.

➔ Recommandation 2 - Ne pas saupoudrer et focaliser l'approche industrielle sur les technologies quantiques les plus proches de la mise en production

Afin de maximiser l'impact économique et social, et diriger au mieux les investissements et le soutien public, nous recommandons de focaliser les efforts de financement sur les technologies qui ont le plus de potentiel pour être utilisées par les entreprises dans un avenir proche. Il s'agira à ce stade d'identifier les applications qui tireront profit des nouvelles capacités de calcul permises par l'ordinateur quantique. Cela peut inclure :

- La simulation de matériaux : les ordinateurs quantiques peuvent aider à simuler des matériaux qui n'ont pas encore été découverts, comme des matériaux supraconducteurs à température ambiante, qui pourraient améliorer la transmission de l'électricité sans perte électrique.
- La cryptographie quantique : les ordinateurs quantiques peuvent aider à développer des méthodes de cryptographie plus sûres pour protéger les données sensibles des entreprises et des individus. Le secteur des Telco, et ses géants européens (Nokia et Ericsson au premier chef), gagneraient alors une position importante sur le marché mondial – limitant par ailleurs les risques de désintermédiation par les géants du *software* nord-américains.
- L'optimisation combinatoire : les ordinateurs quantiques peuvent aider à résoudre des problèmes de complexité combinatoire, comme l'optimisation de la logistique, ce qui pourrait améliorer l'efficacité des entreprises dans les secteurs de la distribution et de la

⁶⁰ SGPI : Le Secrétariat général pour l'investissement (SGPI) est chargé, sous l'autorité du Premier ministre, d'assurer la cohérence et le suivi de la politique d'investissement de l'État à travers le déploiement du plan France 2030.

production, tant au travers d'économies de coûts, de réduction des délais de livraison et d'une utilisation plus efficace des ressources.

- Les algorithmes de traitement de données quantiques : les ordinateurs quantiques peuvent aider à traiter des données plus rapidement et de façon plus efficace, ce qui pourrait améliorer l'analyse de données par exemple pour les entreprises du secteur bancaire et financier (dont le patrimoine Data est notoirement mieux maîtrisé et structuré).

➔ Recommandation 3 - Définir dès maintenant une stratégie RH du quantique

Dans un rapport datant du mois de septembre 2022, intitulé « *State of Quantum Computing : Building a Quantum Economy*⁶¹ », le Forum économique mondial, indique « qu'un effort doit être fait pour s'assurer qu'il y aura assez de personnes avec les compétences adaptées pour occuper l'explosion des emplois dans ce secteur dans les vingt prochaines années »⁶². Aussi, la stratégie quantique française doit s'appliquer sans tarder à l'école et dès le plus jeune âge. Le rapport du Forum économique mondial ajoute en effet que « *la seule manière de former la main d'œuvre du futur est d'introduire les notions du quantique en primaire et dans le secondaire et de créer davantage d'opportunités de programmes de formation à l'ingénierie quantique* ».

Plus généralement dans le domaine des STIM (sciences technologie, ingénierie et mathématiques) ou STEM (*science, technology, engineering and mathematics*), le constat est le même dans de nombreux pays : « *les éducateurs et les entreprises doivent faire mieux pour enseigner aux jeunes les avantages d'une carrière dans la technologie, et présenter les STEM aux enfants à un âge beaucoup plus précoce* »⁶³. L'Allemagne a par exemple lancé en 2008 une initiative (*MINT Zukunft schaffen!*) pour répondre à la pénurie de techniciens et d'ingénieurs. Cette initiative vise à « *contribuer à une attitude positive des jeunes, des parents, des enseignants et d'un large public vis-à-vis des sciences et des technologies* »⁶⁴. En France, dans un rapport d'octobre 2021, l'Inspection Générale de l'Éducation, du Sport et de la Recherche recommande notamment d'« *expérimenter au collège et au lycée général et technologique un parcours de formation en sciences (chimie, physique, biologie, géologie, sciences industrielles) et mathématiques constitué d'une approche interdisciplinaire renforcée en collège, d'un enseignement optionnel proposé en classe de seconde générale et technologique, et d'un nouvel enseignement de spécialité en classe de première et terminale générale dans le périmètre des STIM* »⁶⁵. Dans une lettre adressée au Premier Ministre Britannique, dans le cadre de l'initiative #EngineeringKidsFuture et face au manque de 173000 cadres/techniciens dans le domaine des

⁶¹ État de l'informatique quantique : construire une économie quantique

⁶² Insight report. *State of Quantum Computing: Building a Quantum Economy*. World Economic Forum. Septembre 2022. p 37.

⁶³ HUGUES, Owen. « Les entreprises d'informatique quantique cherchent leurs talents ». ZDnet. 23 novembre 2022. Disponible à l'adresse : <https://www.zdnet.fr/actualites/les-entreprises-d-informatique-quantique-cherchent-leurs-talents-39950112.htm>

⁶⁴ <https://mintzukunftschaften.de/philosophie/>

⁶⁵ Rapport de l'inspection générale de l'éducation, du sport et de la recherche. La formation initiale à l'aune des nouveaux défis scientifiques, technologiques et environnementaux et dans une perspective renforcée de souveraineté de la France : état des lieux et politiques territoriales. Octobre 2021. Disponible à l'adresse : <https://www.education.gouv.fr/la-formation-initiale-l-aune-des-nouveaux-defis-scientifiques-technologiques-environnementaux-et-326479>

STEM, « *the Institution of Engineering and Technology* » indique que « *les compétences du futur nécessitent dès maintenant d'être prises en considération* »⁶⁶.

Les métiers du quantique et les compétences nécessaires sont divers : physique, ingénierie système, télécommunications, informatique, cryptographie et interdisciplinaires (production, ingénierie, ...). A ce stade du développement de cette innovation, les besoins sont certes principalement en doctorants, mais « *la main d'œuvre du quantique inclut un large éventail de travailleurs qualifiés comme des informaticiens, des ingénieurs, des techniciens et des profils plus business* »⁶⁷. Cette stratégie française du quantique doit donc s'accompagner d'arbitrages des choix en termes d'offres de formation. Ces arbitrages doivent être effectués dans le cadre d'un dialogue avec les entreprises concernées. Il y a notamment un besoin de profils intermédiaires ou plus spécialisés qui nécessitent des formations adaptées comme des BTS, DUT ou les BUT délivrant un grade de licence. Aussi à l'instar des écoles de commerce, les écoles ingénieurs commencent à proposer davantage de diplômes de type bachelor (bac+3) qui pourraient être complétés par des spécialisations en particulier dans le domaine du quantique. D'autant plus que « *ces diplômes permettent de construire des cursus d' une grande souplesse, souvent en lien avec le tissu professionnel local et des partenaires étrangers* »⁶⁸.

La France, dans le cadre de la stratégie Quantique, mais également de l'intelligence artificielle, pourrait s'inspirer de la Corée du Sud qui a organisé sa formation au service des besoins de l'économie en fournissant une main d'œuvre de plus en plus qualifiée, qui est à la base du miracle économique coréen⁶⁹. La création d'un grand ministère français de la formation et du travail, en relation permanente avec les acteurs économiques du pays, visant au développement des talents de demain, pourrait être une première étape.

L'analogie avec le domaine de la cybersécurité, sur lequel une forme de cécité a longtemps conduit les experts et grandes entreprises spécialisées à minimiser l'importance de disposer, outre d'ingénieurs, de techniciens hautement qualifiés, est flagrante. Outre des bac+8 et bac+5, il apparaît souhaitable d'anticiper les futurs métiers (architectes techniques, télécoms, concepteurs, ...) et qualifications requises de niveau bachelor / bac+3 qui accompagneront le déploiement des technologies quantiques à une large échelle en entreprise. Si l'ensemble de ces métiers, à 10 ans, seront profondément modifiés par une utilisation généralisée de l'IA, les formations initiales peuvent d'ores et déjà intégrer des modules de sensibilisation à la rupture forte que constitueront des approches « quantiques » dans les métiers de l'IT et des télécoms pour ne citer que ceux-là.

➔ Recommandation 4 - Encourager les allers-retours public/privé des chercheurs

Dans son livre « Bienvenue dans la nouvelle révolution quantique », Julien Bobroff dresse un panorama encourageant de cette porosité entre la recherche publique et le monde de l'entreprise

⁶⁶<https://www.theiet.org/media/10899/open-letter-to-the-government-regarding-teaching-engineering-in-our-schools-2021.pdf>

⁶⁷ Insight report. *State of Quantum Computing: Building a Quantum Economy*. World Economic Forum. Septembre 2022. p 37.

⁶⁸ PEIRON Denis. « L'irrésistible essor des Bachelors ». *La Croix* (en ligne). 26 mars 2018. Disponible à l'adresse : <https://newsroom.sciencespo.fr/lirresistible-essor-des-bachelors/>

⁶⁹ CHEON Byung You. *Skills development strategies and the high road to development in the Republic of Korea*. International Labour Office. 2014. Disponible à l'adresse : https://labordoc.ilo.org/discovery/fulldisplay/alma994866463402676/41ILO_INST:41ILO_V2

dans le domaine du quantique. Il cite notamment l'exemple de la physicienne Maud Vinet « qui dirige aujourd'hui le programme quantique du CEA à Grenoble » et qui « durant son parcours, a connu à la fois la recherche fondamentale en France et la recherche industrielle aux États-Unis, chez IBM »⁷⁰. Il cite également Antoine Browaëys, ancien étudiant d'Alain Aspect, qui a conçu « l'un des meilleurs simulateurs quantiques au monde » et qui a cofondé la start-up Pasqal. Enfin, Julien Brodoff mentionne la physicienne Pascale Senellart qui « mène ses travaux au laboratoire de photonique et de nanostructures du CNRS et de l'université Paris-Saclay et qui tout en étant un pur produit de la recherche publique, a fait un pas vers le privé en cofondant une jeune start-up, Quandela »⁷¹. Ces exemples sont-ils une généralité ou sont-ils l'arbre qui cache la forêt ?

La loi du 24 décembre 2020 de programmation de la recherche pour les années 2021 à 2030 vise dans son titre 4 à « renforcer les relations de la recherche avec l'économie et la société ». Les enjeux de cette loi sont de « renforcer l'implication des personnels publics de recherche dans la création ou la participation à la vie d'une entreprise, renforcer les capacités d'innovation et la compétitivité des entreprises françaises en augmentant leurs interactions avec la recherche publique, améliorer l'efficacité des dispositifs de transfert, de recherche partenariale, de mobilité des chercheurs et de soutien à la création de start-up issues de la recherche publique ». Cette loi est ambitieuse et nécessaire. C'est désormais une bataille de conviction à mener face aux parties prenantes, les chercheurs comme le monde économique.

En effet, comme le souligne les auteurs du rapport « Recherche et innovation : comment rapprocher sphères publique et privée », « Le rapprochement du public et du privé en recherche est toujours freiné par le manque de connaissance mutuelle des acteurs concernés »⁷². Michel Devoret, physicien français et professeur de physique appliqué à l'université de Yale aux États-Unis, compare à ce sujet les systèmes français et américain. « Le système de recherche américain ne sert pas juste à former des universitaires mais aussi des ingénieurs pour les entreprises de technologies américaines. Dans mon équipe, la moitié des doctorants vont dans l'industrie. En France, le système a peur de faire des chômeurs. Les thésards ne sont pas toujours bien accueillis dans l'industrie »⁷³.

Le dispositif des thèses CIFRE (Conventions Industrielles de Formation par la Recherche), permettant à des doctorants de poursuivre leurs travaux de recherche en entreprise tout en étant encadrés par un laboratoire de recherche, apparaît adapté au domaine du quantique et sa maturité récente. Dispositif existant et sur lequel des retours d'expérience existent (1500 thèses en 2020), il bénéficie d'un financement de l'État, au travers notamment de l'ANRT (Association Nationale de la Recherche et de la Technologie) et du Crédit Impôt Recherche.

En plaçant les doctorants dans des conditions d'emploi scientifique et en développant leur employabilité future en entreprises, ce dispositif facilite également les liens entre le milieu

⁷⁰ BRODOFF Julien. *Bienvenue dans la nouvelle révolution quantique*. Flammarion. 2022. 437 p. ISBN : 9782080270405

⁷¹ BRODOFF Julien. *Bienvenue dans la nouvelle révolution quantique*. Flammarion. 2022. 437 p. ISBN : 9782080270405

⁷² LUCAS Claire et MARION Pierre. *Recherche et innovation : comment rapprocher sphères publique et privée*. Les Docs de la Fabrique. Presse des Mines. 2022. Numéro d'ISBN : 978-2-35671-771-9. Disponible à l'adresse : <https://www.la-fabrique.fr/fr/publication/recherche-et-innovation-comment-rapprocher-spheres-publique-et-privee-2/>

⁷³ BRODOFF Julien. *Bienvenue dans la nouvelle révolution quantique*. Flammarion. 2022. 437 p. ISBN: 9782080270405

académique et les entreprises ; et permettraient à ces dernières d'alimenter une réflexion sur les futurs métiers du quantique.

Le fléchage d'une quotité significative de ces supports budgétaires sur des sujets liés au quantique, vers des entreprises dont le secteur d'activité sera bouleversé par l'arrivée du quantique (bancaire, télécoms, énergie), doit permettre de préparer une transition de la recherche fondamentale vers la recherche appliquée.

A nouveau, il est nécessaire de revenir aux fondamentaux. Pour paraphraser le slogan DARPA⁷⁴, l'agence américaine des projets avancés de défense, la recherche française doit créer des technologies et capacités de rupture pour la souveraineté nationale. Cela passe nécessairement par un « mariage arrangé » entre les mondes de la recherche et de l'entreprise.

➔ Recommandation 5 : Préparer les entreprises à la transformation quantique

Quelles sont les sujets à adresser pour être prêt sachant que seules les grandes entreprises auront les moyens d'anticiper ces ruptures ou le devront par nécessité comme le secteur bancaire ?

Principalement, il s'agit d'identifier les activités/usages qui pourront être impactés et la valeur qui pourra être apportée. Cela n'est pas nécessairement coûteux. Les entreprises n'auront pas à acquérir leur ordinateur quantique étant donné que l'usage (*compute*⁷⁵) sera réalisé à distance. Il est toutefois probable que la préparation des données en amont nécessite des investissements importants pour tirer parti de cette rupture. En termes de data⁷⁶, le « ticket d'entrée » pour une utilisation du quantique apparaît comme important à l'échelle de grands groupes, pouvant prendre plusieurs années.

Un plan de déploiement du quantique en entreprise doit être établi sur la base de la priorisation de ces usages. Il est également indispensable d'assurer une montée en compétences des collaborateurs concernés et/ou de créer une cellule d'experts qui seront en capacité de comprendre les offres de service, en exposer les bénéfices attendus et les limites à partir des cas d'usage de leur entreprise. Et mettre en place des équipes de codage quantique soit en acquérant les ressources soit en assurant la montée en compétences des codeurs actuels.

Comme nous l'avons vu, la prise de conscience des entreprises est totalement embryonnaire, alors que les transformations seront longues et s'étaleront probablement sur une dizaine d'années. Dans la plupart des évolutions technologiques, les entreprises se transforment sous l'impulsion de la concurrence, de leur R&D quand elles ont leurs propres ressources de recherche, ou des cabinets de conseil.

⁷⁴ Creating Breakthrough technologies and capabilities for national security – La Darpa (*Defense Advanced Research Projects Agency*) est une agence du département de la défense américaine créée en 1958. Sa mission consiste à financer des projets technologiques à fort niveau d'incertitude qui peuvent aboutir à des innovations de rupture. Indépendante, basée sur une organisation agile, elle anime et construit des communautés d'innovation d'individus aux compétences hétérogènes et prometteuses pour chaque projet financé. Les chefs de projet sont recrutés pour des périodes de 3 à 4 ans. Ils viennent d'une grande variété d'horizons : civil/militaire ; public/privé...

⁷⁵ To compute : calculer

⁷⁶ Données numériques

A ce stade il semble que ces derniers ne soient pas encore initiateurs de ces changements, seuls quelques grands cabinets généralistes tels McKinsey & Company, Accenture, Boston Consulting Group, Deloitte proposent des accompagnements à un niveau essentiellement stratégique (i.e. : généraliste) en 2022. Nous constatons que nous sommes encore loin d'une approche basée sur l'accompagnement dans la définition, et la tentative de résolution, de problèmes même simples d'entreprise.

De plus, un volet « conduite du changement » si l'on utilise des termes usuels des entreprises, devrait être inclus au plan quantique français afin de préparer la phase d'industrialisation, avec pour finalités de :

- Préparer les secteurs critiques à la cryptographie (rôle de conseil de l'ANSSI),
- Sensibiliser les entreprises aux usages possibles,
- Identifier les acteurs porteurs de cette démarche, tant externes aux entreprises (ANSSI, cabinets de conseils, start-up dédiées, etc.) qu'internes (comités de direction générale, départements stratégie et prospective, compliance et *risk management*, directions des systèmes d'information ...),
- Établir des préconisations en termes de ressources nécessaires et de plans de montée en compétence.
- Recourir à la commande publique afin de diffuser l'utilisation de ces nouvelles technologies plus largement et rapidement.

La technologie quantique est une avancée majeure qui pourra offrir des opportunités pour les entreprises. Il est donc important pour elles de s'informer, de se former, de construire des partenariats et de développer une stratégie pour intégrer cette technologie dans leur activité pour en tirer le meilleur parti. Il convient cependant d'être réaliste. Seules les grandes entreprises initieront ces démarches. A l'instar de la transformation digitale, la transformation quantique nécessite des moyens que n'ont pas les entreprises de taille moyenne ou les petites entreprises.

A l'image de ce qui a été réalisé depuis une dizaine d'années par l'ANSSI sur le thème de la sécurité des systèmes d'information, puis de la cybersécurité, se traduisant notamment par un plan ambitieux de sensibilisation intra-entreprises, il convient de concevoir et déployer dès maintenant un plan de sensibilisation des entreprises à l'arrivée du quantique.

Un tel plan, peu coûteux, peut prendre la forme suivante :

- Sensibilisation des comités de direction et directions de la stratégie aux apports attendus du quantique, de façon concrète et prospective. Les inviter à commencer à élaborer une stratégie pour intégrer les technologies quantiques dans leur activité pour tirer parti de leur potentiel de manière efficace. Cette action peut être prise en charge par l'ANSSI pour adresser les questions liées à la cybersécurité. Pour les autres domaines, la réflexion peut être portée par les start-up du secteur ou des cabinets de conseil.
- Identification et mise en réseau des entreprises par secteur d'activité (telco, énergie, bancaire, transport, industrie, ...) pour mettre en relation les responsables concernés et explorer les entreprises qui ont déjà développé des technologies quantiques et voir comment elles peuvent les utiliser pour optimiser leur activité propre.
- Construire des partenariats avec des universités et des centres de recherche pour développer leur expertise en matière de technologies quantiques.

➔ **Recommandation 6 : Permettre aux entreprises de disposer des infrastructures nécessaires à l'irruption du quantique.**

A la sortie des laboratoires de recherche, nous pouvons considérer que l'utilisation du quantique en entreprise peut se décomposer en 4 types de besoins d'infrastructures, présentés ici du plus au moins facilement mutualisables :

- Des ordinateurs quantiques, qui peuvent être des ordinateurs à base de qubits (bits quantiques) ou des ordinateurs de simulation quantique. Ces ordinateurs peuvent être très coûteux et nécessitent des conditions de température et d'environnement très spécifiques pour fonctionner correctement. Les technologies actuelles induisent des infrastructures de refroidissement adaptées, et potentiellement très coûteuses.
- Des logiciels et des outils pour programmer et utiliser ces ordinateurs quantiques. Il existe déjà plusieurs plateformes logicielles pour cela, mais elles peuvent être complexes à utiliser pour les utilisateurs non experts.
- Des protocoles de stockage de l'information et communication sécurisés pour protéger les données et les résultats des calculs quantiques.
- Des protocoles de correction d'erreur pour corriger les erreurs qui peuvent survenir lors des calculs quantiques. Ces derniers étant très spécifiques à chaque utilisation sont difficilement mutualisables.

La connaissance des secteurs dans lesquels le quantique aura un potentiel de disruption important (Telco, finances, énergie, chimie, a minima), la performance des laboratoires français en la matière, comme la présence forte de géants reconnus en la matière (IBM France) doivent permettre d'opérationnaliser cette recommandation.

➔ **Recommandation 7 : Mettre en place les conditions pour l'industrialisation**

Pour l'industrialisation de l'utilisation du quantique en France, il est important de mettre en place des conditions favorables pour les entreprises. Une des façons de procéder est d'utiliser la commande publique, c'est à dire que l'État ou d'autres organisations publiques peuvent utiliser leur potentiel d'achat pour soutenir les entreprises qui développent des technologies quantiques. Par exemple, les entreprises peuvent être sélectionnées pour des marchés publics pour fournir des produits ou des services basés sur la technologie quantique, ce qui leur permet de développer leur activité.

Il est également important de disposer de fonds d'investissement dédiés pour soutenir les entreprises qui développent des technologies quantiques. Il existe des exemples de fonds d'investissement technologiques en France comme le fonds "Quantonation" qui est un fonds d'investissement public-privé qui vise à soutenir les entreprises innovantes dans le domaine de l'informatique quantique. Il permet aux entreprises de lever des fonds pour financer leur recherche et leur développement.

Enfin, il est crucial de mettre en place des collaborations entre les entreprises, les universités et les centres de recherche pour soutenir les efforts de recherche et développement en matière d'informatique quantique. En France, l'exemple le plus récent est le lancement de la "Fédération nationale pour la recherche et l'innovation quantique" qui regroupe les acteurs publics et privés

autour d'un même objectif : booster la recherche quantique, favoriser les transferts de technologies et accompagner les entreprises dans leur transition vers les technologies quantiques.

Pour les secteurs clés, l'informatique quantique a des applications potentielles dans de nombreux domaines tels que la finance, les télécommunications, la sécurité des systèmes d'information, la bio-informatique, les matériaux, la logistique, l'énergie, la métrologie, l'agriculture, la météorologie... Il est important de cibler les secteurs où les avancées technologiques pourraient avoir le plus grand impact économique et social, pour hiérarchiser la mise en place des politiques et des programmes adaptés.

A l'échelle européenne, le *Flagship Quantum Technologies* est un programme qui bénéficie de fonds pour soutenir la recherche (1Md€ sur 10 ans), associant de nombreuses équipes françaises du monde de la recherche, de l'université, ainsi que l'entreprise Thales.

Un soutien fort serait la création d'une Agence Européenne pour les Technologies Quantiques (EQTA), qui, sur le modèle de la DARPA nord-américaine mentionnée précédemment (cf. note 72), pourrait soutenir les projets de recherche et développement en matière d'informatique quantique à haut risque et à haut potentiel de retour sur investissement. Ce soutien pourrait concerner les projets de recherche à travers des financements, des partenariats avec les entreprises et les universités, et des programmes de transfert de technologies pour aider les entreprises à adopter les technologies quantiques. Elle pourrait également jouer un rôle clé en rassemblant les différents acteurs de l'industrie, de la recherche et de la politique pour coordonner les efforts et les politiques en matière de technologie quantique en Europe.

➡ Recommandation 8 : Définir et déployer une stratégie *Open Source*⁷⁷

L'intérêt et les objectifs de cette stratégie est d'implémenter des standards européens, tout en donnant un avantage aux entreprises du secteur.

En permettant une transparence sur les algorithmes d'IA et en permettant une meilleure maîtrise des données, l'*Open Source* peut aider à améliorer la souveraineté et la résilience numérique. Il est important que les entreprises et l'action publique adoptent une approche favorisant l'*Open Source* pour les solutions d'IA, et ultérieurement du quantique, en encourageant le développement interne, la coopération avec les acteurs publics et privés, et la formation des employés, selon les 4 axes suivants :

1. Encourager l'adoption de l'*Open Source* pour les technologies d'IA : les gouvernements et les entreprises peuvent encourager l'adoption de l'*Open Source* dans le développement et l'utilisation des technologies d'IA. Cela peut inclure la promotion de projets *Open Source* et la mise en place d'incitations pour les développeurs de logiciels pour travailler sur des projets *Open Source*.
2. Favoriser le développement de solutions *Open Source* pour les cas d'usage spécifiques : par le financement ou la participation au développement de solutions *Open Source* pour des cas d'utilisation spécifiques, tels que la reconnaissance vocale, la reconnaissance d'images, le traitement de flux, etc. Cela peut renforcer la compétitivité de l'Europe sur le

⁷⁷ Un logiciel *open source* est un logiciel informatique qui est publié sous une licence dans laquelle le titulaire du droit d'auteur accorde aux utilisateurs le droit d'utiliser, d'étudier, de modifier et de distribuer le logiciel et son code source à quiconque et à n'importe quelle fin.

plan de l'IA et du quantique, et permettre à la communauté de bénéficier de ces développements.

3. Favoriser la coopération entre les acteurs publics et privés : en travaillant de façon conjointe entre acteurs étatiques et entreprises pour développer des solutions *Open Source* pour des cas d'utilisation spécifiques dans le domaine de l'IA, cela peut renforcer les capacités de l'Europe en matière de développement d'IA et contribuer à la protection de la souveraineté numérique.
4. Favoriser la transparence dans les algorithmes d'IA : les gouvernements et les entreprises peuvent promouvoir la transparence dans les algorithmes d'IA en adoptant des solutions *Open Source* qui permettent une inspection et une compréhension des algorithmes. Cela peut contribuer à la protection des droits fondamentaux, à la protection de la vie privée et à la transparence dans les décisions prises par les systèmes d'IA.

➔ Recommandation 9 : Créer un comité éthique pluridisciplinaire de l'IA

Si les réflexions portées au niveau européen et ayant conduit à la proposition d'« *IA Act* » font encore débat, notamment sur les freins objectifs que cette proposition peut amener à l'innovation et au développement de modèles ouverts et *Open Source*⁷⁸, il est intéressant de noter que ces travaux se sont largement inspirés d'initiatives nationales dans de nombreux États membres.

Ainsi, la Finlande dispose d'un comité d'éthique de l'IA, cadre pluridisciplinaire composé de membres provenant de différents domaines (sciences, droit, philosophie, sociologie, etc.) à l'initiative du ministère de l'Enseignement et de la Culture, présidé par le professeur Juho Rousu. En Suède, c'est le Conseil national de la recherche suédoise et le professeur Mats Edenius qui pilote un groupe de réflexion similaire. En Estonie, le comité national d'éthique de l'IA a été créé en 2018 par le Ministère de l'Éducation et de la Recherche et est présidé par le professeur Tarmo Soomere. Composé de membres provenant de différentes disciplines, il a pour mission d'examiner les implications éthiques de l'utilisation de l'IA dans différents domaines et de formuler des recommandations pour garantir une utilisation responsable de ces technologies.

Bien que ces comités aient des mandats et des missions différents, ils ont tous pour objectif de garantir une utilisation responsable de l'IA, adapté au cadre culturel, réglementaire, industriel de leurs pays respectifs, et d'alimenter les axes de recherche, le législateur et également l'exécutif par une réflexion continue sur le sujet.

Il est important de souligner l'intérêt et l'importance du caractère pluridisciplinaire de ce comité d'éthique de l'IA. Il est nécessaire qu'il soit composé de membres provenant de différentes disciplines, tels que, par exemple, les sciences, l'économie, le droit, la philosophie et les sciences sociales. Cette réflexion ne peut être uniquement politique ou scientifique. La question de la représentativité doit également être posée. Est-il pertinent que ces sujets soient traités uniquement par l'élite ou est-il nécessaire d'inclure une représentativité plus large de la société afin de s'assurer de la bonne prise en compte des implications de l'utilisation de l'IA dans la vie

⁷⁸ <https://www.lemondeinformatique.fr/actualites/lire-l-ai-act-de-l-ue-un-fardeau-pour-la-communaute-open-source-87970.html>

quotidienne de tous les citoyens ? Ce comité devrait être chargé d'examiner les implications éthiques de l'utilisation de l'IA dans différents domaines et de formuler des recommandations pour garantir une utilisation responsable de ces technologies tout en laissant la place à l'innovation. La pluridisciplinarité de ce comité permettra également de faire entendre des voix différentes et de ne pas laisser les décisions d'encadrement à la seule main du politique. Cela a été par exemple bien fait avec le comité de bioéthique établi en réponse aux innovations liées à la fécondation in-vitro :

« Le CCNE est né en 1983 après la naissance par fécondation in vitro du premier bébé français. Cette prouesse de la technologie médicale fit émerger la conscience que tout le champ de la procréation était désormais bousculé. Il apparut essentiel de ne pas laisser les questions du progrès de la science aux seuls scientifiques et médecins et d'ouvrir la réflexion sur les conséquences des progrès de la science aux juristes, aux philosophes, aux grands corps de l'État, aux cultes »⁷⁹

Il est à noter que le CCNE (Comité National Consultatif d'Éthique) accueille, sous son égide depuis la fin 2019, le CNPEN (comité national pilote d'éthique du numérique) qui « *a pour rôle de rendre des avis sur les saisines qui lui sont confiées, d'éclairer le débat public sur les enjeux d'éthique du numérique et de rédiger des propositions relatives à la pérennisation de la réflexion nationale sur l'éthique du numérique* »⁸⁰. Néanmoins, le positionnement de ce comité ne semble pas adapté pour traiter les questions d'éthique dans l'IA malgré les profils de ses membres. En effet le président du CNPEN est nommé par le président du CCNE alors que ce dernier l'est par le Président de la République.

A l'instar des comités d'éthique de l'IA de Finlande ou de Suède, le comité français spécialisé sur ces questions devrait être placé à un niveau gouvernemental et plus précisément au niveau du Premier ministre afin de lui donner le poids nécessaire dans le cadre notamment du suivi de la stratégie nationale pour l'IA. La saisine de ce comité permanent devrait être obligatoire, c'est-à-dire que le gouvernement serait obligé de solliciter un avis. Ces avis pourraient revêtir un caractère obligatoire dans certains domaines (risques élevés) et facultatif dans d'autres domaines (enjeux moins importants ou notions de risques tels que précisés dans l'« IA Act »). Les avis de ce comité seraient publiés pour une parfaite information du public. Concernant son organisation, elle serait calquée sur le CCNE avec un président, nommé par le Président de la République mais indépendant de toute pression politique et reconnu pour ses compétences en matière d'IA. Ce comité disposerait d'un collège de plusieurs membres bénévoles et indépendants représentants différentes disciplines (sciences, droit, philosophie, sociologie, etc.). Il disposerait également de groupes de travail qui préparent les avis et réfléchissent et anticipent les évolutions de l'IA. Au-delà des avis obligatoires du gouvernement, ce comité pourrait s'auto-saisir sur des sujets et pourrait être saisi par d'autres institutions (la CNIL par exemple) ou organismes publics comme privés voire par les particuliers.

La philosophie de ce comité d'éthique de l'IA doit être la même que celle qui a menée à la création du CCNE : « *Jusqu'où peut-on aller et au nom de quoi ? Comment faire la part entre ce qui est possible et ce qui est acceptable pour l'avenir de l'homme et de la planète ?* »⁸¹

⁷⁹ <https://www.ccne-ethique.fr/node/351?taxo=48>

⁸⁰ <https://www.ccne-ethique.fr/node/414?taxo=56>

⁸¹ <https://www.ccne-ethique.fr/node/351?taxo=48>

Il est important que les recommandations formulées par le comité soient prises en compte dans les décisions relatives à l'IA, afin de garantir qu'elles sont alignées sur les valeurs éthiques et les normes de la société. Il est donc nécessaire que ce comité ait un pouvoir réel sur la définition des lois relatives à l'IA. A ce titre, un rôle consultatif non contraignant ne saurait suffire.

Les bénéfices -immédiats et futurs- attendus de la création d'un comité d'éthique de l'IA sont les suivants :

- Immédiatement, un comité d'éthique de l'IA permettrait de garantir que les décisions relatives à l'IA sont alignées sur les valeurs éthiques et les normes de la société. Cela contribuerait à éviter les problèmes éthiques qui pourraient survenir dans le cadre de l'utilisation de l'IA.
- A long terme, un comité d'éthique de l'IA pourrait contribuer à établir des normes et des pratiques éthiques pour l'IA, qui pourraient ensuite être adoptées dans d'autres régions du monde. Cela pourrait également contribuer à faire en sorte que les technologies d'IA soient utilisées de manière responsable et éthique, tant à l'échelle nationale qu'internationale.
- Enfin, le comité pourrait permettre de répondre aux inquiétudes et aux craintes de la population concernant les impacts de l'IA sur les emplois, la vie privée, la sécurité, la justice ou encore l'égalité. Il pourrait aider à sensibiliser les citoyens sur les avantages et les risques de ces technologies.

Qu'en serait-il du rôle de la CNIL ? Dans une étude du 30 août 2022, le Conseil d'État qui *« plaide pour la mise en œuvre d'une politique de déploiement de l'intelligence artificielle résolument volontariste, au service de l'intérêt général et de la performance publique »*⁸² recommande que la CNIL devienne l'autorité de contrôle nationale responsable de la régulation des systèmes d'IA. Elle ne doit pas aller au-delà de ce rôle au risque d'être juge et partie en la matière. Elle doit concentrer son expertise sur le contrôle et la sanction comme ce qu'elle fait déjà pour le RGPD ou la loi Informatique et Libertés.

Pour répondre à ces objectifs de manière efficace, plusieurs conditions sont à réunir : comité permanent, consultation obligatoire selon des critères touchant à l'éthique, possibilité de saisine par des particuliers, liens de proximité avec la CNIL.

➔ Recommandation 10 : Démarrer la formation continue sur le quantique et l'IA en entreprise

L'avènement du quantique va bouleverser les entreprises, qui doivent donc s'y préparer. La formation continue est une réponse efficace à la montée en compétences des personnels en place dans les entreprises.

Il y a lieu tout d'abord de définir ce qu'est la formation continue. Si l'on se réfère au site de l'éducation nationale, *« la formation tout au long de la vie est un continuum entre la formation initiale, générale ou professionnelle, et l'ensemble des situations où s'acquièrent des compétences : actions de formation continue, activités professionnelles, implications associatives ou bénévoles. Elle inclut les démarches d'orientation, de bilan, d'accompagnement*

⁸² <https://www.conseil-etat.fr/actualites/s-engager-dans-l-intelligence-artificielle-pour-un-meilleur-service-public>

vers l'emploi, de formation et de validation des acquis de l'expérience. La formation continue repose sur l'obligation, pour les employeurs, de participer au financement de la formation continue des salariés, et sur le droit, pour ces derniers, à se former sur leur temps de travail »⁸³.

Cette définition est intéressante car elle ne mentionne pas les objectifs principaux et fondamentaux de la formation continue. Pour reprendre les termes du paragraphe précédent, la formation continue doit servir les besoins de l'économie en fournissant une main d'œuvre qualifiée, et d'ajouter, une main d'œuvre adaptée aux enjeux économiques du moment.

La Finlande oppose d'ailleurs les termes de formation tout au long de la vie et formation continue. Le ministère de l'éducation et de la culture explique que le terme de formation continue « *met en lumière l'importance de la requalification et du perfectionnement des compétences* »⁸⁴. Une autre expression intéressante est à trouver Outre-Manche. *The Institution of Engineering and Technology* parle de « *développement professionnel continu* »⁸⁵. Il le définit comme le « *maintien et le développement des connaissances et compétences requises pour conserver ses aptitudes professionnelles de technicien ou d'ingénieur* ».

Ce développement professionnel continu est essentiel dans le domaine du quantique car la technologie progresse rapidement. L'État et les régions qui en sont les acteurs principaux doivent impérativement associer les entreprises et les partenaires sociaux à l'élaboration des formations nécessaires à la bonne marche de la stratégie quantique du pays. L'expérience coréenne à nouveau montre « *qu'un système de développement des compétences uniquement géré par l'État ne permet pas de répondre aux besoins actuels des entreprises en matière de compétences professionnelles* »⁸⁶.

L'enjeu est là. Associer étroitement les entreprises notamment les start-up et le tissu des petites et moyennes entreprises à la définition des besoins en formation et à la définition des futurs cas d'usages est une nécessité pour maintenir notre avance dans le quantique et assurer notre futur avantage compétitif. Un rapport de l'Inspection Générale de l'Éducation, du Sport et de la Recherche pointe néanmoins que « *les industriels et leurs représentants n'ont qu'une faible connaissance de la méthode et des contraintes d'élaboration de la carte des formations, de la révision des référentiels, tandis qu'en sens inverse rares sont les enseignants et les personnels du MENJS qui sont au fait de la réalité des évolutions et des enjeux de l'industrie* » de proximité et de pointe »⁸⁷.

La création, le 1^{er} janvier 2019, de France compétences doit permettre d'atteindre ces objectifs en matière de formation continue dans les domaines stratégiques pour l'État. En effet, France compétences est « l'institution nationale publique chargée de la régulation et du financement de la formation professionnelle et de l'apprentissage » et est « placée sous la tutelle du ministre

⁸³ <https://www.education.gouv.fr/la-formation-tout-au-long-de-la-vie-7508>

⁸⁴ <https://okm.fi/en/continuous-learning-reform>

⁸⁵ <https://www.theiet.org/career/professional-development/continuing-professional-development/what-is-cpd/>

⁸⁶ CHEON Byung You. *Skills development strategies and the high road to development in the Republic of Korea*. International Labour Office. 2014. Disponible à l'adresse :

https://labordoc.ilo.org/discovery/fulldisplay/alma994866463402676/41ILO_INST:41ILO_V2

⁸⁷ Rapport de l'inspection générale de l'éducation, du sport et de la recherche. La formation initiale à l'aune des nouveaux défis scientifiques, technologiques et environnementaux et dans une perspective renforcée de souveraineté de la France : état des lieux et politiques territoriales. Octobre 2021. Disponible à l'adresse : <https://www.education.gouv.fr/la-formation-initiale-l-aune-des-nouveaux-defis-scientifiques-technologiques-environnementaux-et-326479>

chargé de la formation professionnelle »⁸⁸. Son ministère de tutelle n'est peut-être pas le mieux à même d'insuffler des stratégies industrielles comme le développement des technologies quantique. Un placement d'un France compétences « stratégiques » auprès du Premier Ministre aurait davantage de sens et de poids. D'autre part, comme proposé plus haut, un grand ministère de la formation initiale et continue aurait du sens dans un système français en tuyaux d'orgues avec plusieurs ministères et agences compétents dans le domaine. La volonté d'unifier le paysage de la formation continue qui a présidé à la création de France compétences devrait s'appliquer plus largement à la formation, du berceau à la tombe.

⁸⁸ <https://travail-emploi.gouv.fr/ministere/agences-et-operateurs/article/france-competences>