

# Souveraineté et résilience numérique

MISSION IMPOSSIBLE

Ouvrage de la Mission 2022  
Mentor : Romain NICCOLI



## Avant-Propos

*« Souveraineté numérique :*

*Dans ses différentes dimensions, économiques, industrielles, sociétales, quels risques et quelles opportunités pour les Etats, les institutions et les entreprises ? »*

« Never waste a good crisis. » Winston Churchill

L'une des rares vertus de la période actuelle, et plus généralement des années qui viennent de s'écouler, est de nous avoir fourni, sous de nombreuses formes, des crises de diverses natures.

Ces crises bousculent les acteurs les plus fragiles, pendant que les acteurs les plus robustes en sortent finalement renforcés. Ceci peut s'appliquer aux organisations (entreprises, institutions, ONG etc..), aux Etats, voire aux régions du monde.

Parmi les prismes d'analyse, la sphère numérique est certainement l'une de celles qui -avec la transition écologique- concentrent le plus de défis et d'opportunités.

Internet est déjà le théâtre d'échanges entre acteurs économiques, de luttes d'influence sans merci, en même temps qu'il est devenu le dépositaire d'une partie de l'histoire et de la mémoire collective de l'humanité.

Les prochains défis, les futures confrontations, sont déjà connus.

Certains d'entre eux ont pour noms « intelligence artificielle » ou « informatique quantique ».

Ils comportent une profusion de promesses, dans des domaines comme la santé, la création et l'accumulation de connaissances, ou encore l'établissement de communications denses et sécurisées.

Mais le côté obscur est également proche : l'intelligence artificielle peut être utilisée pour influencer voire manipuler les opinions publiques, pour outiller des tentatives de fraude, et l'informatique quantique peut permettre aux plus avancés des acteurs, privés ou publics, de convertir en simples cartes postales les informations les plus confidentielles.

Dans un tel contexte, comment un pays comme la France, comment les acteurs français, avec leurs forces et leurs vulnérabilités, peuvent-ils contribuer à la souveraineté numérique à laquelle nous aspirons tous, pour ne pas dépendre de décisions ou d'autorisations qui nous seraient accordées par des acteurs situés très à l'Ouest ou très à l'Est de l'Europe ? Sur ce point, quelle est la part des options stratégiques qui peuvent encore être prises au niveau national par des acteurs publics ou privés -pourvu que ce soit en bonne intelligence- et quelles sont celles qui doivent être nécessairement adoptées au niveau régional en l'occurrence le niveau Européen ?

Fidèle à sa raison d'être, la Fondation Nationale Entreprise et Performance a réuni une équipe pluridisciplinaire autour de ces questions complexes.

Après un travail en profondeur effectué en France ainsi qu'auprès de plusieurs experts étrangers, cette équipe vient de réaliser un état des lieux, sans fard, et formule dix recommandations. Certaines de bon sens, mais pas encore initiées, d'autres nécessaires, mais qui demandent un engagement collectif dans la durée, et qui tranchent avec ce qui a pu être observé dans des domaines adjacents.

Ces dix propositions visent à nourrir les écosystèmes, et à résister au chant de certaines sirènes (facilité, solutions de court terme, etc.) qui ne font que saper les bases d'une souveraineté qui ne peut émerger ou se reconstruire que par le biais d'une vision politique claire et durable.

Je vous invite vivement à prendre connaissance du rapport de la Mission 2022 de la FNEP, et des recommandations qu'il contient. Tout débat, toute suggestion permettant d'approfondir le sujet et d'améliorer notre résilience collective seront naturellement les bienvenus.

Olivier Peyrat

Président de la FNEP

# Table des matières

<b>AVANT-PROPOS</b> .....	<b>1</b>
<b>TABLE DES MATIERES</b> .....	<b>3</b>
<b>PREFACE</b> .....	<b>5</b>
<b>COAUTEURS, MEMBRES DE LA MISSION 2022</b> .....	<b>7</b>
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>8</b>
<b>SYNTHESE</b> .....	<b>9</b>
L'ORDINATEUR QUANTIQUE, SES ENJEUX, SES RISQUES ET SES OPPORTUNITES .....	9
L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET LES ENJEUX LIES A L'ETHIQUE .....	11
<b>EXECUTIVE SUMMARY</b> .....	<b>13</b>
QUANTUM COMPUTER, WHAT IS AT STAKE, WHAT ARE THE CHALLENGES, AND THE OPPORTUNITIES: .....	13
ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND ETHICAL ISSUES: .....	14
<b>REFLEXIONS SUR LA SOUVERAINETE NUMERIQUE</b> .....	<b>16</b>
UNE INTERDEPENDANCE ASSUMEE MAIS RISQUEE DANS LE DOMAINE DES SEMI-CONDUCTEURS .....	16
A DEFAUT D'ETRE LEADER EN MATIERE D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE, L'UNION EUROPEENNE LEGIFERE .....	18
NOS DONNEES SONT A LA MERCI DE PAYS MAL INTENTIONNES .....	20
TECHNOLOGIES DU NUMERIQUE : RECHERCHE TALENTS DESEPEREMENT .....	22
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>24</b>
<b>CHAPITRE 1 : ENJEUX, OPPORTUNITES DU QUANTIQUE</b> .....	<b>25</b>
LE QUANTIQUE, QU'EST-CE QUE C'EST ? .....	25
QUELS EN SONT LES USAGES POTENTIELS ? .....	26
LA FEUILLE DE ROUTE NUMERIQUE EUROPEENNE ET LE PLAN QUANTIQUE FRANÇAIS .....	27
COMPARAISON DES NIVEAUX D'INVESTISSEMENT DE DIFFERENTS PAYS .....	29
LES ATOUTS DE LA FRANCE .....	29
<i>La recherche académique</i> .....	30
<i>Le terreau des start-up</i> .....	30
<i>Les investisseurs</i> .....	31
QUELS SONT LES RISQUES ? .....	31
<i>Risque de sous-financement</i> .....	33
<i>Risque de manque ou perte des talents</i> .....	35
<i>Risque d'appropriation tardive de la part des entreprises</i> .....	36
<b>CHAPITRE 2 : L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET L'ETHIQUE</b> .....	<b>38</b>
L'IA, QU'EST-CE QUE C'EST ? .....	38
QUELS EN SONT LES USAGES ? .....	39
L'IA ACT EUROPEEN .....	39
QUELS SONT LES RISQUES : IA VS ETHIQUE ? .....	41
<i>Le risque lié au manque de confiance</i> .....	41
<i>Le risque lié aux données</i> .....	42
<i>Le risque de la régulation à outrance</i> .....	42
<i>Le risque lié au manque de compétences et de développement des futurs « travailleurs de l'IA » en entreprise</i> .....	43
EN CONCLUSION .....	44

<b>CHAPITRE 3 : NOS RECOMMANDATIONS.....</b>	<b>45</b>
↳ RECOMMANDATION 1 - CONCENTRER LES FINANCEMENTS SUR LES PHASES D'INDUSTRIALISATION EN SELECTIONNANT QUELQUES CHAMPIONS .....	45
↳ RECOMMANDATION 2 - NE PAS SAUPOUDRER ET FOCALISER L'APPROCHE INDUSTRIELLE SUR LES TECHNOLOGIES QUANTIQUES LES PLUS PROCHES DE LA MISE EN PRODUCTION .....	48
↳ RECOMMANDATION 3 - DEFINIR DES MAINTENANT UNE STRATEGIE RH DU QUANTIQUE .....	49
↳ RECOMMANDATION 4 - ENCOURAGER LES ALLERS-RETOURS PUBLIC/PRIVE DES CHERCHEURS.....	50
↳ RECOMMANDATION 5 : PREPARER LES ENTREPRISES A LA TRANSFORMATION QUANTIQUE .....	52
↳ RECOMMANDATION 6 : PERMETTRE AUX ENTREPRISES DE DISPOSER DES INFRASTRUCTURES NECESSAIRES A L'IRRUPTION DU QUANTIQUE.....	54
↳ RECOMMANDATION 7 : METTRE EN PLACE LES CONDITIONS POUR L'INDUSTRIALISATION .....	54
↳ RECOMMANDATION 8 : DEFINIR ET DEPLOYER UNE STRATEGIE <i>OPEN SOURCE</i> .....	55
↳ RECOMMANDATION 9 : CREER UN COMITE ETHIQUE PLURIDISCIPLINAIRE DE L'IA .....	56
↳ RECOMMANDATION 10 : DEMARRER LA FORMATION CONTINUE SUR LE QUANTIQUE ET L'IA EN ENTREPRISE .....	58
<b>ANNEXE.....</b>	<b>61</b>
LISTE DES PERSONNES RENCONTREES .....	61
<i>France</i> .....	61
<i>Royaume-Uni</i> .....	61
<i>Allemagne</i> .....	62
<i>Finlande</i> .....	62
<i>Estonie</i> .....	62
REMERCIEMENTS.....	63

## Préface

A l'heure où ces lignes sont écrites, un phénomène accapare depuis plusieurs mois une grande partie des discussions dans le monde de la technologie : la montée en puissance de ChatGPT ("*Chat Generative Pre-trained Transformer*"). Développé par la société OpenAI, cet agent conversationnel utilise l'intelligence artificielle (IA) pour dialoguer avec un internaute et répondre à tout type de question. Ce qui a particulièrement impressionné les utilisateurs de cet agent, c'est qu'il semble se comporter comme un humain : non seulement il répond à une première question sur n'importe quel sujet mais aussi aux questions suivantes en gardant le contexte de la discussion, admettant ses erreurs, remettant en question ses hypothèses, rejetant même les questions inappropriées. Non content d'avoir ainsi marqué les esprits, OpenAI a récemment sorti GPT4, une nouvelle version du moteur d'IA de ChatGPT, augmentant significativement la pertinence de l'outil et annonçant du même coup de nouvelles versions à venir exponentiellement plus puissantes encore.

Il en découle une impression d'accélération vertigineuse des progrès dans le domaine de l'IA, rendant plus crédible l'atteinte de l' "AGI" - "*Artificial General Intelligence*" - que l'on peut traduire par intelligence artificielle générale, c'est à dire la capacité à effectuer tout ce que ferait un humain. Jusqu'à présent, l'intelligence artificielle avait surtout brillé par sa capacité à faire très bien des tâches très spécialisées, avec de nombreuses applications économiques dans les entreprises de différents secteurs depuis au moins deux décennies.

Ces progrès spectaculaires suscitent autant d'enthousiasme que de peur. Ils ouvrent la porte à de nombreuses nouvelles applications dans divers domaines mais pourraient aussi remplacer un nombre colossal d'emplois aujourd'hui occupés par des humains. Certains imaginent déjà l'avènement d'une IA devenue capable de se perfectionner elle-même, sans l'intervention des humains, à un rythme de plus en plus rapide. On ne peut s'empêcher de penser à Skynet, qui a marqué l'imaginaire populaire à travers la série de films Terminator, à tel point que des centaines d'experts, dont Elon Musk, pourtant fondateur d'OpenAI, appellent à faire une pause dans le développement de l'IA.

Dans ce contexte, où des entreprises privées sont à la source de tels changements alors que dans le même temps les rivalités et hostilités entre grands blocs dans le monde conduisent à des affrontements de moins en moins retenus, le sujet de la souveraineté numérique n'a jamais été aussi important. L'empreinte du numérique dans de nombreux secteurs en fait par ailleurs un sujet tentaculaire. Parmi les questions qu'il peut recouvrir, citons notamment :

Comment faire émerger des champions digitaux français ou européens ? Quels modèles économiques sont les plus appropriés ? Comment les Etats peuvent-ils favoriser l'innovation ou au contraire l'entraver, notamment à travers la commande publique ou la régulation (particulièrement d'actualité dans le domaine du web3 et de la crypto, qui touche à des domaines régaliens et où l'Etat hésite entre favoriser ou interdire) ? Comment les Etats peuvent-ils utiliser le numérique pour se moderniser ?

Que faire face aux positions dominantes de grandes entreprises du numérique, souvent américaines ou chinoises, qui peuvent empêcher l'émergence de nouveaux acteurs, notamment français ou européens ?

Comment gérer l'impact des réseaux sociaux et des algorithmes qui les gouvernent pour contrôler la désinformation et l'impact grandissant qu'ils ont sur la démocratie ?

Comment gérer l'impact social des nouveaux modèles du numérique, quand "ubérisation" est devenu un nom commun ?

Comment s'assurer de la disponibilité des tous les composants, matériels et logiciels, nécessaires au fonctionnement de l'infrastructure numérique de l'Etat et des entreprises ? Comment garantir la cybersécurité dans ce contexte ?

Face à ces nombreuses questions - et d'autres - qui ont déjà été traitées à de nombreuses reprises dans différentes études, la mission FNEP 2022 a choisi de se concentrer sur deux thématiques : l'éthique dans l'intelligence artificielle, et les opportunités et risques dans le développement des technologies quantiques. La première ne surprendra personne. Le choix de traiter les technologies quantiques peut paraître plus surprenant car ce sujet est moins connu du grand public alors qu'il pourrait être une des prochaines grandes révolutions dans le numérique. C'est certainement parce qu'il est beaucoup moins avancé que l'IA, sortant tout juste des laboratoires de recherche fondamentale pour commencer à faire son chemin dans les *start-up* et les applications industrielles concrètes. Il faut voir cela comme une opportunité pour la France, pour l'instant plutôt bien positionnée sur le sujet, de tirer son épingle du jeu avant qu'il ne soit trop tard.

Ce fut un plaisir pour moi de rencontrer les membres de cette mission et d'échanger avec eux !

Romain Niccoli

Cofondateur et co-CEO de Pigment

## Coauteurs, membres de la mission 2022

Olivier BEAUREPAIRE      Directeur programme Data & CDO, TER - SNCF Voyageurs

Thomas BOLLE              Lieutenant-colonel, officier professeur au centre de formation des dirigeants de l'école des officiers de la Gendarmerie Nationale

Sophie LAFON              Directrice adjointe Statistiques et Valorisation des Données, RTE

Stanislas SMIEJAN        Directeur Marketing, ADISSEO

## Remerciements

*Nos remerciements vont à  
Michel Schmitt pour son écoute,  
ses conseils et ses nombreux apports,  
tant sur la forme que sur le fond, tout au long de ce travail, à  
Romain Niccoli notre mentor,  
ainsi qu'à tous nos interlocuteurs  
pour les échanges riches qui ont contribué à façonner notre opinion*

*Nous remercions enfin chaleureusement  
les services économiques régionaux et services de sécurité intérieure  
des ambassades de France de Grande-Bretagne,  
d'Allemagne, de Finlande et d'Estonie  
dont l'aide a été décisive pour obtenir des entretiens  
avec des organismes privés comme publics  
de haut niveau dans ces pays  
Ces learning expeditions  
destinées à dénicher des bonnes pratiques chez nos voisins  
n'auraient pu avoir lieu sans leur appui*

## Synthèse

Dans le domaine de la souveraineté numérique, la France et l'Europe semblent avoir déjà perdu quelques batailles même si l'Europe a en son sein quelques leaders mondiaux. Dans le domaine des télécommunications, par exemple, les principaux réseaux sociaux sont américains (ou Chinois), les composants électroniques sont fabriqués en Chine ou à Taïwan, les plus grands systèmes d'exploitation sont américains.

Mais il reste encore deux domaines dans lesquels la France (avec l'Europe) a des cartes à jouer pour maintenir, ou peut-être reconstruire, sa souveraineté : le développement de l'ordinateur quantique d'une part, et l'encadrement de l'éthique de l'Intelligence Artificielle -IA-.

Ces deux sujets ont concentré nos efforts de recherche. Nous proposons un ensemble de mesures pour soutenir leurs développements et en permettre le succès.

### L'ordinateur quantique, ses enjeux, ses risques et ses opportunités

Notre réflexion a tout d'abord porté sur une définition succincte de cette technologie.

*Un ordinateur quantique utilise les propriétés quantiques de la matière afin d'effectuer des opérations sur des données. À la différence d'un ordinateur classique basé sur des transistors travaillant sur des données binaires (codées sur des bits, valant 0 ou 1), l'ordinateur quantique travaille sur des qubits<sup>1</sup> dont l'état quantique peut posséder plusieurs valeurs, ou plus précisément une valeur quantique comportant plusieurs possibilités simultanées. L'ordinateur quantique promet de révolutionner le calcul. Cette technologie apporte la capacité de résoudre, en quelques minutes, des calculs insolubles aujourd'hui au regard de la vitesse de calcul possible.*

Plusieurs technologies émergent et des choix devront être faits pour réussir à faire émerger demain de vrais champions -et une industrie- du quantique.

Les domaines d'application sont concrets et nombreux.

Pour n'en citer que quelques-uns :

- Dans le domaine de la sécurité numérique, avec une exposition de l'ensemble des codes actuels, reposant sur des technologies non quantiques,
- Des usages sont d'ores et déjà imaginés dans le domaine de la métrologie, militaire ou non,

---

<sup>1</sup> Unité de mesure de l'information en informatique quantique

- Les apports pour la médecine et la chimie auront pour finalité la compréhension des mécanismes de maladies et le développement de nouveaux médicaments,
- Dans la logistique, le quantique s'attaquera à la résolution de nombreux problèmes complexes,
- Une amélioration des performances des systèmes d'IA est attendue, notamment dans l'apprentissage automatique.

De nombreux pays ont pris conscience de la criticité de cette technologie pour l'avenir de la souveraineté des États. Les États-Unis et la Chine, en premier lieu, rivalisent dans leurs investissements. La France n'est pas en reste dans ce domaine, et dispose d'atouts indéniables.

Nos analyses et les entretiens menés avec des acteurs du secteur, nous ont permis d'identifier sept recommandations qui devraient permettre de consolider notre développement, et de nous donner une chance de construire une place dans l'avenir du quantique, chacune étant associée à un risque identifié lors de nos recherches :

Risque de sous-financement	Recommandation 1	Concentrer les financements sur les phases d'industrialisation en sélectionnant quelques champions
	Recommandation 2	Ne pas saupoudrer et focaliser l'approche industrielle sur les technologies quantiques les plus proches de la mise en production
Risque de manque ou perte des talents	Recommandation 3	Définir dès maintenant une stratégie RH du quantique
	Recommandation 4	Encourager les allers-retours public-privé des chercheurs
Risque d'appropriation tardive de la part des entreprises	Recommandation 5	Préparer les entreprises à la transformation quantique
	Recommandation 6	Permettre aux entreprises de disposer des infrastructures nécessaires à l'irruption du quantique
	Recommandation 7	Mettre en place les conditions pour l'industrialisation

L'ensemble de ces sept premières recommandations sont détaillées dans le corps de notre ouvrage. Elles permettront au lecteur d'approfondir ces sujets que notre étude nous aura permis d'identifier.

## L'Intelligence Artificielle et les enjeux liés à l'éthique

Notre ouvrage s'intéresse également au sujet de l'intelligence artificielle, comme étant une des technologies de rupture de ces dernières années pouvant avoir un impact majeur sur la souveraineté des États.

Le sujet n'est pas nouveau mais les réflexions engagées aujourd'hui autour de l'encadrement de l'IA nous ont poussés à approfondir cette thématique.

Dans ce cas aussi notre ouvrage commence par proposer une définition succincte de l'IA :

*L'intelligence artificielle est un domaine de la technologie qui vise à faire en sorte que les machines puissent accomplir des tâches qui nécessitent habituellement de l'intelligence humaine, comme comprendre le langage, résoudre des problèmes ou apprendre par eux-mêmes.*

Il y a plusieurs façons d'apprendre pour les machines. L'une des plus courantes est appelée "apprentissage automatique", un autre concept important est l'"apprentissage profond", pendant lequel la machine utilise des réseaux de neurones pour effectuer des tâches complexes.

De très nombreux cas d'usages sont aujourd'hui accessibles aux IA :

- Reconnaissance de la voix et du visage : ce qui en fait un outil utile pour les systèmes de sécurité notamment,
- Transports : l'IA est utilisée pour optimiser les itinéraires de conduite, et pour les voitures autonomes,
- Commerce électronique : l'IA est utilisée pour recommander des produits en ligne, et pour personnaliser les expériences d'achat,
- Santé : l'IA est utilisée pour designer des médicaments, diagnostiquer des maladies, et pour recommander des traitements,
- Finance : l'IA est utilisée pour effectuer des transactions financières complexes et sécurisées, ou encore recommander des investissements,
- Marketing et retail : l'IA est utilisée pour personnaliser les campagnes de marketing, pour prédire les tendances de consommation, et pour recommander des actions de marketing,
- Éducation : l'IA aide dans la personnalisation des plans d'étude, la détection des difficultés d'apprentissage, et l'évaluation des performances des étudiants.

Là aussi, les États ont bien identifié le sujet et ont proposé, notamment en Europe avec « *L'AI Act* », un cadre réglementaire pour tenter de juguler une partie des risques que l'IA pourrait représenter sur la souveraineté. Au-delà de ce cadre, notre réflexion nous a permis de proposer trois recommandations pour remédier à certains risques, et contribuer à maintenir la souveraineté de l'État dans le contexte du déploiement accéléré de l'IA.

Risque lié au manque de confiance	Recommandation 8	Définir et déployer une stratégie <i>OpenSource</i>
Risque lié aux données	Recommandation 9	Créer un comité éthique pluridisciplinaire de l'IA
Risque lié au manque de compétences et de développement des futurs « travailleurs de l'IA » en entreprise	Recommandation 10	Démarrer la formation continue sur le quantique et l'IA en entreprise

- Notre ouvrage n'a pas vocation à être exhaustif, mais nous espérons que ses conclusions pourront soutenir le régulateur et le législateur dans le soutien au développement absolument critique d'une industrie de l'ordinateur quantique compétitive en France, voire inspirer les entreprises, et dans le soutien au développement et à l'encadrement de l'industrie de l'IA.

## Executive Summary

In the matter of digital sovereignty, France and furthermore Europe, seem to have already lost some battles (even though Europe hosts some global leaders, in the field telecommunication for example): the main social networks are American (or Chinese), the most critical electronic components are manufactured in China or in Taiwan, the most significant Operating Systems are American. But there are still two major domains where France (together with Europe) has a few trump cards to play to maintain, or maybe rebuild, its sovereignty: the development of quantum computers, and the farming of ethics in Artificial Intelligence.

Both those topics have been the focus of our research. This report proposes a consolidation of recommendations to support their development and allow for their success.

Quantum computer, what is at stake, what are the challenges, and the opportunities:

Our report starts by defining, in a few simple terms, this technology.

*A quantum computer utilizes the quantum properties of matter to perform operations on data. To the difference of a classic computer, based on transistors and working on binary data (coded in bytes, with a value of 0 or 1), the quantum computer uses qubits which quantum state can possess several values, or more precisely a quantum state holding several possible values simultaneously. Quantum computers have the ability to revolutionize calculations. This technology brings the ability to solve, in a few minutes only, complex calculations that couldn't be solved previously with the current calculation capabilities.*

Several technologies have emerged and choices will have to be made to achieve the emergence of true champions, and tomorrow an industry of quantum computing.

Applications are concrete and numerous. To only cite a few:

- In digital security, with all current codes being exposed, if they are not based on quantum technologies.
- Some usages in metrology are already being developed, whether in military applications or civil ones.
- In medicine and in chemistry main applications will be to help understand better the way diseases operate and support the development of new molecules and new chemical compounds. The calculation powers of quantum allowing to work at a molecular level.
- In logistics, quantum computing will allow the solve numerous complex problems.
- An improvement in AI systems is also expected, for example in machine-learning tools.

Many countries have understood the criticality of this technology for the future of States' sovereignty. The United States and China, in the first instance, are rivalling in the scale of their investments. France is not far behind on this topic and possesses some real assets. Non-the-less, our analysis and the interviews we performed with key stakeholders of this sector has allowed us to identify 7 recommendations that should allow to consolidate our development and to give us

a chance to position ourselves in the future of quantum computing, each one of them associated to some a risk we identified during our research:

Risk of sub-financing	Recommendation 1	Focus financings on the industrialization phases of quantum technologies that are the closets to manufacturing stages by selecting a few champions
	Recommendation 2	Do not spread the financing and focus the industrial approach on quantum technologies closest to production
Risk of lack or loss of talents	Recommendation 3	Define right away an HR strategy for quantum computing
	Recommendation 4	Support the back and forth between public and private laboratories for researchers
Risk of late appropriation by companies of the technology	Recommendation 5	Prepare companies to the quantic revolution
	Recommendation 6	Allow companies to possess infrastructures to support the development of quantum computing
	Recommendation 7	Set-up the right conditions for industrialization of the technology

All these recommandations are detailed in the body of this report and will allow our readers to go deeper into these topics that our study have allowed us to identify.

[Artificial Intelligence and Ethical Issues:](#)

Our report also focuses on artificial intelligence as one of the disruptive technologies arising in recent years that can have a major impact on the sovereignty of states. The subject is not new, but the reflections engaged today around the framework of AI have pushed us to further explore this theme.

In this case also our report proposes a succinct definition of AI:

*Artificial intelligence (AI) is a field of technology that aims to make machines capable of performing tasks that usually require human intelligence, such as understanding language, solving problems or learning on their own.*

There are many ways in which machines can learn. One of the most common is called "machine learning", another important concept is "deep learning", where the machine uses neural networks to perform complex tasks.

There are many ways to use AI technology today:

- Voice and Facial Recognition, which makes it a useful tool for security systems in particular.
- Transportation: AI is used to optimize driving routes, and for autonomous cars.
- E-commerce: AI is used to recommend products online; to personalize shopping experiences.
- Health: AI is used to design drugs, diagnose diseases, and recommend treatments.
- Finance: AI is used to perform complex and secure financial transactions and recommend investments.
- Marketing and Retail: AI is used to personalize marketing campaigns, predict consumer trends, and recommend marketing actions.
- Education: In personalizing study plans, detecting learning difficulties, and assessing student performance.

Governments have identified the issue and have proposed, notably in Europe with the "AI Act", a regulatory framework to try to mitigate some of the risks AI could represent for sovereignty. Beyond this framework, our report proposes recommendations to remedy certain risks and help maintain state sovereignty in the context of accelerated AI deployment.

Lack of trust risk	Recommendation 8	Define and deploy an OpenSource strategy
Data risk	Recommendation 9	Create a multidisciplinary AI ethics committee Risk of over-regulation
Risk related to the lack of skills and development of future "AI workers" in companies	Recommendation 10	Start continuous training on quantum technology and AI in companies

- ➔ Our report is not intended to be exhaustive, but we hope its conclusions can support the regulators and legislators in advancing the absolutely critical development of a competitive quantum computer industry in France, and even inspire companies to invest the development and supervision of the AI industry.

## Réflexions sur la souveraineté numérique

« *Ce sont ceux qui peuvent détruire une chose qui la contrôlent vraiment* »<sup>2</sup>.

Cette phrase est prononcée par le protagoniste principal de *Dune*, le célèbre roman de science-fiction de Franck Herbert. Son œuvre fait référence à de nombreuses thématiques actuelles dont l'écologie, le réchauffement climatique ou la dépendance énergétique<sup>3</sup>. L'auteur y raconte les tentatives de grandes puissances ou d'organisations pour dominer l'exploitation d'une ressource naturelle critique qu'est l'Épice. Cette substance rare est produite dans une seule planète de l'univers, la planète Arrakis, et ne peut être créée artificiellement.

L'ouvrage apporte donc, au travers des éléments mentionnés ci-dessus, une définition, parmi d'autres, de la souveraineté<sup>4</sup>. Cette définition tirée de la science-fiction trouve son illustration dans au moins deux événements récents, mettant en scène des confrontations entre États : la guerre en Ukraine ainsi que la crise sino-taïwanaise. En effet, la Russie, sous le coup de sanctions internationales, détenant les plus grandes réserves prouvées de gaz naturel au monde, a ainsi décidé de brûler le gaz qu'elle fournissait auparavant aux Européens<sup>5</sup>.

Taïwan, face aux menaces d'invasion militaire par la Chine, a menacé de rendre inopérantes les fonderies de semi-conducteurs du leader mondial TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing)<sup>6</sup>.

Partant de la citation de Frank Herbert, comment la France et l'Union européenne se situent-elles dans le contrôle de briques technologiques essentielles pour parvenir à la souveraineté numérique ?

### Une interdépendance assumée mais risquée dans le domaine des semi-conducteurs

Les semi-conducteurs peuvent être comparés à l'Épice du roman de Frank Herbert. Dans « *Dune* », l'Épice permet, entre autres, aux navigateurs de la Guilde spatiale d'améliorer leurs capacités de vision dans l'avenir sans laquelle toute navigation interstellaire longue distance est

---

<sup>2</sup> HERBERT Franck, *Dune*. Volume 2. Robert Laffont, 1980. ISBN : 2-266-02664-X.

<sup>3</sup> LEHOUCQ Roland. « *Dune : de l'épice au pétrole, une pédagogie du réel* ». *La Croix* (en ligne). 12 octobre 2021. Disponible à l'adresse : <https://www.la-croix.com/Sciences-et-ethique/Dune-lepice-petrole-pedagogie-reel-2021-10-12-1201180137>

<sup>4</sup> Paul Atréides prononce également les mots suivants à l'attention des navigateurs de la guilde, grands consommateurs de l'Épice, destinée à la navigation interstellaire « Être en mesure de détruire une chose revient à la contrôler de façon absolue ».

<sup>5</sup> PEZET Jacques. « Est-il vrai que la Russie brûle depuis juin le gaz qu'elle aurait pu livrer à l'Allemagne ». *Libération* (en ligne). 1<sup>er</sup> septembre 2022.

Disponible à l'adresse : [https://www.liberation.fr/checknews/est-il-vrai-que-la-russie-brule-depuis-juin-le-gaz-quelle-aurait-pu-livrer-a-lallemagne-20220901\\_YVVQAWYJTJZDLNCHJ2OV5ONKZ3I/](https://www.liberation.fr/checknews/est-il-vrai-que-la-russie-brule-depuis-juin-le-gaz-quelle-aurait-pu-livrer-a-lallemagne-20220901_YVVQAWYJTJZDLNCHJ2OV5ONKZ3I/)

<sup>6</sup> CRISTIANI Jérôme. « Si Pékin envahit Taïwan, l'économie chinoise sera bloquée, avertit le PDG de TSMC, leader mondial des semi-conducteurs ». *La Tribune* (en ligne). 2 août 2022. Disponible à l'adresse : <https://www.latribune.fr/economie/international/si-la-chine-envahit-taiwan-son-economie-sera-bloquee-avertit-le-pdg-de-tsmc-leader-mondial-des-semi-conducteurs-927517.html>

impossible. Les semi-conducteurs sont eux essentiels aux nouvelles technologies : ordinateurs, téléphonie 5G et bientôt 6G, automobiles électriques et/ou autonomes, ... « Ce sont les hautes technologies qui seront, au cours de ce siècle, le moteur du progrès humain »<sup>7</sup>. Ces composants sont produits à plus de 50 % à Taïwan, et jusqu'à 100 % avec la Corée du Sud pour les plus avancés technologiquement (taille inférieure à 5 nanomètres). Cette production est néanmoins soumise à des aléas climatiques. La sécheresse sur l'île de Taïwan a entraîné des ruptures d'approvisionnement car la fabrication de semi-conducteurs est très consommatrice en eau (150000 tonnes d'eau par jour). La production a également été fortement impactée par la pandémie de Covid-19.

Les conséquences pour l'industrie automobile européenne, par exemple, sommet visible de l'iceberg, sont des millions de véhicules qui n'ont pu être fabriqués (pour l'Allemagne c'est 13 % de son PIB et 1/5<sup>ème</sup> de ses exportations). L'Europe, consciente de son retard et de sa dépendance vis-à-vis des pays asiatiques (Corée du Sud, Japon, Taïwan), a décidé de réagir par un plan « ambitieux »<sup>8</sup>, le *EU Chip Act*, afin de redevenir un leader mondial des semi-conducteurs à l'horizon 2030. Le chemin sera long, car l'Union européenne est dépendante des États-Unis pour le design des puces, avec des acteurs comme Intel, Micron, NVIDIA et AMD, en plus de sa dépendance à l'Asie.

A cette dépendance, l'Union européenne répond par l'interdépendance.

*« Il ne s'agit pas d'être auto-suffisants, mais de construire une Europe « usine », capable de conquérir une part croissante du marché mondial en pleine expansion et exporter nos semi-conducteurs dans le monde. Nous adaptons notre marché intérieur aux réalités de la nouvelle géopolitique des chaînes de valeur. Nous équipons l'Europe des leviers nécessaires pour maintenir les chaînes mondiales ouvertes même en temps de crise. Cela viendra compléter des partenariats internationaux rééquilibrés que nous construirons avec l'ensemble de nos partenaires »*<sup>9</sup>. Néanmoins, comme le souligne Élie Cohen, *« avec des partenaires qui ne jouent pas le jeu ou qui changent de stature, l'interdépendance a pris le visage d'une dépendance »*<sup>10</sup>. Il recommande donc l'autonomie stratégique face à un rival systémique qu'est la Chine, ou un partenaire américain centré sur ses intérêts (*Inflation Reduction Act*). Il faut également anticiper une éventuelle invasion de Taïwan par la Chine. Xi Jinping l'a redit le 16 octobre 2022 lors du congrès du Parti communiste Chinois : *« Nous œuvrerons avec la plus grande sincérité et les plus grands efforts pour une réunification pacifique mais nous ne renoncerons jamais au recours à la force et nous nous réservons la possibilité de prendre toutes les mesures nécessaires »*.

Le leader chinois a néanmoins tenté de rassurer sur ses intentions lors d'un sommet Chine/États-Unis le 14 novembre 2022.

---

<sup>7</sup> DONNET Pierre-Antoine. « TSMC renforce son influence dans le Monde ». Asialyst (en ligne). 19 janvier 2022. Disponible à l'adresse : <https://asialyst.com/fr/2022/01/19/semi-conducteurs-comment-geant-taiwan-tsmc-renforce-influence-monde/>

<sup>8</sup> Bruxelles débloque 43 milliards d'euros pour disposer de 20 % du marché en 2030 alors que dans le même temps TSMC investit à lui seul 36 milliards d'euros pour la seule année 2022.

<sup>9</sup> Déclaration de la commission européenne. EU Chips Act : le plan de l'Europe pour redevenir leader mondial des semi-conducteurs. Bruxelles. 8 février 2022.

Disponible à l'adresse : [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/STATEMENT\\_22\\_891](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/STATEMENT_22_891)

<sup>10</sup> COHEN Elie, *Souveraineté industrielle : Vers un nouveau modèle productif*. Odile Jacob. Février 2022. ISBN 978-2-41500-094-3

L'autre incertitude est relative à l'avenir politique des États-Unis, même si le résultat des *Midterms* n'a pas montré un retournement significatif de l'opinion américaine en faveur du parti Républicain. Pourtant dans le cadre du *EU Chip Act*, l'Union européenne et la France ont fait le choix de financer, à hauteur de plusieurs milliards d'euros, l'installation d'entreprises américaines alors qu'elles disposent de champions européens comme le Franco-Italien *ST Microelectronics*, l'Allemand *Infineon* et le Néerlandais *ASML* (leader mondial de la fabrication de machines de photolithographie<sup>11</sup>). N'est-ce pas un pari risqué ? Joe Biden poursuit une politique « trumpiste » (*America First*<sup>12</sup>) avec un visage humain<sup>13</sup>, n'hésitant pas à priver la Chine de technologies critiques comme les semi-conducteurs<sup>14</sup>.

Elie Cohen le confirme : « *Dans un monde ouvert, la question de « perdre le contrôle » ne se pose pas. Au contraire, elle fait partie des règles. Dans un monde qui se referme, elle se repose* »<sup>15</sup>. L'avenir dira si l'Union européenne n'a pas troqué sa dépendance pour une autre, obérant potentiellement sa stratégie dans divers domaines stratégiques comme l'intelligence artificielle.

### A défaut d'être leader en matière d'intelligence artificielle, l'Union européenne légifère

Revenons ainsi dans l'univers de Frank Herbert et plus précisément dans la genèse de *Dune*, écrite par son fils Brian Herbert et Kevin J. Anderson. Dix mille ans avant les événements relatés dans *Dune*, l'Humanité décide de donner de plus en plus de responsabilités aux « machines intelligentes ». Ces machines qui se sont rassemblées en réseau dénommé OMNIUS, profitent de l'insouciance de leurs maîtres pour s'emparer du pouvoir et les asservir<sup>16</sup>. Il s'ensuit une guerre entre les machines et les humains, période qui porte le nom de « *Djihad butlérien* » dont les humains sortent victorieux et qui mène à un bannissement des ordinateurs et de l'intelligence artificielle<sup>17</sup>. Ces technologies étant interdites, les entités « étatiques » confient les missions « scientifiques » à des organisations supranationales qui tentent d'influencer la vie politique en fonctions de leurs intérêts. Ces écrits futuristes (d'anticipation ?) amènent à nouveau à s'interroger sur la notion de souveraineté.

Dans la première adaptation de l'œuvre de Frank Herbert au cinéma, le brutal dirigeant de la planète Geidi Prime, le baron Vladimir Harkonnen, déclare que « celui qui est maître de l'Épice est maître de l'Univers ». En 2017, un autre Vladimir, dirigeant de l'État Russe, prononce des

---

<sup>11</sup> LOUBIERE Paul. « Semi-conducteurs : Pourquoi le géant européen ASML fait trembler la Chine ». *Challenges* (en ligne). 20 juillet 2022. Disponible à l'adresse : [https://www.challenges.fr/industrie/pourquoi-le-geant-europeen-asml-fait-trembler-pekina\\_821687](https://www.challenges.fr/industrie/pourquoi-le-geant-europeen-asml-fait-trembler-pekina_821687)

<sup>12</sup> Dans le cadre du *Chips and Science Act*, les États-Unis investissent plus de 400 milliards de dollars sur 10 ans pour assurer l'autonomie stratégique en matière de semi-conducteurs.

<sup>13</sup> DUGUA Pierre-Yves. « Commerce et protectionnisme : un Biden « trumpiste à visage humain » attend Macron ». *Le Figaro* (en ligne). 28 octobre 2022. Disponible en ligne : <https://www.lefigaro.fr/conjoncture/un-biden-trumpiste-a-visage-humain-attend-emmanuel-macron-20221128>

<sup>14</sup> GODELUCK Solveig. « Washington prive la Chine de ses puces les plus avancées ». *Les échos* (en ligne). 10 octobre 2022. Disponible à l'adresse : <https://www.lesechos.fr/tech-medias/hightech/washington-prive-la-chine-de-ses-puces-les-plus-avancees-1867515>

<sup>15</sup> COHEN Elie, *Souveraineté industrielle : Vers un nouveau modèle productif*. Odile Jacob. Février 2022. ISBN 978-2-41500-094-3

<sup>16</sup> HERBERT Brian et ANDERSON Kevin J. *Dune, la Genèse. La guerre des Machines*. Robert Laffont. 2003. ISBN 2-221-09948-8

<sup>17</sup> Une des principales règles qui est édictée à l'issue de ce conflit est que « tu ne feras point de machine à l'esprit de l'homme semblable ».

mots similaires au sujet de l'intelligence artificielle : « *Celui qui deviendra le leader dans ce domaine, dominera le monde* »<sup>18</sup>. Parallèlement, la même année, Elon Musk a parlé de l'intelligence artificielle comme d'une menace existentielle pour la civilisation humaine et a plaidé pour la mise en place d'un organe de régulation de celle-ci<sup>19</sup>. Néanmoins, ne sombrons pas dans la psychose dans un sens ou dans l'autre. Nous sommes encore loin des exemples de science-fiction du système *Skynet* (*Terminator*) et de HAL 9000 (l'*Odyssée de l'Espace*). Comme le disait Pierre Curie, « *l'humanité tirera plus de bien que de mal des découvertes nouvelles* ».

L'intelligence artificielle est un enjeu stratégique pour la France et l'Europe qu'il faut traiter de manière dépassionnée car il en va de l'autonomie stratégique de l'Union Européenne. Cela commence par la parfaite compréhension de ces sujets par les dirigeants politiques. Dans son rapport « *les algorithmes font-ils la loi ?* », Aurélie Jean écrit que « *les législateurs et les dirigeants politiques ont le devoir de comprendre, bien plus que le citoyen, la science algorithmique ainsi que ses enjeux technologiques et scientifiques actuels et à venir. Dans cette perspective, ils doivent écouter la recherche publique et privée pour anticiper les prochaines translations de résultats de recherche vers l'industrie, dans le but de construire des politiques publiques ambitieuses, réalistes et bénéfiques pour tous* »<sup>20</sup>. Il y a néanmoins de réelles inquiétudes à avoir concernant la compréhension du sujet par le politique. En effet, dans le cadre de la commission d'enquête de l'Assemblée nationale chargée d'établir les raisons de la perte de souveraineté et d'indépendance énergétique de la France, les parlementaires ont entendu l'ancien haut-commissaire à l'énergie atomique Yves Bréchet. Il souligne « *l'inculture scientifique et technique de notre classe politique* », qui les empêche de cerner toute la complexité des problèmes. Ensuite, le « *rôle des conseillers techniques dans les cabinets ministériels* », qui « *se retrouvent à conseiller, sur des sujets qu'ils ne maîtrisent généralement pas, un ministre qui ne se pose pas de questions* ». La formation des futures élites politiques doit être renforcée, afin « *que les conseillers soient en état de conseiller, qu'ils réapprennent à analyser le fond des dossiers, à challenger les experts qui les leur apportent* », a plaidé l'ingénieur. « *L'analyse scientifique des dossiers est systématiquement ignorée, broyée par les effets de cour au service des gouvernants plutôt que du pays* », juge-t-il <sup>21</sup>.

Dans le cas de l'intelligence artificielle, l'Union européenne pense avant tout à légiférer « *afin de faire face aux risques spécifiques liés aux systèmes d'IA* »<sup>22</sup>. Cette manière de présenter les choses jette le doute et la suspicion sur cette technologie. L'Union européenne met davantage en avant les problèmes d'éthique et de gouvernance de l'intelligence artificielle que son potentiel. L'Union est en train de devenir le champion de la régulation à défaut de l'innovation. « *Dans*

---

<sup>18</sup> Associated Press. « *Putin: Leader in artificial intelligence will rule world* ». *AP Moscow* (en ligne). 1<sup>er</sup> septembre 2017. Disponible à l'adresse : <https://apnews.com/article/technology-russia-business-artificial-intelligence-international-news-bb5628f2a7424a10b3e38b07f4eb90d4>

<sup>19</sup> NORMAND Grégoire. « *Intelligence artificielle : Elon Musk appelle à une régulation de la menace existentielle* ». *La Tribune* (en ligne). 18 juillet 2017. Disponible à l'adresse : <https://www.latribune.fr/technos-medias/intelligence-artificielle-elon-musk-appelle-a-une-regulation-de-la-menace-existentielle-744297.html>

<sup>20</sup> JEAN Aurélie. *Les algorithmes font-ils la loi ?* Editions de l'Observatoire. Octobre 2021. ISBN : 979-10-329-1503-5

<sup>21</sup> LE FIGARO. « *Nucléaire : l'ancien haut-commissaire à l'énergie atomique critique « l'inculture scientifique » des décideurs* ». *Le Figaro* (en ligne). 04 décembre 2022. Disponible à l'adresse : <https://www.lefigaro.fr/conjoncture/nucleaire-l-ancien-haut-commissaire-a-l-energie-atomique-critique-l-inculture-scientifique-des-decideurs-20221204>

<sup>22</sup> Réponse de Thierry Breton au nom de la commission européenne à un question parlementaire.

*l'idéal, il faut tout d'abord veiller à ce que les textes s'inscrivent dans l'objectif encourager l'innovation et de ne surtout pas la freiner inutilement »<sup>23</sup>.*

L'Union européenne assiste en spectateur au duel entre la Chine et les États-Unis qui dépensent davantage que les deux milliards d'euros annoncés par la Commission. La vision à long terme doit changer radicalement afin de sensibiliser le public par une vision positive et non biaisée. La solution pourrait être, comme le propose Jean-Philippe Desbiolles, « d'arrêter d'appeler ça intelligence artificielle » et de parler de « système apprenant »<sup>24</sup>.

A l'instar des semi-conducteurs qui sont essentiels au développement de l'intelligence artificielle, il ne peut y avoir de « système apprenant » sans une grande quantité de données qui doivent être protégées « *parce que derrière ces données il y a des citoyens, mais aussi de la valeur économique* »<sup>25</sup>. Cette protection passe en particulier par le stockage de ces données (*cloud* souverain ou désormais « *cloud* de confiance »). Les évolutions technologiques, telle la cryptographie post-quantique, questionnent ce qui relevait il y a peu du domaine de l'anticipation cinématographique.

### Nos données sont à la merci de pays mal intentionnés

Après l'adaptation cinématographique du roman de Frank Herbert, poursuivons notre épopée de la souveraineté avec un film de 1992 de Phil Alden Robinson, *Les Experts*, où le personnage principal est joué par Robert Redford. Ce personnage se nomme Martin Bishop. Hacker dans sa jeunesse, il est désormais le dirigeant d'une société de cybersécurité spécialisée dans les tests d'intrusion. Contacté par de faux agents de la NSA, il est amené à dérober une « boîte noire » développée par un mathématicien sous le nom de « *SETEC ASTRONOMY* ». Ce nom est une anagramme pour « *TOO MANY SECRETS* ». Il découvre que cette boîte noire permet de casser n'importe quel chiffrement informatique. Les deux faux agents de la NSA travaillent pour un individu souhaitant s'attaquer au système financier international et déstabiliser l'économie mondiale. Martin Bishop finit par réussir à récupérer cette invention et la remettre, préalablement sabotée, à la vraie NSA en les informant qu'ils seraient capables d'espionner n'importe qui avec cet outil. Dans le générique de fin, un communiqué de presse indique que le comité du parti Républicain est en banqueroute et que parallèlement, plusieurs ONG ont reçu des versements généreux d'un donateur anonyme.

Ce récit constitue en quelque sorte une allégorie des enjeux et risques inhérents à la quatrième révolution industrielle imposant de se situer au plus haut de la chaîne alimentaire en matière de stockage des données et de chiffrement de celles-ci afin d'éviter un « apocalypse quantique ». « *Le risque d'une « apocalypse quantique » est réel, prévient Pierre-Yves Jolivet, vice-président chargé des solutions de cyberdéfense chez Thales. « Il faut se préoccuper maintenant de ce risque,*

---

<sup>23</sup> JEAN Aurélie. *Les algorithmes font-ils la loi ?* Editions de l'Observatoire. Octobre 2021. ISBN : 979-10-329-1503-5

<sup>24</sup> DESBIOLLES Jean-Philippe. *L'IA sera ce que tu en feras*. DUNOD. 2019. ISBN : 978-2-10-080400-9

<sup>25</sup> COHEN Elie, *Souveraineté industrielle : Vers un nouveau modèle productif*. Odile Jacob. Février 2022. ISBN 978-2-41500-094-3

car certaines données échangées aujourd'hui seront encore sensibles dans 10 ans et peuvent être capturées maintenant pour être décryptées plus tard », assure-t-il <sup>26</sup>.

En ce qui concerne le stockage des données, la France, consciente des risques, avait dès 2009, lancé un projet de *cloud* souverain face aux menaces de sécurité économiques notamment, posées par notre allié américain ou notre adversaire chinois. Néanmoins ce « Plan Calcul du Cloud » <sup>27</sup> a échoué au bout de quelques années car l'État a été dans l'incapacité de trouver une solution nationale unique et souveraine (*Cloudwatt* et *Numergy*<sup>28</sup>). « *On se demande aussi pourquoi l'État a fait naître deux projets concurrents au-delà de ne vouloir fâcher personne et saupoudrer dans un secteur où mutualiser l'infrastructure sur un maximum d'utilisateurs est ce qui compte avant tout* »<sup>29</sup>.

À la suite de cet échec, l'État a lancé sa stratégie nationale pour le Cloud à la fin de l'année 2021. Le vocabulaire a changé, on parle désormais de Cloud de « confiance » qui est un label pour protéger les données des Français. Ce label a pour ambition de bloquer les législations extraterritoriales par une application exclusive du droit européen. Pourtant, le Cloud de « confiance » ne modifie rien à l'équation. Les leçons du « Plan Calcul du Cloud » n'ont pas été tirées. « Le leader mondial du secteur, Amazon Web Services, et le champion tricolore déchu des services informatiques, Atos, s'allieraient pour proposer une nouvelle solution de Cloud de confiance, après Bleu (Microsoft avec Orange et Capgemini) et S3ns (Google avec Thales) ». Pire, ce cloud de « confiance » ne protégerait pas contre la législation extraterritoriale américaine (*Clarifying Lawful Overseas Use of Data Act* plus connue sous le nom de *Cloud Act*). « *La lecture de la note du cabinet d'avocats Greenberg Traurig pour le compte du ministère néerlandais de la Justice et de la Sécurité, qui a étudié l'applicabilité du Cloud Act américain aux coentreprises binationales de cloud hyperscale, est à cet égard éclairante : toute entité qui dispose d'un « lien suffisant » avec les États-Unis (vente de produits sur le marché américain, recours à des fournisseurs de service aux États-Unis, existence d'un site web accessible depuis les États-Unis, etc.) peut se voir soumise au droit américain...* »<sup>30</sup>. Certes comme le rappelle Guillaume Poupard, ancien directeur général de l'Agence Nationale de la Sécurité des Systèmes d'Information (ANSSI), « *nous ne sommes pas capables de faire du cloud de haut niveau en France aujourd'hui avec des technologies exclusivement françaises développées en France* ». Dans ce cas, pourquoi ne pas soutenir davantage des acteurs spécialisés du *cloud* comme OVH en investissant sur une solution européenne ? GAIA-X ne peut être la solution à cette souveraineté européenne de la donnée car le projet est ouvert à des acteurs américains et chinois. A l'instar des semi-conducteurs, nous choisissons à nouveau une interdépendance risquée.

---

<sup>26</sup> VIROL Gautier. « Comment Thalès a développé un des premiers algorithmes de cryptographie post-quantique reconnus dans le Monde ». *L'Usine Nouvelle* (en ligne). 26 juillet 2022. Disponible à l'adresse : <https://www.usinenouvelle.com/editorial/comment-thales-a-developpe-un-des-premiers-algorithmes-de-cryptographie-post-quantique-reconnus-dans-le-monde.N2029377>

<sup>27</sup> DEBES Florian. « Une page se tourne pour le Cloud souverain français ». *Les Echos* (en ligne). 1<sup>er</sup> août 2019. Disponible à l'adresse : <https://www.lesechos.fr/tech-medias/hightech/une-page-se-tourne-pour-le-cloud-souverain-francais-1118112>

<sup>28</sup> Orange et Thalès pour Cloudwatt. SFR et Bull pour Numergy.

<sup>29</sup> CUVELLIEZ Charles. « Cloud français : les vraies raisons d'un échec ». *La Tribune* (en ligne). 03 novembre 2016. Disponible à l'adresse : <https://www.latribune.fr/opinions/tribunes/cloud-francais-les-vraies-raisons-d-un-echec-610943.html>

<sup>30</sup> TISSIER Guillaume. « Cloud de confiance et souveraineté européenne : la vigilance s'impose ». *La Tribune* (en ligne). 05 novembre 2022. Disponible à l'adresse : <https://www.latribune.fr/opinions/tribunes/cloud-de-confiance-et-souverainete-europeenne-la-vigilance-s-impose-939645.html>

Comme le disait Jacques Delors, « *l'Europe doit être ouverte, pas offerte ; il en va de même de ses données* »<sup>31</sup>.

## Technologies du numérique : recherche talents désespérément

Qu'en est-il par exemple de la technologie quantique ? La France a lancé une stratégie nationale quantique en 2021. Un financement public-privé d'un montant de 1,8 milliards d'euros sur 5 ans a été prévu (dont 1 milliard financé par l'État, notamment via le Programme d'Investissements d'Avenir (PIA)<sup>32</sup>. « *Le plan vise à accélérer le passage de la recherche à l'industrialisation* »<sup>33</sup>. C'est moins que l'Allemagne (plus de 2 milliards d'euros) et cinq fois moins que la Chine ou les États-Unis. Néanmoins cette ambitieuse stratégie quantique semble comprendre tous les ingrédients nécessaires à sa réussite : la recherche fondamentale, un écosystème de *start-up*, du capital-risque ainsi que des fonds publics. Elle anticipe également l'enjeu stratégique de formation des talents comme « *la formation de 5 000 nouveaux talents aux technologies quantiques : techniciens, ingénieurs et docteurs. S'agissant des docteurs, l'objectif est de près de 1 700 jeunes chercheurs, avec un doublement du nombre de thèses par an : 200 nouvelles thèses et 200 post-doctorats par an d'ici 2025* »<sup>34</sup>. En effet, comme l'indique un rapport du cabinet de conseil McKinsey, malgré des financements importants, des inquiétudes persistent sur la difficulté de trouver des talents dans ce domaine<sup>35</sup>.

Avec 11 lauréats de la médaille Fields, et une dizaine de lauréats du prix Nobel de Chimie et du prix Nobel de Physique, la France se classe parmi les premières nations au niveau mondial. La relève est-elle néanmoins assurée pour entrer dans la quatrième révolution industrielle ? L'inquiétude grandit ces dernières années en raison de la baisse importante du niveau des élèves français en mathématiques. « Le rapport portant sur « *la place des mathématiques dans la voie générale du lycée* » commandé par le ministre Jean-Michel Blanquer et remis le 21 mars 2022 le reconnaît sans ambages : « Le niveau moyen de compétences en mathématiques en France est en baisse depuis près de 40 ans » et ce « quel que soit l'outil d'évaluation mobilisé (Timss, Cedre, Lec ou Pisa) »<sup>36</sup>. Le paysage n'est pas plus réjouissant dans le domaine des sciences. Selon une note d'information du ministère de l'éducation nationale et de la jeunesse datant de décembre

---

<sup>31</sup> TISSIER Guillaume. « Cloud de confiance et souveraineté européenne : la vigilance s'impose ». *La Tribune* (en ligne). 05 novembre 2022. Disponible à l'adresse : <https://www.latribune.fr/opinions/tribunes/cloud-de-confiance-et-souverainete-europeenne-la-vigilance-s-impose-939645.html>

<sup>32</sup> <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/strategie-quantique-lancement-d-une-plateforme-nationale-de-calcul-quantique-82954>

<sup>33</sup> COHEN Elie, *Souveraineté industrielle : Vers un nouveau modèle productif*. Odile Jacob. Février 2022. ISBN 978-2-41500-094-3

<sup>34</sup> <https://www.vie-publique.fr/discours/283410-conseil-des-ministres-20012022-strategie-nationale-quantique>

<sup>35</sup> MASIOWSKI, M., MOHR, N., SOLLER, H., ZESKO, M. « Quantum computing funding remains strong, but talent gap raises concern ». *McKinsey Digital* (en ligne). Disponible à l'adresse : <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/quantum-computing-funding-remains-strong-but-talent-gap-raises-concern>

<sup>36</sup> BIASONI Sami. « Pourquoi le niveau des élèves en mathématiques est-il si mauvais en France ». *Le Figaro* (en ligne). 1<sup>er</sup> avril 2022. Disponible à l'adresse : <https://www.lefigaro.fr/vox/societe/pourquoi-le-niveau-des-eleves-en-mathematiques-est-il-si-mauvais-en-france-20220401>

2020, « la France n’amène que 3 % de ses élèves au niveau avancé en sciences alors qu’ils sont en moyenne 10 % dans les pays de l’UE et de l’OCDE »<sup>37</sup>.

Le plan d’investissement France 2030 a une ambition affichée de « développer la compétitivité industrielle et les technologies d’avenir » via plusieurs leviers comme le développement des talents « en construisant les formations de demain ». Alors que le ministre de l’éducation nationale a pris la décision de rendre les mathématiques obligatoires (malgré une pénurie d’enseignants) dans le programme de première générale à partir de la rentrée de septembre 2023, et que certains professeurs pointent du doigt la faiblesse d’activité scientifique sur ordinateurs (seulement 35 % d’élèves de quatrième ayant accès à un ordinateur en salle de sciences contre 54 % pour les pays de l’OCDE), on peut légitimement se poser la question de savoir si le levier de « maîtriser les technologies numériques souveraines et sûres » est réaliste. Il est pourtant essentiel. Enfin, et alors que les besoins en ingénieurs sont toujours plus importants (60 000 par an), la part des filles dans les métiers scientifiques ne cessent de baisser. « Les jeunes filles constituent moins de 40 % des promotions dans l’ensemble des filières scientifiques et seulement 28 % en sciences fondamentales et appliquées »<sup>38</sup>. Cette sous-représentation des femmes dans les métiers scientifiques est préjudiciable car « le rayonnement scientifique de la France au niveau international ne peut pas se faire en se passant de plus de 50% du vivier de talents »<sup>39</sup>.

La France et l’Union européenne sont à la croisée des chemins. La souveraineté numérique pure est impossible, il faudrait pour cela maîtriser l’ensemble de la chaîne de valeur. En revanche, la voie de l’autonomie stratégique est possible. Elle doit être inévitablement à l’échelle européenne<sup>40</sup> tout en méditant sur la phrase du général de Gaulle qui déclarait que « les États n’ont pas d’amis, ils n’ont que des intérêts ».

---

<sup>37</sup> Note d’information n°20-48 de la direction de l’évaluation, de la prospective et de la performance. Décembre 2020. Disponible à l’adresse : <https://www.education.gouv.fr/timss-2019-sciences-au-niveau-de-la-classe-de-quatrieme-les-resultats-de-la-france-en-retrait-l-307821>

<sup>38</sup> JOUINI Elyès. « Les femmes ne s’intéressent pas aux sciences ? Vraiment ? ». *Libération* (en ligne). 10 février 2021. Disponible à l’adresse : [https://www.liberation.fr/idees-et-debats/tribunes/les-femmes-ne-sinteressent-pas-aux-sciences-vraiment-20210210\\_ULZNLP7N25EWJLTLKKWXQKYANU/](https://www.liberation.fr/idees-et-debats/tribunes/les-femmes-ne-sinteressent-pas-aux-sciences-vraiment-20210210_ULZNLP7N25EWJLTLKKWXQKYANU/)

<sup>39</sup> Rédaction JDD. « L’appel des ingénieurs et scientifiques de France face au manque de filles dans les matières scientifiques ». *JDD* (en ligne). 15 novembre 2022. Disponible à l’adresse : <https://www.lejdd.fr/Societe/lappel-des-ingenieurs-et-scientifiques-de-france-face-au-manque-de-filles-dans-les-filieres-scientifiques-4147828>

<sup>40</sup> COHEN Elie, *Souveraineté industrielle : Vers un nouveau modèle productif*. Odile Jacob. Février 2022. ISBN 978-2-41500-094-3

## Introduction

Pour paraphraser le général de Gaulle, nous avons perdu plusieurs batailles dans la « guerre » de la souveraineté numérique : internet et sa gouvernance, moteurs de recherche, réseaux sociaux, *cloud*, etc.

Il y a lieu de ne pas perdre les suivantes. L'Europe et la France développent les parades pour limiter les risques en termes de souveraineté numérique (protection des données, certifications, cloud de confiance, ...).

Se protéger est indispensable mais insuffisant au regard de la souveraineté.

Un grand nombre d'initiatives sont menées, des réglementations sont définies. La littérature est foisonnante sur ces sujets. Aussi, au fil de notre mission, il nous est apparu important de nous focaliser sur ce qui nous semble être encore devant nous.

Quels sont les domaines dans lesquels tout n'est pas joué ?

Quels sont les secteurs dans lesquels l'Europe et la France ont encore la possibilité, voire les atouts, pour viser une position dominante en termes de souveraineté et ne pas subir des transformations induites par d'autres pays ou multinationales ?

Et que faut-il faire dès maintenant pour atteindre ces objectifs ?

Nous avons fait le choix de ne pas traiter l'ensemble des problématiques qui ressortent de la souveraineté numérique, telles que la protection des données, le cloud de confiance, la localisation de l'industrie du *hardware*, le développement de l'IA en tant que technologie, entre autres...

Deux autres sujets peuvent prétendre également répondre à ces ambitions. Tout d'abord, le quantique et, plus précisément, l'ordinateur quantique. La France dispose d'atouts considérables : excellence académique, chercheurs reconnus, *start-up* innovantes et dynamiques, écosystème favorable d'investisseurs. L'utilisation à grande échelle de l'ordinateur quantique est pour bientôt même si cet horizon n'est pas défini aujourd'hui. Les enjeux sont immenses pour notre souveraineté et le développement industriel est devant nous. Il s'agit de ne pas perdre notre avance et d'anticiper les phases suivantes. Nous pointons certains risques qu'il nous semble important de lever pour réussir ces transformations : sous-financement des phases de développement et d'industrialisation, manque de talents, parcours public/privé trop compliqués, appropriation tardive des usages potentiels par les entreprises.

Le second sujet que nous avons traité est l'éthique de l'intelligence artificielle. Dans ce domaine, nous sommes loin d'avoir imaginé toutes les potentialités apportées par ces technologies. Or, les risques sont importants : éthique au regard de nos valeurs, manque de compétences dans les entreprises par exemple. Il est encore possible de les adresser.

Aussi, face à ces risques, nous tentons certaines recommandations ciblées dans ces deux domaines.

## Chapitre 1 : Enjeux, opportunités du quantique

Avant de préciser quels sont les enjeux liés au quantique et les opportunités en termes de souveraineté numérique, il convient de définir le sujet. Il ne s'agit pas de fournir les explications scientifiques, car le sujet est très complexe, mais de permettre aux non-initiés d'en comprendre les fondamentaux et les usages qui pourront en découler. Ensuite, il est important d'aborder les grandes lignes de la feuille de route numérique européenne ainsi que le plan quantique dont la France s'est dotée. Quelles sont les ambitions et les moyens pour les atteindre ?

La France dispose d'atouts indéniables qui sont abordés ici : une recherche académique de très haut niveau, un terreau de *start-up* dynamique et innovant, un écosystème d'investisseurs favorable. Cependant, face à ces atouts des risques existent. Ces risques sont inhérents à toutes les technologies de rupture : financement, compétences, talents, appropriation par les entreprises. Il est nécessaire de les adresser si l'on souhaite conserver notre avance et atteindre nos objectifs en termes de souveraineté numérique dans ce domaine.

Ce sera l'objet de nos recommandations.

### Le quantique, qu'est-ce que c'est ?

Graal de l'informatique, l'ordinateur quantique serait capable de traiter des masses de données gigantesques et de réaliser des opérations dépassant l'imagination.

Mais de quoi s'agit-il ?

Un ordinateur quantique est l'équivalent d'un ordinateur classique, à la différence que ses calculs sont effectués à l'échelle atomique. Il repose sur des propriétés quantiques de la matière : superposition et intrication d'états quantiques. A cette échelle, des phénomènes étranges, totalement contre-intuitifs, se produisent : un objet peut être dans plusieurs états tant qu'on ne l'a pas mesuré (c'est le principe de superposition quantique) et deux objets peuvent s'influencer même en étant séparés d'une grande distance (le principe de l'intrication quantique). De nombreux systèmes (transistors des ordinateurs classiques, afficheurs LCD, imprimantes à laser...) exploitent déjà des effets quantiques dans leur fonctionnement, mais ils utilisent des bits classiques en opposition aux qubits (bits quantiques) utilisés en informatique quantique.

Ainsi, alors que l'ordinateur classique fonctionne avec des « bits », des informations stockées de manière binaire (avec des 0 et des 1), un ordinateur quantique fonctionne avec des « qubits », constitués de superpositions d'états entre 0 et 1. En résumé, au lieu d'explorer un à un chacun des chemins, un ordinateur quantique est capable d'explorer tous les chemins en même temps. Par conséquent, de calculer beaucoup plus rapidement.

L'ordinateur quantique utilise des propriétés de la matière à l'échelle de l'infiniment petit et promet de révolutionner le calcul. Cette technologie apporte la capacité de résoudre en quelques minutes des calculs insolubles aujourd'hui au regard de la vitesse de calcul possible.

Il présente donc un avantage sur les ordinateurs classiques dans quatre types d'applications :

- Le logarithme discret ; Le logarithme discret est un objet mathématique utilisé en cryptologie.
- Les simulations de physique quantique.
- La recherche d'un élément dans une grande liste (Algorithme de Grover). Au lieu de parcourir tous les éléments d'une liste pour trouver celui qui répond le mieux à un critère (par exemple : recherche d'un individu dans l'annuaire à l'aide de son numéro de téléphone), cet algorithme utilise des propriétés de superposition pour que la recherche se fasse de façon globale.
- La résolution de problèmes de prévision de comportement de systèmes ultra-complexes avec de fortes interactions. C'est la théorie de la complexité qui permet de déterminer ce que l'on peut résoudre en ayant une quantité donnée de ressources à disposition (temps, espace mémoire, etc.).

### Quels en sont les usages potentiels ?

Tout le monde s'accorde sur le fait que les problèmes techniques posés pour la réalisation d'ordinateurs quantiques seront résolus à terme. Les divergences sur l'échéance sont plus nombreuses (dans deux ans, dans cinq ans, très probablement avant 2030 ?). De plus, leur avenir commercial immédiat ne semble pas se situer dans le grand public. Le calcul quantique exige peu d'entrées et peu de sorties. Il ne se prête donc a priori qu'aux calculs dont la complexité réside dans la combinatoire. On trouve ces problèmes dans l'ordonnancement et autres calculs de recherche opérationnelle, en bio-informatique, et surtout, en cryptographie.

En premier lieu, il convient de mentionner le domaine de la sécurité numérique qui, de par ses finalités, comportent des risques importants vis-à-vis de la souveraineté numérique. Dans ce domaine, de nouveaux dispositifs qui s'appuient sur la physique quantique pourront permettre aux cyberattaquants de casser ce que nous voyons aujourd'hui comme des méthodes cryptographiques sûres. Ce qui, à son tour, rendrait vulnérables les communications et le stockage des données. Il s'agit d'un usage très spécifique aux risques très élevés pour ceux qui ne maîtriseront pas la technologie. Il pourrait, par exemple, être possible d'accéder à une grande échelle à des données ou des systèmes d'exploitation stratégiques qui aujourd'hui sont considérés comme sécurisés.

Ce type d'ordinateur pourrait « *utiliser l'algorithme de Shor, qui permet de casser le système de cryptographie de type RSA<sup>41</sup>, le système qui sécurise couramment nos communications sur internet* », souligne Nicolas Sangouard, directeur de recherche du CEA à l'Institut de Physique Théorique au CEA-Paris-Saclay.

Des algorithmes s'appuyant sur les caractéristiques des ordinateurs quantiques pour décrypter des données protégées par le très courant code RSA existent déjà. L'ordinateur quantique est donc un enjeu majeur dans la sécurité des communications, et donc de l'économie et des États. Des

---

<sup>41</sup> Le chiffrement RSA (nommé par les initiales de ses trois inventeurs) est un algorithme de cryptographie asymétrique, très utilisé dans le commerce électronique, et plus généralement pour échanger des données confidentielles sur Internet. Cet algorithme a été décrit en 1977 par Ronald Rivest, Adi Shamir et Leonard Adleman.

moyens de cryptage quantique qui sont supposés se substituer au RSA dans l'hypothèse de la création effective d'un ordinateur quantique sont déjà disponibles dans le commerce. Ils nécessitent cependant une mise en place complexe.

Les domaines d'application sont concrets et apporteront des opportunités nombreuses. Les ordinateurs quantiques pourraient être utilisés pour des simulations de mécanique quantique. C'est la raison pour laquelle ils ont été imaginés au départ. L'accélération pourrait être aussi grande qu'avec la factorisation. Ce serait d'un grand bénéfice pratique pour beaucoup de physiciens, car les calculs quantiques deviennent extrêmement complexes dès qu'on sort de quelques cas triviaux.

- L'un des domaines prometteurs est la simulation de nouveaux matériaux. « L'ordinateur quantique pourrait nous permettre de fabriquer un matériau supraconducteur à température ambiante, et donc de transférer de l'électricité sans perte, ce qui serait une avancée incroyable », avance par exemple Nicolas Sangouard (physicien chercheur au CEA), ou encore de concevoir un catalyseur qui permet de convertir l'azote en ammoniac à température ambiante, et donc « de fabriquer des engrais azotés en utilisant très peu d'énergie », une révolution pour l'agriculture.
- Des usages sont d'ores et déjà imaginés dans le domaine de la métrologie, militaire ou non (horloges, synchronisations, mesures du temps, prévisions météorologiques, anticipation des catastrophes naturelles, ...).
- Les apports pour la médecine seront de simuler les systèmes biologiques et les protéines pour comprendre les mécanismes de maladies et développer de nouveaux médicaments, ou améliorer les images médicales en utilisant des techniques quantiques pour augmenter la résolution et la sensibilité.
- Dans la logistique, le quantique permettra de résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire, comme la planification de la production, la planification de la chaîne d'approvisionnement et la planification de la distribution.
- Une amélioration des performances des systèmes d'IA est attendue, notamment dans l'apprentissage automatique dans le cas de réseaux de neurones, ou l'optimisation des paramètres des modèles.

Partout où des calculs complexes sont en jeu, de la finance à l'industrie, l'ordinateur quantique permettra de changer la donne.

### [La feuille de route numérique européenne et le plan quantique français](#)

On voit bien au travers de ces cas d'usage, et pas seulement sur le risque lié aux systèmes de cryptographie, qui est un enjeu stratégique en soit, les motivations des différents États sur ce sujet. Il s'agit d'enjeux stratégiques de souveraineté, de résilience et également d'enjeux économiques considérables.

Précédemment, nous avons vu qu'il n'y a pas de souveraineté numérique sans maîtrise complète de la chaîne numérique (contenant et contenu), ce qui est difficilement atteignable, voire impossible. Le maintien d'une certaine autonomie repose alors sur une position de leadership ou de relations de dépendances assumées. Mais pourra-t-on encore parler de souveraineté ou d'autonomie si d'autres que la France et/ou l'UE maîtrisent les technologies quantiques avant nous ?

Le potentiel de rupture technologique que promettent les applications quantiques dans les secteurs économique, industriel et militaire en fait d'ores et déjà un champ de rivalité dans la compétition stratégique sino-américaine. Fin 2021, les États-Unis ont d'ailleurs inscrit des entreprises chinoises du secteur quantique sur leur liste de contrôle des exportations.

Dans le contexte de compétition technologique internationale et de rivalité croissante entre la Chine et les États-Unis, la France et l'UE doivent ainsi poursuivre et renforcer leurs efforts engagés dans la recherche, afin de ne pas se trouver, à l'avenir tributaire, ou vulnérable à l'égard de technologies américaines ou chinoises.

L'Union européenne a publié une feuille de route visant à renforcer l'autonomie des pays membres dans le numérique. Elle vise, outre un doublement de sa part de production des semi-conducteurs (pour atteindre 20 % de la production mondiale), la création d'un premier ordinateur quantique à l'horizon 2025, pour être « à la pointe des capacités quantiques » en 2030. De quoi réaffirmer la place de l'UE dans cette course, dans laquelle sont lancés une grande partie des pays développés.

Au niveau français, le président de la République Emmanuel Macron a présenté en janvier 2021 sur le plateau de Saclay un plan d'investissement national de 1,8 milliard d'euros dans le quantique, notamment via le Programme d'Investissements d'Avenir (PIA), qui doit mettre la France dans "*les trois premiers mondiaux*" de ces technologies. Avec cet engagement public-privé de 1,8 milliard d'euros sur 5 ans, "*dont un milliard d'euros venant directement de l'État*", la France se dote de la "*clef pour être au moins parmi les trois premiers mondiaux*". Selon l'Élysée, le plan quantique annoncé par le Président fait passer les crédits publics pour le quantique "*de 60 millions d'euros par an à 200 millions par an*", ce qui placerait la France au troisième rang mondial, derrière la Chine et les États-Unis.

Dans le détail, le plan français prévoit de consacrer une enveloppe de près de 800 millions d'euros aux seuls ordinateurs, qu'il s'agisse des premières machines (simulateurs et machines partiellement quantiques, 350 millions d'euros) ou de celles qui apparaîtront à plus long terme (ordinateurs quantiques à part entière, 430 millions d'euros).

Les autres enveloppes seront consacrées aux capteurs (250 millions d'euros), à la cryptographie post-quantique (150 millions d'euros), aux communications quantiques (320 millions d'euros) et aux technologies annexes qui permettent de construire les équipements quantiques (cryogénie par exemple, 300 millions d'euros).

Un an après le lancement de ce plan, une dizaine de projets ont été lancés et une plateforme nationale de calcul quantique a vu le jour. Le rôle de ce Programme et Équipement Prioritaire de Recherche (PEPR), piloté conjointement par le CEA, le CNRS et l'INRIA, est de soutenir « *des activités de recherche au meilleur niveau mondial* » et de « *nourrir les actions plus aval de la stratégie nationale quantique, telle que la plateforme nationale de calcul quantique hybride* ». Cette dernière a été lancée le 4 janvier 2022, avec un budget de 70 millions d'euros pour un objectif de 170 millions au total.

Le but de cette plateforme de calcul hybride est d'interconnecter systèmes classiques et ordinateurs quantiques. Elle devrait « *permettre à nos chercheurs et spécialistes d'accéder aux*

ordinateurs quantiques » et de « renforcer notre écosystème de start-up quantiques », explique Cédric O<sup>42</sup>.

## Comparaison des niveaux d'investissement de différents pays

Cet investissement français de 1,8 milliard d'euros est à mettre au regard des investissements réalisés par d'autres pays. Les États-Unis et la Chine sont en effet en tête des investissements publics dans les technologies quantiques<sup>43</sup>. Les plans de financement des différents pays peuvent aller à plusieurs milliards de dollars, mais sont également complétés par des investissements privés, notamment aux États-Unis, à une échelle très significative (20 milliards d'investissements notamment pour IBM dans les sujets de l'intelligence artificielle et de l'ordinateur quantique notamment<sup>44</sup>).

Les comparaisons entre pays sont cependant difficiles faute de disponibilité des données, de ce qu'elles recouvrent et des montants consacrés au domaine militaire qui ne sont pas divulgués. Néanmoins, la comparaison de quelques ordres de grandeur permet d'apprécier l'ambition du plan français, mais aussi le caractère modéré de son échelle au regard des sommes d'investissements globales.

Aux États-Unis, le plan quantique national (*National Quantum Initiative Act*) a été lancé en 2018 et porte à 1,2 milliard de dollars sur cinq ans les montants, complétés par 860 millions de dollars en 2020 sur deux ans. Cela a donné lieu à la création de douze nouveaux centres de recherche et développement. Le Royaume-Uni a été celui qui a commencé à investir le premier dès 2013 avec 1,2 milliard de livres sterling, financements privés compris, et renouvelés en 2019. Cela a conduit à la création de quatre hubs quantiques thématiques pilotés par des universités.<sup>45</sup> L'Allemagne a lancé son premier plan quantique en 2018 avec 650 millions d'euros complété par 2 milliards d'euros en juin 2020. La Chine a annoncé des investissements colossaux dès 2015. Cependant, il faut noter que les montants annoncés comprennent les investissements dans l'intelligence artificielle et ne se limitent pas au domaine du quantique. La Chine aurait investi un peu moins de deux milliards de dollars en une dizaine d'années, mais son plan au global prévoit jusqu'à 100 milliards de dollars sur cinq ans, pour financer la recherche fondamentale dans l'Intelligence Artificielle, l'informatique haute performance, et les techniques de fabrication avancées<sup>46</sup>.

## Les atouts de la France

Les technologies quantiques ne relèvent donc plus de la science-fiction, et la France est bien positionnée pour profiter de cette révolution qui s'annonce, que ce soit du point de vue de la

---

<sup>42</sup> Ancien secrétaire d'État chargé du Numérique et ancien secrétaire d'État à la Transition numérique et aux Communications électroniques, (2019 à 2022)

<sup>43</sup> [1024\\_18\\_2021\\_43.pdf \(societe-informatique-de-france.fr\)](#) Écosystème quantique en France et dans le monde – Olivier Ezratty

<sup>44</sup> <https://newsroom.ibm.com/2022-10-06-IBM-and-CEO-Arvind-Krishna-Welcome-President-Biden-to-Poughkeepsie-Site,-Company-Plans-to-Invest-20-billion-in-the-Hudson-Valley-Region-Over-10-Years>

<sup>45</sup> Birmingham (capteurs quantiques), Glasgow (imagerie), Oxford (calcul, cryptographie) et York communications)

<sup>46</sup> [https://www.wsj.com/articles/china-targets-ai-chips-among-seven-battlefronts-in-tech-race-with-u-s-11615135881?mod=rss\\_Technology](https://www.wsj.com/articles/china-targets-ai-chips-among-seven-battlefronts-in-tech-race-with-u-s-11615135881?mod=rss_Technology)

recherche académique, des talents, de l'avancement en termes de technologie ou du terreau des start-up.

### *La recherche académique*

La recherche académique tricolore compte plusieurs pôles de stature internationale en quantique et quelques prix Nobel dans le domaine : depuis Louis de Broglie en 1929, Albert Fert en 2007 et Serge Haroche en 2012 et le lauréat de la médaille d'or du CNRS Alain Aspect en 2022 pour ses travaux pionniers sur l'intrication quantique. La France possède donc des compétences reconnues dans le domaine des technologies quantiques et d'une communauté académique dynamique. La recherche publique est organisée autour du CNRS, du CEA et d'INRIA. Plusieurs universités ont créé des instituts du quantique (Institut quantique occitan, institut fédératif quantique azuréen, par exemple). Les dispositifs CIR (Crédit Impôt Recherche), les conventions industrielles de formation (CIFRE) pour aider les entreprises dans le financement des doctorats, les appels à projets, chacun répondant à des finalités différentes, semblent jugés satisfaisants et permettent de faire des liens entre la recherche académique et les entreprises ou laboratoires de recherche.

### *Le terreau des start-up*

Sorties des laboratoires publics, les start-up sont le fruit de cette communauté académique et de la politique qui est portée par les acteurs privés grâce, entre autres, aux travaux de Bpifrance depuis une dizaine d'années. La plupart d'entre elles ont gardé des liens avec leurs laboratoires de recherche d'origine.

« *Je découvre une nouvelle start-up dans le quantique tous les mois* », s'amuse Neil Abroug, le coordinateur de la stratégie quantique française.

Certaines sont spécialisées dans la création d'ordinateurs quantiques, d'autres œuvrent dans le domaine des logiciels ou des capteurs quantiques<sup>47</sup>. Leur succès peut se mesurer aux avancées scientifiques, et aux levées de fond qu'elles ont menées récemment. Leurs avancées technologiques (mise au point du bit quantique par Alice&Bob, fabrication du premier démonstrateur de calculateur quantique opérationnel par Pasqal, par exemple) leur permettent de réussir des levées de fonds auprès d'investisseurs privés et des pouvoirs publics.

De grandes entreprises françaises investissent également directement dans les technologies quantiques à la différence des autres pays européens. C'est notamment le cas de Thales (capteurs), Atos (logiciels, émulateurs, accélérateurs quantiques) ou encore Air Liquide (cryogénie), pour ne citer que ces entreprises.

---

<sup>47</sup> Alice&Bob (qubits de chat), C12 Quantum (qubits de spins d'électrons de nanotubes de carbone), Pasqal (qubits d'atomes froids), Quandela (sources de photons uniques et qubits de photons), Qubits Pharmaceuticals (simulation pour les biotechs), QuantFi (finance), VeriQloud (télécommunications quantiques), Prevision.io (apprentissage automatique quantique), Muquans (micro-gravimètres), ...

## Les investisseurs

Un nombre croissant de ces start-up commence à vendre leur produit et à éveiller l'attention des investisseurs même si les levées de fonds actuelles portent principalement sur le financement des recherches.

Dans l'écosystème du quantique français, Bpifrance joue un rôle important. Cependant, on compte très peu de fonds d'investissement actifs sur ce sujet à l'exception de Quantonation qui est le premier fonds d'investissement français dédié à la physique profonde et aux technologies quantiques. Ce fonds a été créé en 2018 par Charles Beigbeder et est géré par Christophe Jurczak, physicien et ancien doctorant d'Alain Aspect. Il fait partie du « *Quantum Flagship* », un programme européen de 1 milliard d'euros. Ce fonds est aujourd'hui le principal animateur de l'écosystème des entreprises quantiques en France via le Lab Quantique<sup>48</sup> créé conjointement avec Bpifrance pour soutenir l'émergence d'un écosystème quantique mondial.

Disposer d'un fonds d'amorçage français qui investit également à l'international est un véritable atout.

En janvier 2023, le gouvernement a annoncé un programme d'investissement de 500 millions d'euros pour stimuler la création de start-up *deeptech*<sup>49</sup>, globalement dans le domaine des technologies de rupture et pas seulement dans le domaine du quantique, afin d'atteindre les 500 start-up d'ici 2030. Dans la continuité du plan *deeptech* lancé en 2019, l'objectif est d'investir dans des entreprises qui développent des technologies de rupture qui s'imposeront dans un avenir plus ou moins éloigné. Ce financement supplémentaire permettra de soutenir 20 Pôles Universitaires d'Innovation (PUI). Ils s'ajouteront aux cinq sites pilotes existants. Les missions de ces PUI sont d'aider à mieux révéler le potentiel des innovations, gérer les enjeux des brevets, faciliter le partage de données et intensifier les relations entre les chercheurs et le monde économique.

Un facteur clé de succès réside toutefois dans l'appropriation, par la communauté des chercheurs, de ces modes de financement et de tissage de liens entre laboratoires, start-up et entreprises – qui peut entraîner une évolution des demandes adressées à la communauté scientifique dans son ensemble.

## Quels sont les risques ?

L'approche commune à l'innovation et la R&D basée sur les TRL (« *Technology Readiness Level* » ou Niveau de Maturité Technologique), est utile pour analyser la maturité, les risques et les opportunités dans le domaine de l'ordinateur quantique. En particulier elle permettra de guider l'analyse de ce sujet sur les différentes thématiques que sont : les technologies, le financement, les acteurs et les compétences.

Le développement des technologies de rupture, comme de l'innovation en général, suppose l'atteinte de différents paliers, Quatre grandes phases sont intéressantes pour notre analyse :

- La recherche fondamentale – qui aboutit à des idées.

---

<sup>48</sup> [Le Lab Quantique](#)

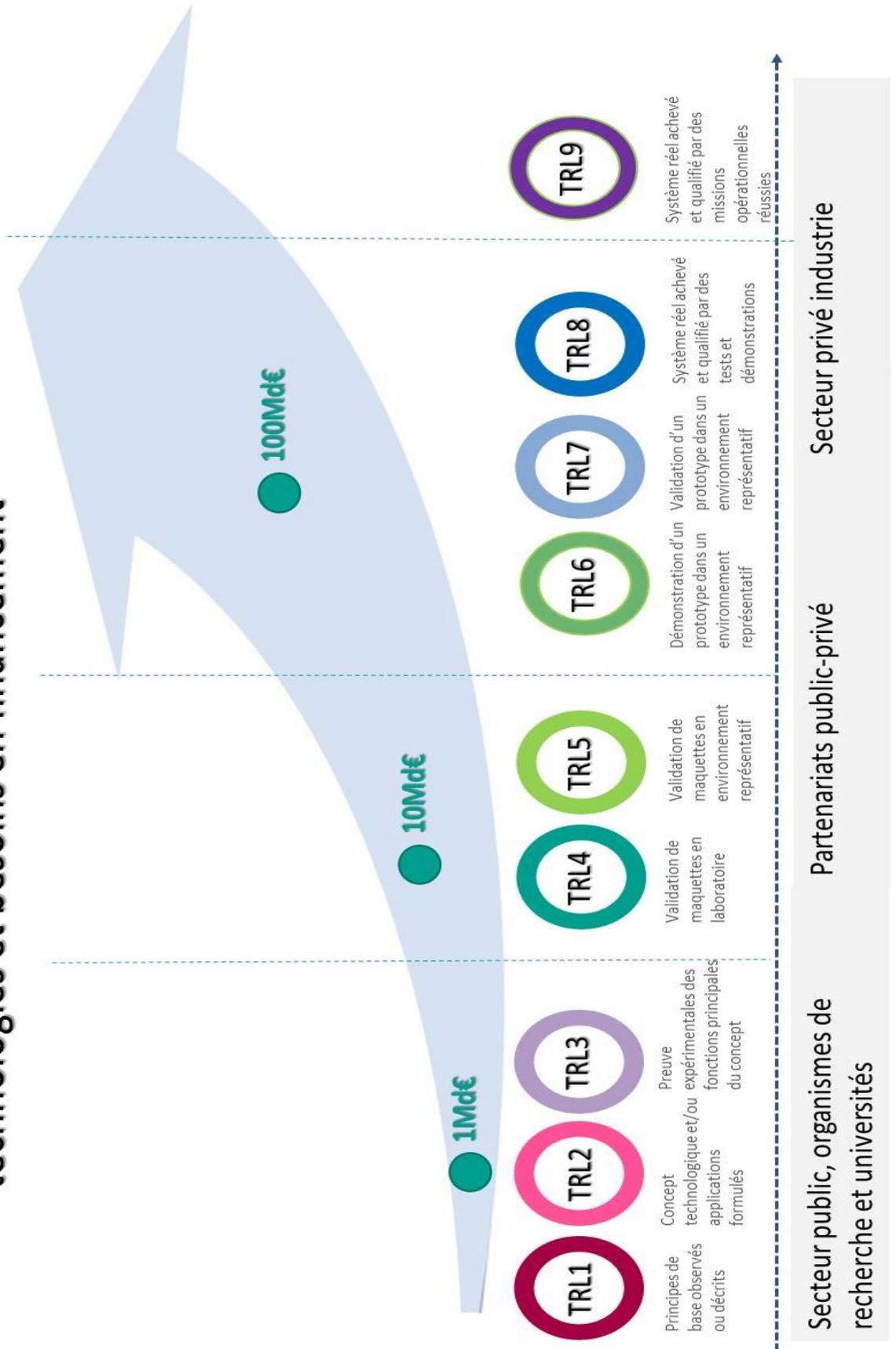
<sup>49</sup> Terme désignant les start-up qui proposent des produits ou des services sur la base d'innovations de rupture

- Le développement de « *Proof of Concept* » – qui aboutit à des prototypes.
- La phase de développement – qui aboutit à la création de structures et un produit fini.
- La phase d'industrialisation – qui permet une production à l'échelle.

Selon chacune de ces phases, les besoins en financement sont croissants. De même, les besoins en compétences sont différents en profils et en volume. Enfin, les acteurs qui interviennent ne sont pas les mêmes selon les phases de recherche, de développement ou pour l'industrialisation des solutions. La phase de passage à l'échelle n'est pas intégrée dans l'analyse par TRL. Cependant, la réussite de cette phase, c'est-à-dire ici l'appropriation par les acteurs industriels français des technologies quantiques, est indispensable pour que les promesses liées à la souveraineté numérique soient tenues. Le succès de la France et de l'Europe dans ce domaine ne sera possible que si les risques suivants sont pris en compte et qu'une réponse y est apportée.

Le schéma ci-contre présente une synthèse de ces points.

# Corrélation entre niveaux de maturité des technologies et besoins en financement



Source : Mission FNEP 2022

## *Risque de sous-financement*

Dans le domaine du quantique, une fois les verrous scientifiques et technologiques levés, le succès de ces entreprises et start-up dépendra du niveau de financement qui sera disponible pour assurer les phases suivantes.

Les prochaines levées de fonds seront donc cruciales pour leur développement. Bpifrance est bien sûr présent, et les entrepreneurs français peuvent également s'appuyer, entre autres, sur « Quantonation ». Mais cela sera-t-il suffisant ?

Transformer les avancées technologiques en réussite commerciale dans la durée dépendra de la rapidité d'exécution et, par conséquent, du niveau de financement. Le risque d'un sous-investissement est donc crucial pour l'avenir des *deeptech* d'autant que plusieurs d'entre elles ont des perspectives commerciales assez lointaines.

*« On est structuré pour brûler 10 millions d'euros par an, alors que nos compétiteurs anglo-saxons sont organisés pour des sommes 10 à 30 fois supérieures »,* indique Théau Peronnin, le président et cofondateur d'Alice & Bob. *« Notre histoire a commencé par la recherche académique, il faut maintenant des acteurs économiques »,* souligne-t-il. Il indique également dans Les Echos : *« En face de nous, Google, IBM, Amazon, Microsoft ou Intel ont des divisions dans le quantique organisées pour brûler de l'ordre d'une centaine de millions de dollars par an. C'est bien d'avoir des idées mais il faut aussi avoir du pétrole ! »*<sup>50</sup>

Pour que la France atteigne ses objectifs et maintienne son autonomie dans le domaine du numérique, les fonds investis devront être accrus de manière très importante. Or, les vecteurs de financement semblent sous-estimés face à ces enjeux. De même, le nombre d'acteurs investisseurs est réduit. L'aide publique semble se focaliser sur l'émergence des start-up. Mais ces dernières auront besoin du privé à court terme pour assurer leur développement spécifiquement pour les phases d'industrialisations à venir. Or, le contexte économique conduit les investisseurs privés à participer à des projets rentables plus rapidement, et donc à négliger les technologies émergentes.

La particularité du secteur, des retours sur investissement à long terme, des risques d'échec élevés, et une intensité capitalistique très importante, en font un secteur à part, proche de ce qui se joue dans la santé avec le bio-tech. En effet, là aussi les investissements nécessaires sont souvent très élevés et les retours sur investissement se réalisent tardivement. Mais dans ce domaine un puissant écosystème existe déjà, bien soutenu par les grandes entreprises pharmaceutiques, pour lesquelles ces sociétés biotechnologiques constituent un des principaux viviers d'innovation.

↳ **Recommandation 1 : Concentrer les financements sur les phases d'industrialisation en sélectionnant quelques champions**

---

<sup>50</sup> « Pourquoi la French Tech peut gagner la bataille de l'ordinateur quantique », Les Echos, 24 Janvier 2023: <https://lesechos.fr/start-up/ecosysteme/pourquoi-la-french-tech-peut-gagner-la-bataille-de-lordinateur-quantique-1899853>

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

### *Risque de manque ou perte des talents*

La question des talents et des compétences est inhérente à toutes les technologies de rupture. C'est un enjeu de premier plan pour l'atteinte des objectifs français. Le plan quantique français prend en compte cet aspect en permettant de financer "une centaine de bourses de thèse et une cinquantaine de contrats postdoctoraux", auxquels pourront venir s'ajouter "une dizaine de Bourses +Jeune Talent+ par an" pour faire venir en France des chercheurs prometteurs.

"Nous avons besoin de garder nos talents, et de garder aussi certaines technologies pour ne pas dépendre en particulier des deux grandes puissances internationales (Chine et USA) qui nous concurrencent", a indiqué Emmanuel Macron.

Ce propos peut apparaître un peu incantatoire, d'autant que la France manque déjà de personnels de haut niveau qualifiés. Ainsi selon Pierre Verzat, président de Syntec-Ingénierie, syndicat qui réunit près de 400 entreprises de prestations de service dans les domaines scientifiques et techniques, la France forme 40.000 ingénieurs par an mais les entreprises pourraient en absorber 50.000 à 60.000. « Résultat, les projets traînent. Ces métiers restent en tension. En 2021, les entreprises de l'ingénierie ont recruté 130.000 personnes dont 15.000 créations de postes »<sup>51</sup>.

La « fuite » des chercheurs et doctorants vers les entreprises privées n'est pas un problème en soit et cette « circulation » est même souhaitable. Cependant, les chercheurs, quittant ainsi les laboratoires de recherche à l'instar de ce qu'il s'est passé dans le domaine de l'IA, abandonnent la recherche fondamentale. A terme, cela peut toutefois être préjudiciable. « Dans quatre à cinq ans, les chercheurs et les maîtres de conférences pourraient venir à manquer », s'inquiète Pascale Senellart, directrice de recherche au CNRS. « La recherche fondamentale nécessaire au saut technologique suivant ne sera pas effectuée. » En conséquence, on peut craindre un appauvrissement du vivier académique qui, outre la recherche fondamentale, est la source des créations des futures start-up.

Il est important de créer un vivier de compétences pertinentes et de l'entretenir ensuite avec la formation continue. Dans le domaine du quantique, ces compétences touchent des domaines divers : physique, ingénierie quantique, ingénierie de système, informatique, télécommunications, cryptographie et également dans les domaines interdisciplinaires (mix physique et informatique, communication, marketing, production, ...). Les volumes nécessaires seront cependant moins importants que pour l'IA<sup>52</sup>.

↳ Recommandation 3 : Définir dès maintenant une stratégie RH du quantique

<sup>51</sup> Le Figaro le 21/12/2022

<sup>52</sup> [Le développement des compétences en technologies quantiques \(oezratty.net\)](https://oezratty.net)

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

*Risque d'appropriation tardive de la part des entreprises*

Le plan quantique français se focalise sur les investissements financiers pour être au moins dans les trois premiers mondiaux. C'est indispensable mais cela n'est pas suffisant pour assurer le maintien de cette position dans la durée. Il ne suffit pas de faire partie des leaders en termes d'innovation, il est également primordial de transformer cette avance en objets concrets industriels et que les entreprises des différents secteurs s'en approprient les usages afin de maintenir leurs positions.

La vitesse d'appropriation par les entreprises est un enjeu clé pour tirer parti des avancées technologiques et assurer leur compétitivité dans la durée au même titre que la transformation digitale ou la prise en compte des enjeux RSE (Responsabilité Sociétale des Entreprises). L'ensemble de ces conditions est nécessaire au maintien de la souveraineté numérique et économique dans le domaine du quantique. En conséquence, cela suppose une mise en mouvement anticipée des entreprises. Or beaucoup d'entre elles ne se projettent pas à court terme. « Le quantique arrivera un jour mais ce n'est pas pour demain ». Certes, même si personne ne sait répondre à la question de la date (certains évoquent un point de bascule entre 2025 et 2030), il est évident que cela révolutionnera le monde du numérique et les usages tant dans le monde de l'industrie que dans les services. Et il est important que les différents acteurs se préparent.

Le quantique dans le domaine de la cryptographie apportent de nouvelles opportunités mais surtout de nouvelles menaces. La cryptographie quantique assure l'invulnérabilité des échanges en toutes circonstances... mais permet également de casser les systèmes de chiffrement classiques, notamment les chiffrements RSA.

Anticipant ces échéances, le milieu de la cryptographie travaille à l'élaboration de nouveaux algorithmes de chiffrement qui ne reposent pas sur des opérations vulnérables aux ordinateurs quantiques. Ce sont ces algorithmes que l'on désigne sous le terme de « cryptographie post-quantique ». Considérant que ces technologies ne sont pas matures, l'ANSSI appelle à une certaine prudence, tout en encourageant les entreprises et les organisations ayant recours au chiffrement à anticiper un possible remplacement des algorithmes dans les années à venir. On ne peut que souligner l'importance pour les secteurs critiques (défense, banques, santé, énergie) de se préparer.

Comme nous l'avons vu précédemment, la cryptographie n'est pas le seul sujet du quantique. De nouveaux usages seront possibles (voir « quels en sont les usages potentiels ? »). Il est nécessaire que les entreprises se préparent en explorant les différents usages qui s'appliqueront à leurs secteurs, leurs processus. Mais comment faire ? Consacrer des ressources sur des sujets potentiels et qui deviendront une réalité à une échéance inconnue n'est pas dans l'ADN des entreprises. Pourtant les entreprises qui ne se lanceront pas rapidement, prendront le risque d'être devancées par leurs concurrents. Cependant, il convient d'être réaliste. A l'instar de la transformation digitale ou de l'IA, seules les grandes entreprises auront les moyens d'anticiper ces ruptures ou le devront par nécessité comme le secteur bancaire. Aussi, il peut être judicieux de miser sur ces entreprises et de recourir à la commande publique afin de favoriser une appropriation et un

développement plus large afin de toucher les entreprises qui ont l'assise financière pour « anticiper la marche ».

↳ Recommandation 5 : Préparer les entreprises à la transformation quantique

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

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

## Chapitre 2 : L'intelligence artificielle et l'éthique

Afin de bien comprendre les enjeux de l'IA par rapport à la souveraineté numérique, il est essentiel de comprendre de quoi il s'agit sans nécessairement rentrer dans les explications scientifiques complexes. C'est la première partie de ce chapitre. Il est également important de comprendre les fondamentaux de l'« IA Act », projet européen de réglementation de l'intelligence artificielle. A l'issue de ces deux premières parties, nous dressons les principaux risques liés aux usages : risque vis-à-vis de l'éthique, risque d'une régulation trop prégnante et freinant l'innovation, risques liés au manque de compétences qualifiées et moins qualifiées dans les entreprises en réponse aux nouveaux métiers émergents.

### L'IA, qu'est-ce que c'est ?

L'intelligence artificielle (IA) est une science interdisciplinaire qui implique un ensemble de logiciels, de logiques, de calculs et de disciplines philosophiques qui ont pour objectif d'amener les ordinateurs à exécuter des fonctions jusqu'alors perçues comme étant propres à l'homme. L'intelligence artificielle inclut aussi bien des techniques simples comme les règles (basées sur des statistiques ou non), l'analyse de données que des techniques plus complexes (*Machine Learning* ou *Deep Learning*). Elle est dans ces cas-là utilisée pour des domaines plus avancés, tels que : la perception du sens dans le langage écrit ou parlé, l'apprentissage, la logique, la reconnaissance des expressions faciales, la création originale, etc...

L'histoire de l'IA remonte à plusieurs décennies, mais les grands pas en avant dans son développement se sont produits au cours des dernières années. Par exemple, en 1997, une intelligence artificielle nommée *Deep Blue* a battu le champion du monde d'échecs Garry Kasparov, ce qui a montré combien les ordinateurs avaient progressé dans la capacité de « raisonnement ».

Il y a plusieurs façons d'apprendre pour les machines. L'une des plus courantes est appelée "apprentissage automatique" (*Machine Learning*), où la machine, alimentée en données, les utilise pour trouver des modèles et faire des prédictions. Cela peut être comparé à un enfant qui apprend à reconnaître les fruits en les examinant et en les comparant les uns aux autres.

Un autre concept important est "l'apprentissage profond" (*Deep Learning*), où la machine, alimentée en données, utilise des réseaux de neurones pour effectuer des tâches complexes, comme la reconnaissance d'images ou la traduction de langues. Cela peut être comparé à la façon dont le cerveau de l'enfant utilise les neurones pour comprendre et stocker les informations.

Il est largement partagé au sein des entreprises et des administrations que ces technologies sont désormais suffisamment matures pour être déployées sur de nombreux processus métiers et dans la plupart des secteurs de l'économie.

## Quels en sont les usages ?

Parmi les plus courants :

- Reconnaissance de la voix et du visage : l'IA peut reconnaître les voix et les visages, ce qui en fait un outil utile pour les systèmes de sécurité, les smartphones, les applications de reconnaissance vocale et de reconnaissance faciale.
- Transports : l'IA est utilisée pour optimiser les itinéraires de conduite, planifier les horaires de transport public, prévoir les conditions de circulation et de stationnement, et pour les voitures autonomes.
- Assurances : l'IA permet d'affiner les évaluations des risques en intégrant un plus grand nombre de critères et d'hypothèses, notamment face aux incertitudes croissantes liées au climat et aux diverses crises.
- Commerce électronique : l'IA est utilisée pour recommander des produits en ligne, pour personnaliser les expériences d'achat, pour prévoir la demande et optimiser les stocks, et pour détecter les fraudes.
- Santé : l'IA est utilisée pour *designer* des médicaments, diagnostiquer des maladies, pour prévoir les réactions aux médicaments, pour suivre les tendances de santé, et pour recommander des traitements.
- Finance : l'IA est utilisée pour effectuer des transactions financières complexes et sécurisées, prévoir les tendances du marché, détecter les fraudes financières, ou encore recommander des investissements.
- Marketing et *retail* : l'IA est utilisée pour personnaliser les campagnes de marketing, pour prédire les tendances de consommation, pour détecter les tendances du marché, et pour recommander des actions de marketing.
- Éducation : dans la personnalisation des plans d'étude, la détection des difficultés d'apprentissage, pour recommander des ressources d'apprentissage et évaluer les performances des étudiants.

Même si la technologie n'est pas complètement nouvelle, elle n'est pas largement déployée dans tous ces secteurs. Son utilisation au service de la performance des entreprises ou de la modernisation de l'action publique peut, selon les domaines, poser de nouvelles questions en termes de souveraineté et d'éthique – dans un contexte où le cadre législatif et réglementaire commence à s'écrire.

## L'IA Act européen

Le 21 avril 2021, la Commission Européenne a rendu public l'« IA Act », le projet de réglementation de l'intelligence artificielle afin d'instaurer un premier cadre légal visant à rendre l'IA digne de confiance, centrée sur l'humain, l'éthique, durable et inclusive.

Les objectifs de l'« IA Act » sont les suivants :

- Veiller à ce que les systèmes d'IA mis sur le marché européen soient sûrs et respectent les droits fondamentaux des citoyens et les valeurs de l'UE,

- Renforcer la gouvernance et l'application effective de la législation existante sur les droits fondamentaux et les exigences de sécurité applicables aux systèmes d'IA,
- Garantir la sécurité juridique pour faciliter l'investissement et l'innovation dans l'IA,
- Faciliter le développement d'un marché unique pour les applications d'IA légales, sûres et dignes de confiance et prévenir la fragmentation du marché.

Ce règlement est composé de règles proportionnées basées sur une analyse des risques classés en catégories (non-acceptables, élevés ou non élevés) et de l'acteur concerné (fournisseur, distributeur, utilisateur, etc.). Une liste des systèmes d'IA à risque élevé est définie et mise à jour par la Communauté Européenne pour refléter l'évolution rapide des technologies. A titre d'illustration, figurent dans cette liste les systèmes d'identification biométrique et de catégorisation des personnes physiques, les systèmes de gestion et exploitation des infrastructures critiques ou l'éducation et la formation professionnelle.

Les autorités nationales peuvent mettre en place des « *regulatory sandboxes* » (environnements contrôlés de type bac à sable de test) qui établissent un environnement contrôlé pour tester les technologies innovantes pendant une durée limitée. Les PME et les start-up peuvent y avoir un accès prioritaire.

Des amendes pouvant atteindre jusqu'à 2, 4 ou 6% du CA annuel mondial des entreprises concernées, en fonction des violations constatées sont prévues, les États membres étant responsables de la conception de leur régime de sanctions. Un Comité européen de l'intelligence artificielle est institué en tant qu'autorité de contrôle. Chaque niveau national est libre d'organiser ses instances de contrôle.

Le règlement crée un marquage CE pour les systèmes d'IA à risque élevé. Ce marquage est obligatoire et est fourni par des organismes désignés. Il existe également une obligation d'enregistrer les systèmes autonomes d'IA à risque élevé dans une base de données européenne.

Il est important de noter que début 2023, le comité européen de l'IA n'est pas créé.

Au niveau français, le rapport du Conseil d'État d'août 2022 prône l'utilisation de l'intelligence artificielle pour améliorer la qualité du service public rendu aux citoyens. La stratégie proposée devra créer les conditions de la confiance et doter la France des ressources et de la gouvernance à la hauteur de ses ambitions. Le rapport 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* ». Pour le Conseil d'État, il serait « *naturel* » de désigner la CNIL comme autorité nationale de contrôle des systèmes d'intelligence artificielle, en charge de l'application du règlement européen sur l'IA.

Un point d'attention peut être mentionné sur la déclinaison au niveau national de la politique de contrôle des systèmes d'IA. Ainsi, la CNIL a annoncé la création du Service de l'Intelligence Artificielle, avec pour objectif de développer son expertise sur le sujet en faisant référence explicite à l'« *IA Act* ». <sup>53</sup> Plus précisément, il s'agit de veiller à concilier régulation et innovation dans une perspective de développement des entreprises qui investissent sur l'IA. A défaut, la perte de compétitivité économique des entreprises sera inévitable.

---

<sup>53</sup> <https://www.cnil.fr/fr/creation-dun-service-de-lintelligence-artificielle-la-cnil-et-lancement-des-travaux-sur-les-bases-de>

En outre, une proposition de directive émanant de la Commission prévoit d'établir deux garanties pour instaurer la confiance dans les Systèmes d'IA (SIA) en Europe :

- Présomption de causalité : les victimes d'erreurs de SIA n'ont qu'à démontrer qu'il existe un lien raisonnablement probable entre l'erreur et une cassure dans les performances d'un système pour prouver la faute probable du SIA. Autrement dit, elle dispense les victimes de l'obligation de prouver la causalité entre l'erreur de SIA et le dommage subi.
- Accès aux éléments de preuve : les victimes peuvent demander à la juridiction compétente la divulgation d'informations pour identifier la personne responsable et la racine du problème. Ces règles s'appliqueraient à tous les SIA, sans distinction, même ceux considérés à haut risque. Ces garanties permettent de faciliter la recherche de la personne responsable et la capacité à demander des comptes si l'on s'estime victime d'un tel système. Ainsi, cela permet de garantir une plus grande transparence et de protéger les utilisateurs en cas de dommage causé par un SIA, tout en permettant aux victimes (ou un tiers autorisé) d'accéder aux informations protégées comme celles soumises au secret professionnel ou des affaires, pour identifier la personne responsable et la racine du problème.

En conclusion, ces garanties innovent en créant des outils pour faciliter l'identification de la responsabilité et la protection des utilisateurs en cas de dommages causés par les SIA.

### Quels sont les risques : IA vs éthique ?

Si l'on considère les usages mentionnés précédemment, les risques principaux au regard de l'éthique et donc de la souveraineté numérique sont les suivants :

#### *Le risque lié au manque de confiance*

L'objectif général de l'IA est d'apporter un progrès pour la société dans différents domaines comme l'éducation, la justice ou la santé, par exemple. Cependant, même si l'intérêt vis-à-vis de l'IA est croissant, une méfiance apparaît au fur et à mesure que les cas d'usage se multiplient. Cette méfiance peut sembler justifiée même à l'égard d'algorithmes a priori bien intentionnés qui pourraient provoquer plus de dégâts qu'apporter de progrès.

En effet, il semble admis que, par exemple, l'IA est de nature à renforcer les conditions sociales existantes et à réduire le choix des possibles en matière de transformation ou de réforme en imposant des logiques algorithmiques aux dépens d'autres.

La perception de ces risques est renforcée par un manque de transparence et d'explicabilité des Systèmes d'IA (données et algorithmes) liée en partie à la complexité technique qui génère un effet « boîte noire » et à la difficulté à trouver les moyens d'y pallier en évitant une régulation qui freinerait l'innovation.

L'*Open Source* peut être un moyen d'apporter de la transparence au niveau des algorithmes à l'instar de solutions privées et hermétiques. Cependant, il est important de considérer que les données utilisées pour entraîner ces algorithmes jouent un rôle majeur et peuvent introduire des biais. Ainsi, même si un algorithme est *Open Source*, il peut demeurer biaisé en fonction des données d'apprentissage. Une approche complémentaire consisterait à développer des

méthodologies permettant aux systèmes d'IA de garantir la prise en compte des biais potentiels et d'assurer ainsi une utilisation plus éthique et responsable de ces technologies.

↳ Recommandation 8 : Définir et déployer une stratégie *Open Source*

### *Le risque lié aux données*

Les algorithmes d'IA sont nourris par des données, et par l'apprentissage encadré par ses créateurs. Aurélie Jean le rappelle, « *les algorithmes ne sont ni sexistes, ni racistes, ni coupables d'une quelconque faute ; les seuls responsables sont ceux qui les conçoivent et qui les alimentent de leurs données par leurs usages parfois biaisés* »<sup>54</sup>. Certes ! La question est donc d'être en capacité de démontrer qu'à tout moment du processus, de la collecte des données à l'utilisation de l'algorithme, les risques de biais peuvent être évités. En effet, les biais peuvent être introduits dès la constitution des jeux de données en en restreignant le périmètre par exemple. Prenons pour illustration, l'exemple d'un algorithme de sélection des candidats pour une école. Si les données ne sont constituées que des données historiques des étudiants ayant réussi à obtenir leur diplôme, l'algorithme ne sélectionnera que les candidats de profils similaires. L'algorithme reproduira l'existant de manière implicite, pourra aggraver des inégalités ou et réduira le champ des possibles.

Les biais peuvent donc être introduits dans la constitution même du jeu de données volontairement ou non. Mais pas seulement. En l'absence de documentation précise sur les jeux de données (son périmètre, ce qu'il contient, ce qu'il ne contient pas...), le processus de collecte de ces données, la finalité de l'algorithme et ses limites, des biais peuvent être également introduits par les utilisateurs eux-mêmes s'ils ne sont pas suffisamment informés. En synthèse, il n'est pas nécessaire d'être malveillant que ce soit au moment de la constitution des données, dans l'élaboration de l'algorithme ou dans l'utilisation de celui-ci pour être confronté aux conséquences liées aux biais. De plus, les créateurs de jeux de données ne peuvent anticiper tous les biais possibles ou les risques potentiels des algorithmes. Les facteurs sont complexes et nécessitent une approche contextuelle très large touchant de nombreux domaines comme l'anthropologie, la sociologie, la géographie, les sciences économiques, pour n'en citer que certains.

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

### *Le risque de la régulation à outrance*

Le péché récurrent du régulateur est de bloquer l'innovation en voulant protéger à outrance. Dans le cadre des technologies liées à l'IA, on retrouve alors les thèmes qui faisaient florès au moment du développement de la génomique, et qui a joué sur l'avance prise par certains acteurs américains dans ce domaine, ou les régulateurs ont empêché la recherche d'avancer par crainte

---

<sup>54</sup> JEAN Aurélie. *Les algorithmes font-ils la loi ?* Editions de l'Observatoire. Octobre 2021. ISBN : 979-10-329-1503-5

de déplaire à certains cultes. Cela pousse à considérer la mixité des profils pour prendre des décisions dans ce domaine.

Ce risque est pris en compte dans la recommandation 9 explicitée dans la dernière partie de l'ouvrage.

*Le risque lié au manque de compétences et de développement des futurs « travailleurs de l'IA » en entreprise*

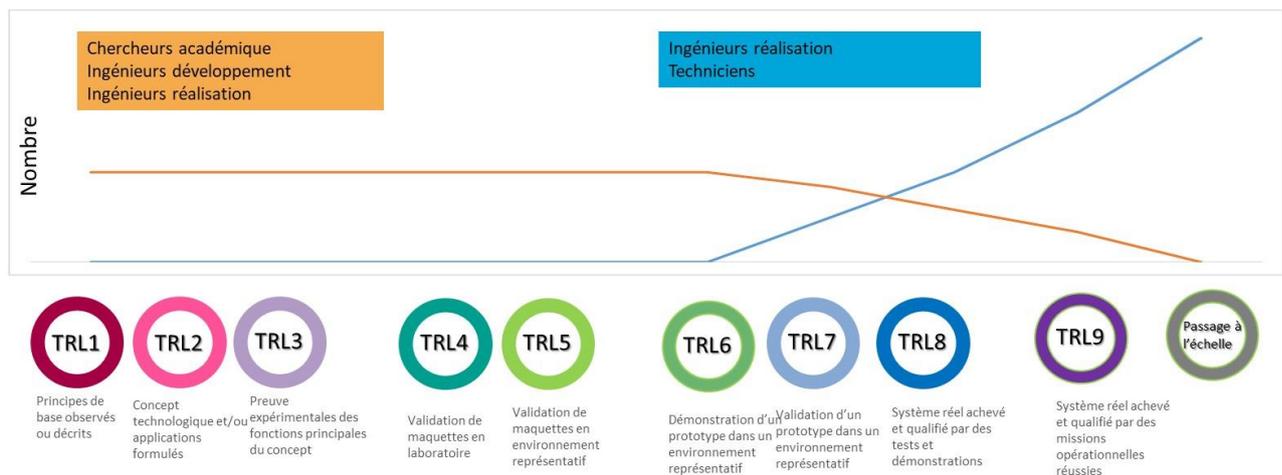
Aujourd'hui les entreprises qui investissent dans les technologies ou usages de l'IA se basent sur des talents de haut niveau (bac +5 à Doctorat). Le développement des usages de l'IA fait cependant appel à des besoins en compétences de différents niveaux, de ressources considérées comme moins qualifiées. Dans son livre « L'IA sera ce que tu en feras », Jean-Philippe Desbiolles insiste sur le fait que « le développement des nouveaux métiers engendre un besoin de compétences variées, au-delà des seuls data scientists ». Il ajoute que « dans le contexte des

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

sciences cognitives, naît la nécessité d'intégrer dans les équipes des profils fortement pluridisciplinaires, en termes d'approche métier, méthodologique, technologique mais également en matière de compétences linguistiques ou psychologiques »<sup>55</sup>.

Un besoin croissant en ressources qualifiées comme moins qualifiées, va rapidement émerger. « La guerre des talents a démarré »<sup>56</sup>.

Le graphique ci-dessous présente très schématiquement l'évolution des besoins en compétences (profils et volumes) en fonction de la phase de maturité des technologies.



Source : Mission FNEP 2022

<sup>55</sup> DESBIOLLES Jean-Philippe. *L'IA sera ce que tu en feras*. DUNOD. 2019. ISBN : 978-2-10-080400-9

<sup>56</sup> DESBIOLLES Jean-Philippe. *L'IA sera ce que tu en feras*. DUNOD. 2019. ISBN : 978-2-10-080400-9

## En conclusion

Il ressort de l'analyse des enjeux liés au futur développement des technologies quantiques qu'il existe de réelles opportunités pour la France pour asseoir sa souveraineté numérique. La France dispose en effet de réels atouts que ce soit l'excellence académique, le dynamisme de l'innovation via ses start-up ou l'écosystème de financement favorable. Il est cependant nécessaire d'enclencher dès maintenant les actions qui permettront de conserver le temps d'avance et de concrétiser durablement ces atouts dans les prochaines phases de développement.

Si l'on considère la question de l'intelligence artificielle au regard de l'éthique, les risques sont immenses : risques liés au manque de transparence ou d'explicabilité accrus par la complexité des algorithmes, risques liés aux biais et aux données et risques liés au manque de compétences obérant l'appropriation de ces technologies par les entreprises et les privant ainsi des bénéfices technologiques associés. Les solutions ne sont pas et ne doivent pas être uniquement techniques. Il s'agit d'être en mesure de garantir que cela apporte un réel progrès pour la société, pour l'économie. Là aussi, des actions doivent être menées dès maintenant pour pallier ces risques et répondre à ces questions en toute transparence.

## 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

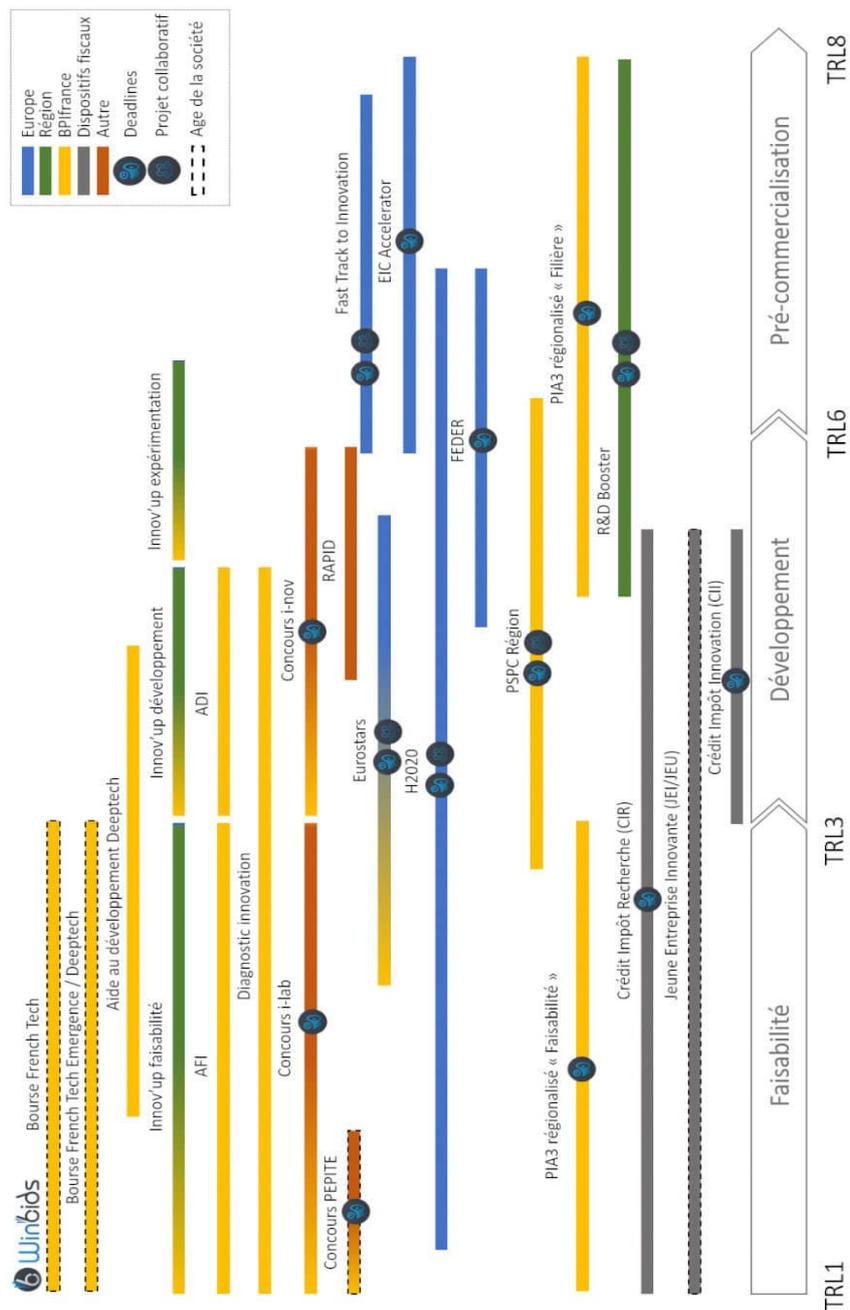
Dans le financement de l'innovation issue des *deeptech* (technologies numériques de rupture issue des laboratoires de recherche scientifique), la maturation d'une technologie, de la recherche fondamentale jusqu'à l'industrialisation, requiert des financements de plus en plus importants à chaque phase 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* »<sup>57</sup>, 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 développement<sup>58</sup> (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.

---

<sup>57</sup> 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>

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



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

Par maturité de l'innovation<sup>59</sup>

<sup>59</sup> <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'Énergie, 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'Investissement<sup>60</sup>, 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

---

<sup>60</sup> 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*<sup>61</sup> », 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 »<sup>62</sup>. 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* »<sup>63</sup>. 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* »<sup>64</sup>. 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* »<sup>65</sup>. 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

---

<sup>61</sup> État de l'informatique quantique : construire une économie quantique

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

<sup>63</sup> 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>

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

<sup>65</sup> 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* »<sup>66</sup>.

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* »<sup>67</sup>. 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* »<sup>68</sup>.

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 coréen<sup>69</sup>. 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

---

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

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

<sup>68</sup> 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/>

<sup>69</sup> 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](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 »<sup>70</sup>. 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 »<sup>71</sup>. 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 »<sup>72</sup>. 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 »<sup>73</sup>.

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

---

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

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

<sup>72</sup> 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/>

<sup>73</sup> 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 DARPA<sup>74</sup>, 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*<sup>75</sup>) 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 data<sup>76</sup>, 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.

---

<sup>74</sup> 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...

<sup>75</sup> To compute : calculer

<sup>76</sup> 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*<sup>77</sup>

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

---

<sup>77</sup> 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*<sup>78</sup>, 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'Education 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

---

<sup>78</sup> <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 »<sup>79</sup>*

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 »<sup>80</sup>. 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 représentant 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 ?* »<sup>81</sup>

---

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

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

<sup>81</sup> <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 »<sup>82</sup> 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

---

<sup>82</sup> <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 »<sup>83</sup>.*

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* »<sup>84</sup>. Une autre expression intéressante est à trouver Outre-Manche. *The Institution of Engineering and Technology* parle de « *développement professionnel continu* »<sup>85</sup>. 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* »<sup>86</sup>.

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 »<sup>87</sup>.

La création, le 1<sup>er</sup> 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

---

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

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

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

<sup>86</sup> 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](https://labordoc.ilo.org/discovery/fulldisplay/alma994866463402676/41ILO_INST:41ILO_V2)

<sup>87</sup> 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 »<sup>88</sup>. 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.

---

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

## Annexe

### Liste des personnes rencontrées

#### *France*

**Mathieu WEILL**- Chef du service de l'économie numérique, DGEntreprises, Ministère de l'Economie. M. Weill est depuis septembre 2022 Directeur du numérique au ministère de l'Intérieur et des Outre-mer

**Patrick PERROT** – Général de brigade, coordonnateur pour l'intelligence artificielle au service de la transformation, Gendarmerie Nationale

**David SADEK** - VP, Recherche, Technologie et Innovation, Intelligence Artificielle et Data processing, Thales

**Bruno ESTEVE** – Expert management de crise & continuité d'activité, Groupe Renault

**Lucian BALEA** -Directeur programme *Open Source*, RTE

**Gabriel BARREUX** - Directeur R&D, RTE

**Xavier CARTON** - Directeur SSI, RTE

**Bernard CARDEBAT**, Directeur cybersécurité, ENEDIS

**Jean-François MONTAGNE**, responsable SSI, ENEDIS

**Pierre ROUCHON**, Professeur, Centre Automatique et Systèmes, Mines Paris - PSL Research University

**Françoise PRETEUX**, Directrice déléguée à la Recherche et au développement économique, Adjointe à la Directrice générale, Institut Mines-Télécom

**Théo PERONNIN**, CEO et cofondateur d'Alice & Bob

**Nicolas LE ROUX**, chercheur universitaire, Faculté des arts et des sciences - Département d'informatique et de recherche opérationnelle, Université de Montréal

#### *Royaume-Uni*

**Carly KIND**, Director, Ada Lovelace Institute, United Kingdom

**Simon EDWARDS**, The Institution of Engineering and Technology (IET)

**Katie INGREY**, The Institution of Engineering and Technology (IET)

**Daniel CANTY**, The Institution of Engineering and Technology (IET)

**Leonie WHITE**, Compound Semiconductor Applications CATAPULT

## *Allemagne*

**Dr Maximilian Lukas Wehage**, Senior Officer, Federal Ministry of the Interior and Community, Germany

**Christian Erb**, Federal Ministry of the Interior and Community, Germany

**Dr iur. Udo Moewes**, Government Director, Federal Ministry of the Interior and Community, Germany

**Olaf Götz**, cyber sécurité internationale et recherche en cyber sécurité), Federal Ministry of the Interior and Community, Germany

**Heiko Pletat**, cyber sécurité au sein de l'économie et de la société, Federal Ministry of the Interior and Community, Germany

**Hannelore Jorgowitz**, cyber sécurité au sein de l'administration fédérale, Federal Ministry of the Interior and Community, Germany

**Vera Sikes**, direction chargée des compétences techniques à l'Office fédéral de la sécurité des technologies de l'information

**Andreas Hartl**, Head of Division, Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action, Germany

**Katja Verena Koennecke**, cyber sécurité des autorités de sécurité, Federal Ministry of the Interior and Community, Germany

**Lara Wiengarten**, coordination interministérielle, Federal Ministry of the Interior and Community, Germany

## *Finlande*

**Ragnar Ingibergsson**, Senior analyst, European Center of Excellence for Countering Hybrid Threats, Finland

**Anna Aurora Wennäkoski**, senior specialist, Data Business Unit, Ministry of Transport and Communications, Finland

**Janne Peltola**, Ministerial Adviser, Innovations and Enterprise Financing, Ministry of Economic Affairs and Employment, Finland

**Jenni Tapio**, Chief specialist, Space law, Ministry of Economic Affairs and Employment, Finland

**Jaakko Wallenius**, Vice President, Chief Security Officer, Elisa, Finland

**Kari Leino**, Advisor, Ecosystems, Digitalization, Business Finland

**Mikael RYLANDER**, VP Technology Leadership, Nokia

**Tuure-Eerik NIEMI**, International Relations Manager, Nokia

## *Estonie*

**Maarja SUISTE**, Sales Consultant, Cybernetica

**Ly PUUSAAR**, Marketing specialist, Cybernetica

**Sigrit SIHT**, Burokratt project

**Veronika MUGRA**, Burokratt project

**Rainer TÜRNER**, Burokratt project

**Kaupo LAAGRIKÜLL**, Burokratt project

**Allan DOBRŌŠ**, E-Estonia project

**Matthieu DEMENOIS**, lieutenant-colonel, Education & Training Branch Head, CCDCOE

## Remerciements

**Outi ALAPEKKALA**, Chargée d'études au service économique d'Helsinki, Direction générale du Trésor

**Ludovic DROUIN, PhD**, Attaché scientifique à l'ambassade de France de Grande-Bretagne

**Yann PONDAVEN**, Chef de service économique de l'ambassade de France en Estonie

**Patricia POULIQUEN**, Chef de service économique d'Helsinki, Direction générale du Trésor

**Danae DI SALVO**, Institut Français d'Estonie, Ambassade de France en Estonie

**Anaïs SCHAAF**, Fonctionnaire de liaison auprès du Ministère fédéral de l'intérieur, Service de sécurité intérieure de l'ambassade de France à Berlin