



**MINISTÈRES
TRANSITION ÉCOLOGIQUE
COHÉSION DES TERRITOIRES
TRANSITION ÉNERGÉTIQUE
MER**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

**ÉPREUVE 2
CONCOURS D'ÉLÈVES STAGIAIRES
ADMINISTRATEURS
DES AFFAIRES MARITIMES**
(article 6.1 du décret statutaire n°2012-1546 modifié)

**ÉPREUVE 3
CONCOURS D'ÉLÈVES ADMINISTRATEURS
DES AFFAIRES MARITIMES**
(articles 4.1 et 4.2 du décret statutaire n°2012-1546 modifié)

SESSION 2024

NOTE DE SYNTHÈSE

(DURÉE : 5 HEURES – COEFFICIENT : 6)

**2024-AAM-61-60-Note de synthèse
2024-AAM-41-42-60-Note de synthèse**

Epreuve écrite d'admissibilité :

La rédaction d'une note à partir d'un dossier, permettant de vérifier l'aptitude du candidat à faire l'analyse et la synthèse d'un sujet, ses qualités de rédaction et de présentation

Toute note inférieure à 8 sur 20 est éliminatoire.

Ce document comporte 68 pages y compris celle-ci.

À LIRE ATTENTIVEMENT AVANT DE TRAITER LE SUJET

- Les candidats doivent remplir en totalité le bandeau situé en haut de chacune de leurs feuilles de composition (code concours, code épreuve, spécialité, y compris le numéro d'inscription communiqué dans leur convocation).
- L'usage de la calculatrice, d'un dictionnaire, de tout autre document est interdit.
- Les candidats ne doivent pas faire de marge sur leur copie.
- Les candidats ne doivent faire apparaître aucun signe distinctif dans la copie, ni leur nom ou un nom fictif, ni signature ou paraphe.
- Pour rédiger, seul l'usage d'un stylo à bille noir ou bleu est autorisé. L'utilisation d'une autre couleur, pour écrire ou souligner, pouvant être considérée comme un signe distinctif proscrit.
- Aucun liquide blanc ni ruban correcteur ne doit être employé, cela peut empêcher la numérisation de la copie et par conséquent sa correction. Les ratures propres à la règle sont préférables.
- Les feuilles de brouillon ou tout autre document ne sont pas considérés comme faisant partie de la copie et ne feront pas l'objet d'une correction.

Le non-respect des règles ci-dessus peut entraîner une sanction par le jury

Note de synthèse

A partir des documents joints (65 pages), vous rédigerez une note sur « la nouvelle révolution quantique » à destination des décideurs publics.

Votre note ne devra pas dépasser 8 pages soit 2 copies doubles.

Liste des documents

DOCUMENT 1	Introduction de « L'incertaine révolution numérique » André Vitalis - 2016	Pages 1 à 5 (5 pages)
DOCUMENT 2	Décision du Conseil national de l'Ordre des masseurs kinésithérapeutes – 15 décembre 2017	Pages 6 à 11 (6 pages)
DOCUMENT 3	Article du journal Les Echos : « l'ordinateur quantique : quel enjeu pour les entreprises ? » 4 janvier 2024	Pages 12 à 14 (2 pages)
DOCUMENT 4	Site Gouvernement.fr : France 2030 : « Des résultats concrets pour les deux ans de la stratégie quantique » - mars 2023	Pages 14 à 16 (3 pages)
DOCUMENT 5	Note n°13 de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques – mars 2019	Pages 17 à 23 (7 pages)
DOCUMENT 6	Site de l'Université de Sherbrooke : « Révolution quantique : notre société est-elle prête? » janvier 2023	Pages 24 à 26 (3 pages)
DOCUMENT 7	Communiqué de presse de l'Institut français pour l'exploitation des ressources de la mer : « L'Ifremer modernise Datarmor, le super-calculateur dédié aux données scientifiques sur l'océan en France »	Pages 27 à 29 (3 pages)
DOCUMENT 8	Site de la représentation de la Commission européenne en France : « L'UE déploie la première technologie quantique sur six sites à travers l'Europe » - 4 octobre 2022	Pages 30 à 32 (3 pages)
DOCUMENT 9	Site de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire « L'informatique quantique au service de la société » - octobre 2023	Pages 33 à 35 (3 pages)
DOCUMENT 10	Les cahiers de la Revue de la Défense Nationale « Les enjeux de la physique quantique et les ruptures à anticiper » Colonel Desjardins - 2020	Pages 36 à 51 (16 pages)
DOCUMENT 11	Site La grande conversation, revue de Terra Nova : « A quoi les technologies quantiques peuvent-elles servir ? » 16 mai 2023	Pages 52 à 62 (11 pages)
DOCUMENT 12	Rapport de mission de la commission des affaires juridiques du Parlement européen en Estonie. 20 juin 2022	Pages 63 à 65 3 pages

L'incertaine révolution numérique

André Vitalis - 2016

Introduction

« Quand on ne sait pas où l'on va,
il vaut mieux savoir d'où l'on vient »
Proverbe

L'expression « révolution numérique » s'est imposée à la fin des années 2000 quand des milliards de personnes ont utilisé des smartphones pour se connecter à Internet. Après les gros ordinateurs des années 1960-1970, la micro-informatique des années 1980, ces appareils de la taille d'un jeu de cartes, ont fait entrer la plus grande partie de la population dans le monde numérique du traitement automatique et de la transmission instantanée de l'information.

La plupart des discours sur cette révolution numérique la présente comme la révolution industrielle de notre temps qui marque une nouvelle étape du progrès technique et apporte, dans tous les domaines, des changements majeurs. Des divergences commencent à apparaître quant à l'évaluation des effets de ces changements. En vertu d'une sorte de déterminisme technique bienfaisant, ces changements seraient toujours positifs. La mise à disposition de tous d'une information surabondante contribuerait à des progrès décisifs dans les domaines du savoir, de l'éducation, de la santé, du travail et nous mènerait tout droit vers une société plus écologique, plus durable et démocratique. A partir de l'appréhension du numérique comme une technique ambivalente, ces effets sont jugés ailleurs plus contrastés. Tous les bienfaits apportés s'accompagnent d'inconvénients comme une surveillance accrue, des pertes d'emplois, une dépendance par rapport aux monopoles privés des GAFA

(Google, Apple, Facebook, Amazon). Des analyses critiques distanciées considèrent que cette révolution cache un capitalisme cognitif prédateur qui empêche l'expression des potentialités libératrices du numérique. Plus radical, un courant techno-critique met en cause cette technologie qui ne fait que prolonger un mouvement machinique et techno-scientifique engagé depuis longtemps, en imposant une logique qui n'a rien de révolutionnaire.

L'incertaine révolution numérique a été précédée par cinquante ans d'informatisation de la société, marqués par des innovations techniques incessantes et une multiplication des applications. Rien n'est venu contrarier ce développement continu considéré comme un gage de progrès économique et social, même si des efforts ont parfois été accomplis pour en atténuer les inconvénients comme en matière de protection de la vie privée. En France, de rares associations comme le CREIS, le CECIL ou la revue *Terminal*, l'ont toujours évalué à partir d'un regard critique en proposant des analyses, en organisant des débats, en promouvant des formations et des recherches en « Informatique et société »¹. Comme le constate un historien des techniques, « depuis 1980, la critique du déferlement informatique n'a jamais cessé, tout en étant constamment marginalisée »².

Cet ouvrage, dans le droit fil d'une approche informatique et société, revisite les grandes problématiques qui sont apparues au fur et à mesure de la progression de l'informatisation. Il s'agit d'en décrire le contexte, de retrouver les termes dans lesquels elles ont été formulées et au besoin, de mobiliser des grilles théoriques pour mieux en saisir le sens et la portée. Un laps de temps d'un demi-siècle, au-delà des détails et des péripéties du court terme, permet le repérage des grandes questions qui sont apparues, de démêler le durable de l'éphémère, l'essentiel de l'accessoire, le nouveau du routinier. L'informatisation a emprunté des voies souvent inattendues et différentes de ce qui avait été prévu et annoncé. On n'avait pas imaginé qu'un outil de gestion et de contrôle allait être converti, en quelques années, en outil d'expression et de communication du plus grand nombre. De la même façon,

1. Les différentes activités de ces associations sont présentées sur leurs sites. Pour le Centre de coordination pour la recherche et l'enseignement en informatique et société (CREIS-Terminal) : www.lecreis.org. Pour le Centre d'études sur la citoyenneté, l'informatisation et les libertés (CECIL) : www.lececil.org.

2. François Jarrige, *Techno-critiques. Du refus des machines à la contestation des technosciences*, p. 295, La Découverte, Paris, 2014.

malgré les inquiétudes et les mises en garde concernant l'automatisation des fichiers de personnes, on n'avait pas imaginé l'ampleur et la démesure de la surveillance effectuée par les services de renseignements américains que les révélations d'Edward Snowden devaient mettre à nu. L'intérêt d'un retour historique, indépendamment des prévisions optimistes ou pessimistes, est de pouvoir observer des événements qui ont le caractère incontestable du « ça-a-été » dont parle Roland Barthes à propos de la photographie. Certes, l'objectivité est hors de portée, mais les faits retenus sont avérés même s'ils ont été sélectionnés à partir d'un point de vue particulier, celui des progrès et le plus souvent de la préservation des libertés individuelles. A cet égard, une attention particulière a été portée au statut changeant et évolutif des données personnelles car les libertés sont dépendantes du contrôle que l'individu a ou n'a pas, sur leurs utilisations. Comme l'écrit Wolfgang Sofsky : « Le respect de la sphère privée est le fondement de la liberté, et cette liberté protège contre n'importe quel pouvoir... Celui qui croit qu'il n'a rien à cacher a déjà renoncé à sa liberté »³.

Cinquante années d'informatisation ont donné naissance ou ont contribué à modifier en profondeur, quatre grandes problématiques sociétales :

- la problématique du contrôle social qui apparaît lors de la création des premières banques de données, dans les années 1960 ;
- la problématique de la sécurité publique qui apparaît au grand jour au milieu des années 1990 et à laquelle les attentats du 11 septembre allaient donner une importance particulière ;
- la problématique de la communication et de l'échange grâce à l'invention du micro-ordinateur dans les années 1980 et surtout de l'Internet grand public à partir de 1993 ;
- la problématique de la marchandisation avec l'apparition sur le réseau, au début des années 2000, de monopoles privés qui convertissent les données personnelles en ressources économiques.

Toutes ces problématiques ont eu d'abord une expression américaine avant de toucher la France et les autres pays démocratiques de la planète. Cette priorité américaine vient du leadership que les Etats-Unis ont exercé

3. Wolfgang Sofsky, *Le citoyen de verre, entre surveillance et exhibition*, p. 147, L'Herne, Paris, 2011.

durant toute la période. Aujourd'hui encore, c'est la Silicon Valley qui est aux commandes de la révolution numérique.

Une dialectique entre l'informatique et la société est à l'œuvre pendant toutes ces années. Des intentionnalités se manifestent à certaines périodes pour orienter et guider le processus. Le législateur en début de période veut le réguler en définissant des règles pour protéger la vie privée. Un peu plus tard, des chercheurs influencés par la contre-culture californienne convertissent un moyen de puissance et de contrôle en moyen d'expression et de communication. Après le 11 septembre, les Etats vont utiliser les supports numériques pour accroître la surveillance des individus. Au début des années 2000, de grandes entreprises vont coder le réseau Internet dans le sens de leurs intérêts, pour réaliser un maximum de profits. L'informatique et le numérique ne sont pas cependant des outils neutres dont on peut toujours maîtriser et orienter à son gré les utilisations. Comme toutes les techniques, ils sont en même temps déterminés et déterminants. Leur invention a été dépendante d'un contexte social particulier mais, dans un second temps, ils vont profondément influencer ce contexte. Pour l'anthropologue Sherry Turkle, nous fabriquons nos technologies et celles-ci nous façonnent en retour. « *Code is law* » constate le juriste américain Lawrence Lessig pendant que le juriste français Alain Supiot note la perte actuelle de la capacité de régulation du droit et le remplacement de la normativité juridique par une normativité algorithmique. Ainsi, l'automatisation de la collecte des données personnelles que réalisent les supports numériques rend totalement impossible l'expression d'un consentement. De la même façon, les Big data violent délibérément les grands principes de la protection des données et nous acheminent tout droit, au nom de l'optimisation de toute chose, vers un monde de décisions opaques prises par des automates au détriment du décideur humain et d'un fonctionnement démocratique de la société.

Aujourd'hui, les principales problématiques qui ont accompagné le développement de l'informatisation s'entremêlent et s'entrechoquent. Dans un temps de crise écologique et de crise économique où l'idée de catastrophe a supplanté l'idée de révolution, le numérique représente l'espoir de bénéficier d'une plus grande capacité d'action et d'échange dans un univers non pollué où le redoublement du monde dans les données offre des possibilités de production collaborative et d'inépuisables potentialités d'expression et de communication. La comparaison qui est faite avec d'autres périodes historiques

antérieures comme la révolution de la machine à vapeur du XVIII^e siècle et celle de l'électricité du XIX^e siècle, est de nature à rassurer. Nous serions dans une phase de transition, en train de passer d'une époque industrielle à une autre. L'instabilité actuelle devrait prendre fin avec l'arrivée dans une ère numérique qui aura validé les nouveaux comportements et adopté de nouvelles règles.

Comparaison n'est pas raison. Des économistes constatent que la révolution numérique n'a toujours pas transformé les biens, les services et les modes de production à la hauteur des bouleversements provoqués par les deux révolutions industrielles précédentes. La nature du progrès technique n'est pas la même : alors qu'au XIX^e siècle il s'agissait de rendre les travailleurs plus productifs, il s'agit aujourd'hui de les remplacer par des logiciels. En donnant à ce phénomène un caractère d'inévitabilité historique et en le mettant au centre de la représentation de l'avenir, on ignore le rythme et la permanence de l'innovation qui rendent présentement impossible la détermination d'un point d'arrivée dans une période de stabilisation durable. On annonce aujourd'hui à partir de l'association de l'informatique avec d'autres technologies, la révolution NBIC (nanotechnologies, biotechnologies, informatique, sciences cognitives) qui devrait apporter d'immenses changements. La fin de l'instabilité permanente qui est au coeur de notre présent, n'est pas pour demain. « En décrivant la technique qui entreprend de nous dominer, écrivait Lewis Mumford en 1963, je n'ai pas oublié la grande leçon de l'histoire : "Préparez- vous à l'inattendu !" »⁴.

4. Lewis Mumford, « Technique autoritaire et technique démocratique », *Technology and culture*, John Hopkins University Press, 1963.

ORDRE NATIONAL DES MASSEURS-KINESITHERAPEUTES**CHAMBRE DISCIPLINAIRE NATIONALE**

N° 018-2016 et 019-2016 Conseil national de l'ordre des masseurs-kinésithérapeutes c. M. F. et M. M.

Rapporteur : Mme Magalie TURBAN

Audience publique du 24 novembre 2017

Décision rendue publique par affichage le 15 décembre 2017

Vu I enregistrée sous le numéro 018-2016 la requête, enregistrée le 6 juin 2016 au greffe de la chambre disciplinaire nationale de l'ordre des masseurs-kinésithérapeutes, présentée par le conseil national de l'ordre des masseurs-kinésithérapeutes, dont le siège est 120/122 rue Réaumur, 75002 Paris, représenté par sa présidente ; il demande que soit annulée la décision de la chambre disciplinaire de première instance de l'ordre des masseurs-kinésithérapeutes de Rhône-Alpes en date du 3 mai 2016 infligeant à M. F. la peine disciplinaire de l'avertissement, que M. F. soit reconnu coupable d'avoir méconnu les dispositions des articles R.4321-64, R.4321-65, R.4321-67, R.4321-80 et R.4321-87 du code de la santé publique, que soit prononcée à l'encontre de M. F. une sanction en adéquation avec la gravité des faits reprochés ;

Vu II enregistrée sous le numéro 019-2016 la requête, enregistrée le 6 juin 2016 au greffe de la chambre disciplinaire nationale de l'ordre des masseurs-kinésithérapeutes, présentée par le conseil national de l'ordre des masseurs-kinésithérapeutes, dont le siège est 120/122 rue Réaumur, 75002 Paris, représenté par sa présidente ; il demande que soit annulée la décision de la chambre disciplinaire de première instance de l'ordre des masseurs-kinésithérapeutes de Rhône-Alpes en date du 3 mai 2016 infligeant à M. M. la peine disciplinaire de l'avertissement, que M. M. soit reconnu coupable d'avoir méconnu les dispositions des articles R.4321-64, R.4321-65, R.4321-67, R.4321-80 et R.4321-87 du code de la santé publique, que soit prononcée à l'encontre de M. M. une sanction en adéquation avec la gravité des faits reprochés ;

Vu les autres pièces du dossier ;

Vu le code de la santé publique ;

Vu le code de justice administrative ;

Vu l'article 75-I de la loi n°91-647 du 10 juillet 1991 relative à l'aide juridique ;

Les parties ayant été régulièrement averties du jour de l'audience,

Après avoir entendu au cours de l'audience publique du 24 novembre 2017 :

- Mme Magalie TURBAN en son rapport ;

- Les explications de M. Xavier GALLO en tant que trésorier adjoint, pour le conseil national de l'ordre des masseurs-kinésithérapeutes et en tant que président pour le conseil départemental de l'ordre des masseurs-kinésithérapeutes de l'Isère ;

- Les observations de Me Nathalie RIEUSSEC pour M. F. et M. M. et ces derniers en leurs explications ;

Me RIEUSSEC ayant été invitée à reprendre la parole en dernier ;

Après en avoir délibéré

1- Considérant que les requêtes susvisées, si elles concernent deux masseurs-kinésithérapeutes, sont dirigées contre la même décision et présentent à juger les mêmes questions ; qu'il y a lieu de les joindre pour y statuer par une seule décision ;

2- Considérant que M. F. et M. M., masseurs-kinésithérapeutes inscrits au tableau du conseil départemental de l'Isère depuis le 10 mars 2008, sont à l'origine d'une méthode, dite thérapie quantique intégrative dont ils assurent la diffusion ; qu'estimant cette méthode et sa diffusion contraires aux articles R.4321-64, R.4321-65, R.4321-67, R.4321-80 et R.4321-87 du code de la santé publique, le conseil national de l'ordre des masseurs-kinésithérapeutes et le conseil départemental de l'Isère ont saisi la chambre disciplinaire de première instance de l'ordre des masseurs-kinésithérapeutes de Rhône-Alpes d'une plainte ; que, par la décision attaquée du 3 mai 2016, cette dernière, après avoir joint les deux plaintes, a infligé à M. F. et à M. M. la sanction de l'avertissement ; que, par deux requêtes, le conseil national de l'ordre des masseurs-kinésithérapeutes demande l'annulation de cette décision et que soit prononcée à l'encontre de M. F. et de M. M. une sanction en rapport avec la gravité des faits reprochés ;

Sur la recevabilité des requêtes d'appel

3- Considérant en premier lieu qu'aux termes de l'article R.4126-44 du code de la santé publique : « *Le délai d'appel est de trente jours à compter de la notification de la décision...* » ; que la décision attaquée a été notifiée au conseil national de l'ordre des masseurs-kinésithérapeutes le 6 mai 2016 ; que le délai d'appel de 30 jours expirait le 6 juin 2016 ; qu'ainsi les requêtes enregistrées le 6 juin 2016 ne sont pas tardives ;

4- Considérant en deuxième lieu que le conseil national de l'ordre des masseurs-kinésithérapeutes était partie à l'instance devant la chambre disciplinaire de première instance et qu'en toute hypothèse, il tient de l'article L.4122-3 du code de la santé publique la possibilité de faire appel d'une décision de première instance ; qu'il résulte de la mission confiée au conseil national de l'ordre des masseurs-kinésithérapeutes par les articles L.4321-14 et R.4321-51 du code de la santé publique que ce dernier a intérêt à agir contre tout manquement déontologique commis par un masseur-kinésithérapeute ; que M. F. et M. M. ne peuvent ainsi valablement soutenir que le conseil national de l'ordre des masseurs-kinésithérapeutes est dépourvu d'intérêt à agir ;

5- Considérant en troisième lieu qu'il résulte du relevé de décision de la consultation électronique du 24 au 26 mai 2016 que les faits reprochés sont décrits avec précision ; que la décision de première instance attaquée a été communiquée aux membres ; qu'ainsi M. F. et

M. M. ne peuvent soutenir que les membres du conseil national n'ont pas été suffisamment informés pour prendre la décision de faire appel de la décision de la chambre disciplinaire de première instance ;

6- Considérant enfin que lorsque les membres du conseil national de l'ordre sont consultés par voie électronique sur l'opportunité de faire appel, le vote doit être confirmé par une décision collégiale ultérieure qui peut être postérieure à la requête ;

7- Considérant que les requêtes d'appel du conseil national de l'ordre des masseurs-kinésithérapeutes, enregistrées le 6 juin 2016, au greffe de la chambre disciplinaire nationale, étaient signées par la présidente du conseil national ; qu'à ces requêtes était joint le relevé de décision de la consultation électronique des membres du conseil national de l'ordre des masseurs-kinésithérapeutes et qui portait sur la décision de faire appel de la décision du 3 mai 2016 infligeant à M. F. et à M. M. la sanction de l'avertissement ; qu'en réponse à la demande du greffe tendant à ce que soit produite la délibération collégiale du conseil national confirmant le vote issu de la consultation électronique, le conseil national de l'ordre des masseurs-kinésithérapeutes a adressé un premier document signé de sa présidente intitulé « *Extrait de relevé de décisions du CNO pour la journée du 8 juin 2016* » ; que ce document sur lequel figurent le nom des membres présents et les résultats du vote comporte un point 2 : « *enregistrement des résultats des consultations électroniques* » concernant l'enregistrement des annexes des réunions plénières qui ont notamment eu lieu les 23 et 24 mars 2016 ; qu'un deuxième document, également signé de la présidente du conseil national de l'ordre des masseurs-kinésithérapeutes intitulé : « *CNO 07 et 08 juin 2016 Liste des consultations électroniques entérinées* » précise que le point 2 du relevé de décision des séances plénières des 07 et 08 juin 2016 doit être compris comme portant sur les dossiers suivants : *appel contre décision CDPI Rhône Alpes. MM. Pain* » ; que ces documents attestent de ce que la décision de faire appel de la décision de la chambre disciplinaire de première instance du 3 mai 2016 a bien été prise par une décision collégiale ultérieure ;

8- Considérant qu'il résulte de l'ensemble de ce qui précède que les requêtes du conseil national de l'ordre des masseurs-kinésithérapeutes sont recevables ;

Sur la régularité de la plainte du conseil départemental de l'ordre des masseurs-kinésithérapeutes de l'Isère et sans qu'il soit besoin de statuer sur la régularité de la plainte du conseil national de l'ordre des masseurs-kinésithérapeutes

9- Considérant en premier lieu qu'en égard à l'objet de la procédure de conciliation mentionnée à l'article L.4123-2 du code de la santé publique qui est de permettre aux parties de régler le différend qui les oppose avant qu'il ne soit éventuellement porté devant la juridiction disciplinaire et à la mission de l'ordre, qu'il exerce à travers ses différents conseils, de veiller au respect de la déontologie, cette procédure de conciliation, qui doit en principe être organisée par le conseil départemental lorsqu'une plainte contre un professionnel est portée devant lui est sans objet lorsque, comme en l'espèce, la plainte émane d'une instance de l'ordre ;

10- Considérant en deuxième lieu qu'ainsi que l'a jugé la décision attaquée, il résulte des pièces du dossier que les motifs de la consultation étaient décrits avec précision, et que le procès-verbal du vote électronique du 25 juin 2015 répond aux exigences de l'article R.4126-

1 du code de la santé publique ; que M. F. et M. M. ne peuvent, dès lors, valablement soutenir que les membres du conseil départemental n'étaient pas suffisamment informés ;

11- Considérant enfin que si, ainsi qu'il a été dit ci-dessus, en cas de consultation électronique, les résultats du vote doivent être confirmés par une délibération collégiale ultérieure, il résulte des pièces du dossier que les résultats du vote électronique du 25 juin 2015 ont été entérinés à la séance plénière du conseil départemental du 29 septembre 2015 ;

12- Considérant qu'il résulte de l'ensemble de ce qui précède que la plainte du conseil départemental de l'Isère est recevable ;

Sur les griefs

13- Considérant qu'aux termes de l'article R.4321-64 du code de la santé publique : *« Lorsque le masseur-kinésithérapeute participe à une action d'information de caractère éducatif et sanitaire auprès d'un public non professionnel, quel qu'en soit le moyen de diffusion, il ne fait état que de données suffisamment confirmées, fait preuve de prudence et a le souci des répercussions de ses propos auprès du public. Il se garde à cette occasion de toute attitude publicitaire, soit personnelle, soit en faveur des organismes où il exerce ou auxquels il prête son concours. Il ne promeut pas une cause qui ne soit pas d'intérêt général. »* ; qu'aux termes de l'article R4321-65 : *« Le masseur-kinésithérapeute ne divulgue pas dans les milieux professionnels une nouvelle pratique insuffisamment éprouvée sans accompagner sa communication des réserves qui s'imposent. Il ne fait pas une telle divulgation auprès d'un public non professionnel. »* ; qu'aux termes de l'article R.4321-67 : *« La masso-kinésithérapie ne doit pas être pratiquée comme un commerce. Sont interdits tous procédés directs ou indirects de publicité, exception faite des cas prévus aux articles R. 4321-124 et R. 4321-125... »* ;

14- Considérant qu'aux termes de l'article R.4321-80 du code de la santé publique : *« Dès lors qu'il a accepté de répondre à une demande, le masseur-kinésithérapeute s'engage personnellement à assurer au patient des soins consciencieux, attentifs et fondés sur les données actuelles de la science »* ; et qu'aux termes de l'article R.4321-87 : *« Le masseur-kinésithérapeute ne peut conseiller et proposer au patient ou à son entourage, comme étant salutaire ou sans danger, un produit ou un procédé, illusoire ou insuffisamment éprouvé. Toute pratique de charlatanisme est interdite. »* ;

15- Considérant que M. F. et M. M. ont développé « une thérapie quantique intégrative », dite TQi consistant à établir une approche systémique avec le patient pour l'amener sur le terrain de la guérison ; qu'elle est présentée comme une réponse à l'insuffisance de la médecine conventionnelle ; qu'elle n'a cependant fait l'objet d'aucune étude ou publication scientifique ; qu'elle n'est pas fondée sur les données acquises de la science ; qu'elle est néanmoins présentée par M. F. et M. M. comme un chemin de guérison ;

16- Considérant qu'à supposer même que, comme ils l'affirment, M. F. ne pratique pas la thérapie quantique intégrative, et que M. M. la pratique uniquement en dehors de son activité de masseur-kinésithérapeute et qu'ils ne délivrent pas un enseignement en tant que tel, le fait même de faire l'apologie de cette thérapie à travers un ouvrage, des interviews et conférences, et pendant un temps sur un site internet est contraire aux dispositions des articles précités du

code de la santé publique ; que la pratique de la thérapie quantique intégrative dans les locaux du cabinet de kinésithérapie est de nature à créer une confusion entre les deux activités ;

17- Considérant que M. F. et M. M. ont ainsi gravement méconnu les dispositions précitées du code de la santé publique ; que si c'est à bon droit que la chambre disciplinaire de première instance a sanctionné ces pratiques, la sanction de l'avertissement n'est pas en rapport avec la gravité des faits reprochés ; qu'il y a lieu de condamner M. F. et M. M. à l'interdiction d'exercer la masso-kinésithérapie pendant une durée de deux ans ; que la décision de la chambre disciplinaire de première instance attaquée du 3 mai 2016 doit être réformée en ce qu'elle a de contraire à la présente décision ;

Sur les conclusions tendant à l'application de l'article L.761-1 du code de justice administrative

18- Considérant qu'aux termes de l'article 75-1 de la loi n°91-647 du 10 juillet 1991, applicables en l'espèce faite, pour les dispositions de l'article L.761-1 du code de justice administrative d'avoir été étendues aux masseurs-kinésithérapeutes : « *Dans toutes les instances, le juge condamne la partie tenue aux dépens ou, à défaut, la partie perdante, à payer à l'autre partie la somme qu'il détermine, au titre des frais exposés et non compris dans les dépens. Le juge tient compte de l'équité ou de la situation économique de la partie condamnée. Il peut, même d'office, pour des raisons tirées des mêmes considérations, dire qu'il n'y a pas lieu à cette condamnation (...)* » ;

19- Considérant que ces dispositions font obstacle à ce que soit mis à la charge du conseil national de l'ordre des masseurs-kinésithérapeutes la somme de 5000 euros que demandent chacun M. F. et M. M. au titre des frais exposés par eux et non compris dans les dépens ;

DECIDE

Article 1 :

Il est prononcé à l'encontre de M. F. et de M. M. la sanction de l'interdiction de pratiquer la masso-kinésithérapie pendant une durée de deux ans.

Article 2 :

L'exécution de cette sanction prendra effet le 1^{er} mars 2018 à 0 heure et cessera de porter effet le 28 février 2020 à minuit.

Article 3 :

La décision de la chambre disciplinaire de première instance de Rhône-Alpes du 3 mai 2016 est réformée en ce qu'elle a de contraire à la présente décision.

Article 4 :

Les conclusions de M. F. et de M. M. tendant à l'application des dispositions de l'article L.761-1 du code de justice administrative sont rejetées.

Article 5 :

La présente décision sera notifiée au conseil national de l'ordre des masseurs-kinésithérapeutes, à M. F., à M. M., au conseil départemental de l'ordre des masseurs-

kinésithérapeutes de l'Isère, au procureur de la République près le Tribunal de grande instance de Grenoble, au directeur général de l'Agence régionale de santé Auvergne – Rhône-Alpes, à la chambre disciplinaire de première instance de l'ordre des masseurs-kinésithérapeutes d'Auvergne – Rhône-Alpes et au Ministre des Solidarités et de la Santé.

Copie pour information en sera délivrée à Me DUCHATEL.

Ainsi fait et délibéré par Mme CAMGUILHEM, Conseillère d'Etat honoraire, Présidente et Mme TURBAN, MM. COUTANCEAU, DEBIARD, DUCROS, DUTARTRE, membres assesseurs de la chambre disciplinaire nationale.

Anne-Marie CAMGUILHEM
Conseillère d'Etat honoraire
Présidente

Stéphane PAPAGEORGIOU
Greffier

La République mande et ordonne au ministre chargé de la santé en ce qui le concerne, ou à tous huissiers de justice à ce requis en ce qui concerne les voies de droit commun contre les parties privées, de pourvoir à l'exécution de la présente décision.

Source Les Echos : <https://www.lesechos.fr/idees-debats/cercle/opinion-lordinateur-quantique-quel-enjeu-pour-les-entreprises-2044241>

Opinion | L'ordinateur quantique : quel enjeu pour les entreprises ?

Publié le 4 janv. 2024 à 7:36 Mis à jour le 4 janv. 2024 à 8:00

La seconde révolution quantique est en marche, et laissera sur le bas-côté de la route les entreprises et les Etats qui n'auront pas massivement investi dans ces technologies. Ce qui passe, aussi, par un effort de formation, à tous niveaux, souligne Alain Aspect.

Pourquoi parle-t-on aujourd'hui d'une « deuxième révolution quantique » ? La première révolution a débouché sur des applications qui ont changé le monde, comme les ordinateurs, les téléphones portables, l'IRM ou encore le laser et les LED. La seconde révolution conduira vraisemblablement à d'autres innovations de rupture, notamment l'ordinateur et les communications quantiques.

Ces technologies transformeront-elles notre société comme l'ont fait le transistor et le laser ? Il est encore trop tôt pour le dire, mais si les technologies quantiques tiennent leurs promesses, les entreprises ou les Etats qui n'auront pas investi dans ces technologies accuseront un retard difficile à combler.

La demande en puissance de calcul n'a cessé de croître au cours des dernières décennies, particulièrement avec l'avènement du big data, de l'IA et le besoin de simulations numériques de plus en plus précises. Jusqu'à présent, cette demande a été satisfaite par des « supercalculateurs », mais ceux-ci sont coûteux et de plus en plus gourmands en énergie. Les ordinateurs quantiques pourraient être la solution, raison pour laquelle quelques grands industriels et beaucoup de pays investissent massivement.

Le concept d'ordinateur quantique a été rendu possible par un certain nombre de percées expérimentales réalisées à partir des années 1970. Tout d'abord, nous avons appris à observer et à contrôler des objets microscopiques individuels. Auparavant, nous ne pouvions manipuler que des particules en très grand nombre.

Aujourd'hui, nous pouvons capturer un électron ou un atome seul pour l'observer voire le contrôler. Nous pouvons également émettre un photon individuel et l'utiliser. La deuxième série d'avancées concerne l'intrication quantique décrite pour la première fois par Einstein, Podolsky et Rosen en 1935, et concevable uniquement dans le cadre de la physique quantique.

Deux particules intriquées forment un ensemble quantique qui contient plus d'informations que la somme des informations contenues dans chaque particule. C'est cette propriété qui rend possible l'informatique quantique : au lieu de se contenter de deux bits quantiques intriqués (qubits), on encode l'information quantique dans trois, quatre, cinq, dix ou cent qubits... La quantité d'information contenue dans ces particules par rapport à une mémoire classique est gigantesque et croît de manière exponentielle. Pour N qubits, il y a donc 2^N états

de base possibles, et toutes leurs combinaisons. Ceci est sans commune mesure avec une mémoire classique à N bits.

L'utilisation des principes de la physique quantique dans l'informatique et les technologies de l'information a émergé dans les années 1980 avec les travaux de Richard Feynman puis de David Deutsch et Richard Jozsa, qui ont développé le premier algorithme quantique. Il s'agit d'une séquence d'opérations logiques basées sur les principes d'intrication et de superposition, capable de résoudre un problème plus rapidement que n'importe quel algorithme traditionnel connu.

En 1994, le développement de l'algorithme de Shor - conçu pour fonctionner sur un ordinateur quantique - a également constitué une avancée majeure dans le décodage des protocoles de cryptage utilisés sur le web.

Nous sommes encore loin d'un véritable ordinateur quantique car les qubits dont nous disposons aujourd'hui sont instables et subissent ce que l'on appelle la « décohérence » lorsqu'ils interagissent avec leur environnement. Ils se comportent alors comme des objets classiques et perdent l'information quantique qu'ils contiennent.

Néanmoins, cette difficulté pourrait être surmontée plus rapidement que prévu. Par exemple, on pourrait trouver un sous-espace d'états quantiques protégés de la décohérence. Dans ce cas, un ordinateur quantique pourrait voir le jour d'ici à quelques années. L'histoire a prouvé à maintes reprises que si quelque chose n'est pas interdit par une loi fondamentale de la physique, les savants et les ingénieurs parviennent tôt ou tard à le réaliser.

Si le problème de la décohérence n'est pas résolu à court terme, nous pourrions utiliser des ordinateurs quantiques « dégradés ». Ces machines de taille intermédiaire, qui existent déjà, sont plus efficaces que les ordinateurs conventionnels pour certaines tâches. Plus efficace ne signifie pas seulement plus rapide, mais aussi moins gourmand en énergie.

Il sera crucial pour les entreprises de disposer en interne d'experts en physique quantique capables de mettre en oeuvre ces avancées. Aujourd'hui, il y a une pénurie de personnes compétentes en physique quantique, et je pense que les entrepreneurs doivent s'associer aux universités pour s'attaquer plus efficacement à la question de la formation aux technologies quantiques, du bac pro au doctorat, comme nous commençons à le faire dans la collaboration entre l'Institut d'Optique (Paris-Saclay), l'IUT (Paris-Saclay) et iXcampus.

Alain Aspect, prix Nobel de physique 2022, professeur à l'Institut d'Optique (université Paris-Saclay), à l'Ecole polytechnique (Institut polytechnique de Paris) et contributeur à la revue Polytechnique Insights .

Alain Aspect

Source www.gouvernement.fr

France 2030 : Des résultats concrets pour les 2 ans de la stratégie quantique

Publié 30/03/2023 | Modifié 03/04/2023

Sylvie Retailleau, ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, Jean-Noël Barrot, ministre chargé de la Transition numérique et des Télécommunications, et Olivier Becht, ministre chargé du Commerce extérieur, de l'Attractivité et des Français de l'étranger, avec Bruno Bonnell, secrétaire général pour l'investissement, ont présenté, jeudi 30 mars, les résultats concrets de la stratégie nationale quantique, deux ans après son lancement par le Président de la République Emmanuel Macron.

Les technologies quantiques représentent des enjeux de compétitivité et de souveraineté importants, pour lesquels la France doit absolument se doter de capacités technologiques souveraines en transformant nos écosystèmes à ces nouvelles réalités. La puissance des ordinateurs quantiques permettrait par exemple : d'avoir de nouveaux outils de simulation et d'optimisation en matière de santé, environnement ou énergie, de prédire finement les propagations épidémiques, d'optimiser le trafic de manière systémique en temps réel, de dépasser la précision de nos horloges atomiques, apporter de nouvelles fonctionnalités de navigation sans satellite, ou encore de casser de manière unilatérale les clefs de chiffrement aujourd'hui inviolables, notamment celles qui sont basées sur le protocole de chiffrement RSA, utilisé par exemple pour nos paiements sécurisés par carte bleue. C'est pourquoi il est crucial de se préparer et de bâtir en France les infrastructures, les technologies et les compétences pour garantir notre souveraineté et notre sécurité.

Les technologies et ordinateurs quantiques conféreront à moyen terme un avantage stratégique certain aux acteurs économiques qui s'en seront saisis. Au regard des enjeux de croissance économique et de souveraineté, et à l'instar des principales grandes puissances mondiales, les Etats-Unis, la Chine, le Royaume-Uni ou l'Allemagne, le Président de la République a lancé, en janvier 2021, une stratégie nationale ambitieuse en France sur les technologies quantiques dotée de plus de 1 milliards d'euro de France 2030.

La France a les moyens de saisir l'opportunité des technologies quantiques et de devenir un leader mondial en la matière

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

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

Doté d'un financement cumulé de l'Etat d'environ 1 Md€ sur quatre ans, pour un engagement global public-privé de 1,8 Mds€, elle s'articule autour de 6 objectifs stratégiques :

- Développer les technologies et usages du calcul quantique
- Maîtriser les technologies de capteurs quantiques
- Développer et diffuser la cryptographie post quantique
- Développer les technologies de communications quantiques
- Maîtriser les technologies habilitantes du quantique
- Développer les technologies et usages du calcul quantique.

Les avancements de la stratégie en quelques chiffres :

- 350 millions ont été investis dans le cadre de France 2030
- 150 millions pour financer le Programme de recherche (PEPR) Quantique
- 60 millions en formation dans le cadre de l'appel à manifestation d'intérêt « Compétences et métiers d'avenir »
- 72 millions pour mettre en place une plateforme de calcul quantique hybride
- 80 millions en soutien aux filières industrielles critiques

Une coopération internationale régulière

Mardi 28 et mercredi 29 mars 2023, la France a accueilli le groupe de travail « 2n vs 2n » qui réunit tous les 6 mois plusieurs pays affinitaires dotés de stratégies quantiques pour une session d'échanges et de travail sur les enjeux du développement des talents dans le quantiques.

Une plateforme de calcul quantique hybride

Dotée d'un budget de 72,3 M€ de France 2030, l'initiative HQI vise le développement d'une plateforme de calcul hybride, interconnectant systèmes de calcul classiques et dispositifs quantiques, vus alors comme des accélérateurs. Elle sera mise à disposition d'une communauté internationale regroupant des laboratoires, des startups et des industriels. L'objectif ? Faciliter leur accès aux capacités de calcul quantique, afin d'être en mesure d'identifier, de développer et de tester de nouveaux cas d'usages.

Le programme de recherche (PEPR) Quantique

Soutenant des activités de recherche au meilleur niveau mondial, le programme de recherche (PEPR) pour les Technologies quantiques, piloté par le CNRS, l'INRIA et le CEA, est destiné à renforcer l'effort national en la matière et à nourrir les actions plus aval de la Stratégie nationale quantique, telles que la Plateforme nationale de calcul quantique hybride HQI, ainsi que l'émergence d'activités industrielles.

10 projets ciblés du PEPR Technologies quantiques, deux projets de l'appel à projet « qubits volants » ainsi que deux EquipEx ont été financés en 2022, et ont donné lieu à plus de 500 articles scientifiques publiés par la communauté quantique française.

Le prix Nobel de physique 2022 reconnaît des recherches pionnières françaises

Le prix Nobel de physique 2022 a été décerné à Alain Aspect, John F. Clauser et Anton Zeilinger, qui ont mené des expériences pionnières sur l'intrication quantique. Le Comité Nobel a reconnu que ce phénomène quantique autrefois abstrait est devenu le fondement de l'industrie quantique en rapide évolution

Des entreprises soutenues à différents stades de leur innovation

Berceau de plusieurs percées majeures à l'origine de l'avance actuelle des grandes entreprises technologiques mondiales, la France ambitionne d'être parmi les premières nations à développer un ordinateur quantique universel à grande échelle lui assurant une souveraineté technologique et contribuant à l'autonomie stratégique de l'Europe

Avec 80 millions de France 2030 déjà engagés, les filières industrielles critiques du secteur sont fortement soutenues. Plusieurs projets concrets et notables ont émergé en France (liste non exhaustive):

- PASQAL, qui a levé 100 millions d'euros, développe un ordinateur quantique à atomes neutres.
- Siquance, le nouveau-né issu du CEA et du CNRS, développe et commercialise un ordinateur quantique basée sur les technologies du semi-conducteur et avec les capacités des producteurs de puce européens.
- Alice & Bob, lauréate des concours d'innovation i-PhD et i-Lab de France 2030 travaille à la construction d'un ordinateur quantique universel à correction d'erreur
- Aqemia, créée à l'automne 2021, en partenariat avec l'Ecole normale supérieure (ENS) et le CNRS, et spécialisée dans la recherche de médicaments en utilisant l'intelligence artificielle générative pour inventer des clés et des algorithmes uniques inspirés de la mécanique quantique.

Répondre aux besoins en compétences et métiers des secteurs critiques

Lauréat de l'appel à manifestation d'intérêt « Compétences et métiers d'avenir » de France 2030, le projet QuantEdu-France, porté par l'Université Grenoble Alpes et soutenu par un consortium de 21 établissements académiques, réunit des acteurs de la formation initiale et continue, avec la participation d'acteurs majeurs de l'industrie et de l'innovation dans les technologies quantiques, ainsi que le soutien de la Région Occitanie, avec l'ambition de répondre aux objectifs fixés par la stratégie nationale pour les technologies quantiques dans le cadre de l'accélération du développement des compétences et du capital humain.

D'ores et déjà, en 2022 :

- 1000 étudiants ont intégré un cursus niveau Master/2A/3A dans des formations à forte dominante quantique
- 170 nouvelles thèses ont été lancées

Accord NIST-CNRS-Université de Limoges

Le 5 juillet 2022, le NIST (National Institute of Standard and Technology, département américain du Commerce), le CNRS et l'Université de Limoges ont signé un accord de Licence. Grâce à lui, les opérateurs et les utilisateurs finaux des normes cryptographiques, dérivées des algorithmes PQC sélectionnés par le NIST, n'auront pas besoin d'obtenir une licence distincte sur la famille de brevets concernés du CNRS.

Note n° 13 — Les technologies quantiques : ___ Mars 2019

introduction et enjeux



© monsitj/ Adobe Stock

Résumé

- De nombreuses technologies de notre vie quotidienne se basent sur les principes de la physique quantique : lasers, transistors, dispositifs de positionnement par satellite (GPS)...
- Depuis quelques années, les technologies quantiques au sens large connaissent un intérêt marqué aussi bien de la part des industriels que des gouvernements, en parallèle de progrès techniques de rupture.
- Les nouvelles technologies quantiques concernent des applications telles que les capteurs, le calcul ou les communications. Ces domaines s'appuient sur les principes de la physique quantique, en particulier l'intrication et la superposition d'états.
- En Europe, un programme d'envergure de type « flagship » a été lancé en 2018 pour soutenir les projets européens dans la course mondiale aux technologies quantiques, dont les principaux concurrents étatiques sont la Chine et les États Unis.

M. Cédric Villani, Député, Premier vice-président

Les investissements dans le domaine des technologies quantiques ont connu une expansion forte au cours des dernières années. Ces projets, orientés aussi bien vers la recherche fondamentale que vers des innovations de rupture, et donnant lieu à une vive compétition scientifique et technologique internationale, appellent une attention particulière.

Physique quantique et applications historiques

À l'échelle atomique, les lois de la physique classique peinent à décrire le comportement des particules telles que les atomes, électrons et photons. Dans les années 1920, Niels Bohr, Louis de Broglie, Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg et beaucoup d'autres scientifiques mettent au point une théorie, dotée de son propre formalisme mathématique, pour mieux comprendre les phénomènes à l'œuvre à l'échelle de ces particules. Ces travaux marquent la naissance de la physique quantique.

En physique classique, un objet physique – un atome par exemple – d'une part, possède une énergie qui évolue de manière continue, d'autre part, peut-être modélisé par un point qui se trouve à une position précise à un temps donné. Il se distingue clairement des ondes, qui correspondent à la propagation d'une perturbation dans l'espace.

En physique quantique, les échanges d'énergie se font de manière discrète, ou discontinue, par paquets appelés « quantas⁽¹⁾ ». Ce principe de quantification, imaginé dès 1900 par Max Planck, pose les premiers fondements de la physique quantique, dans laquelle les concepts d'onde et d'objet ponctuel fusionnent pour expliquer le comportement des objets à

l'échelle atomique. Dans le cadre de cette dualité onde-corpuscule, on ne peut plus prédire la position exacte d'un corpuscule à un instant donné, mais seulement la probabilité de le trouver en un endroit donné à cet instant. Ces phénomènes, assez contre-intuitifs, se trouvent à l'origine des deux principaux concepts utilisés par la majorité des technologies utilisant la physique quantique : la superposition d'états et l'intrication.

Avec le principe de superposition, l'état global d'un système quantique à un instant donné devient une combinaison linéaire de tous ses états possibles à cet instant. Seule la probabilité de présence d'une particule à une position donnée peut-être prédite.

En parallèle, quiconque tente de mesurer avec exactitude l'état de la particule se heurte à la relation d'indétermination de Heisenberg⁽²⁾. Selon cette relation fondamentale, il est impossible de connaître simultanément la position et la vitesse d'une particule quantique. De manière plus générale, l'acquisition d'information sur une grandeur quantique implique nécessairement la perte d'information sur d'autres. En d'autres termes, en physique quantique, il est impossible d'effectuer une mesure sans perturber l'état de l'objet mesuré.

L'intrication consiste en la connexion entre deux, ou plusieurs, objets quantiques et entre leurs informations. Une modification d'état chez l'un entraîne un changement chez l'autre de manière instantanée. Il faut alors considérer la paire comme un système unique, inséparable et global : les propriétés de la paire ne sont pas simplement égales à la réunion des propriétés des deux corps.

De nos jours, des dispositifs utilisés au quotidien se fondent déjà sur la physique quantique, à l'instar du **GPS** (*Global positioning system*) : notre position est déterminée avec la précision du mètre (voire du cm) grâce aux **horloges atomiques**, créées dès les années 1960 et embarquées dans les satellites en orbite. Ces horloges, qui se fondent sur l'immutabilité des fréquences de transition d'états de certains atomes⁽³⁾, caractéristique de la physique quantique, permettent des corrections indispensables au bon fonctionnement des systèmes de positionnement par satellite de type GPS⁽⁴⁾ et à leur précision. La technologie des **lasers**⁽⁵⁾ a également été rendue possible grâce aux avancées dans le domaine quantique, notamment en optique et en électronique. Utilisés aujourd'hui dans une très large gamme d'applications, ils ont été mis au point dans la même période que les horloges atomiques. Enfin, **les transistors et les circuits électroniques intégrés**, qui forment aujourd'hui la base des technologies de la communication et de l'information, font aussi partie des premières applications qui marquent rétrospectivement la **première révolution quantique**.

Il faudra attendre les années 1980 pour voir poindre les premières idées d'applications potentielles de la physique quantique en calcul et en informatique, avec notamment les travaux de Richard Feynman⁽⁶⁾ sur la puissance éventuelle d'un ordinateur qui aurait la capacité de simuler des phénomènes quantiques. Progressivement, la notion de calculateur quantique voit le jour, entre la fin des années 1980 et le début des années 1990, via les travaux du physicien David Deutsch et du mathématicien Richard Jozsa qui ont permis de créer le premier algorithme quantique⁽⁷⁾, c'est-à-dire une suite d'opérations logiques exploitant les principes de superposition et d'intrication, et résolvant un problème plus rapidement que tous les algorithmes classiques connus. De manière très théorique, ils démontrent que **certains calculs seraient sensiblement accélérés si les principes de la physique quantique pouvaient être appliqués aux ordinateurs**. En 1994, la mise au point de l'algorithme de Shor renouvelle l'intérêt pour le sujet. En effet, cet algorithme, conçu pour fonctionner sur un ordinateur quantique, **pourrait décoder en un temps record les protocoles de chiffrement**⁽⁸⁾ de données utilisés à la fois par les gouvernements et pour les usages civils. À l'époque, la menace demeure cependant théorique, car les technologies nécessaires à la conception d'ordinateurs quantiques n'existent pas encore. Mais cet épisode ouvre la voie aux scientifiques pour tenter de mettre au point des algorithmes quantiques plus performants que les algorithmes classiques usuels.

En parallèle, les progrès scientifiques et techniques continuent : dans les années 1960, des travaux majeurs sont initiés par John Bell avant d'être repris, au début des années 1980, par les expériences « EPR » d'Alain Aspect⁽⁹⁾ qui prouvent de manière

irréfutable le phénomène d'intrication quantique, malgré le scepticisme de la communauté scientifique de l'époque. Ces expériences assez complexes vont permettre **de préparer et manipuler des objets quantiques (atomes, ions, photons) individuellement, ce qui ouvre un nouveau champ des possibles** pour avancer sur les principes théoriques de la physique quantique, mais aussi sur de potentielles applications en utilisant les principes de superposition et d'intrication quantique.

Les propriétés quantiques à la base des technologies quantiques

La superposition permettrait de démultiplier la puissance des ordinateurs actuels. En informatique classique, l'information est stockée et manipulée sur un bit, c'est-à-dire un support physique de valeur 0 (bloquant) ou 1 (passant). Dans un état quantique, du fait du principe de superposition, l'état (ou la valeur) du support devient une combinaison linéaire des états 0 et 1. **Pour N bits quantiques, le système connaît une croissance exponentielle de sa puissance de calcul car il existe alors 2^N états possibles**⁽¹⁰⁾. Quelques bits quantiques suffiraient donc à atteindre des capacités de calcul considérables.

En parallèle, **l'intrication permet de communiquer, c'est-à-dire, cette fois-ci, d'échanger de l'information, de manière sécurisée, à distance**. Les dernières expériences ont montré qu'une paire d'objets quantiques reste intriquée même à des centaines de kilomètres l'un de l'autre. Cela permet de détecter des « intrusions » (perturbations) sur une ligne de communication sensible par exemple, c'est pourquoi la cryptographie est devenue l'un des principaux domaines d'application de l'intrication.

Comme dans l'exemple des horloges atomiques, les **capteurs quantiques** reposent, eux, sur la reproductibilité d'un système quantique mais aussi sur sa sensibilité à l'échelle du système quantique unique. Concrètement, il s'agit, par exemple, de **manipuler des atomes isolés presque individuellement**⁽¹¹⁾ **pour effectuer des mesures de grande précision** (champ électrique, magnétique, de gravité etc...). C'est le cas, notamment, des systèmes à résonance magnétique, et en particulier de leur application à l'imagerie médicale, l'IRM⁽¹²⁾, qui permet d'observer l'intérieur du corps humain de manière non invasive avec un contraste et une précision sans équivalent. Les capteurs quantiques connaissent des développements depuis des décennies, notamment grâce à des progrès techniques qui permettent d'améliorer leur sensibilité et aussi d'élargir leur champ d'applications.

L'informatique : nouveaux besoins et deuxième révolution quantique

Depuis quelques années, **la demande en puissance de calcul n'a cessé de croître**, notamment avec l'explosion récente du « big data »⁽¹³⁾ et le besoin de simulations numériques toujours plus précises.

Jusqu'à maintenant, une des solutions pour répondre à cette demande consistait à utiliser des **supercalculateurs** en parallèle, avec des coûts élevés et une consommation électrique croissante⁽¹⁴⁾. La croissance de la demande pouvait aussi s'appuyer sur une **augmentation exponentielle de la densité de transistors des ordinateurs, suivant la loi de Moore**⁽¹⁵⁾ (cf. encadré). **Ces paradigmes trouvent aujourd'hui leurs limites, rendant nécessaire une rupture technologique.**

La loi de Moore :

En 1965, Gordon E. Moore (un des trois fondateurs d'Intel) énonçait ce que nous appelons maintenant la **loi de Moore**, à savoir que la densité des transistors (nombre de transistors par unité de surface) – dont découle la puissance de calcul des ordinateurs classiques - **pourrait doubler tous les deux ans.**

Cette prédiction s'est révélée étonnamment exacte, et ces dernières années, les finesses de gravure n'ont cessé de diminuer jusqu'à atteindre 10 nm, (1 nm=10⁻⁹ m) en 2017. Cependant, ces progrès atteignent des limites physiques du fait que l'on approche les dimensions de l'atome, et un **palier est attendu pour l'horizon 2020-2022.**

C'est pourquoi la course aux technologies quantiques est maintenant lancée. Au plan des technologies, les capteurs quantiques, déjà considérés comme matures, voient leur gamme d'applications s'élargir et leur précision atteindre des sommets ; les grands industriels américains (IBM, Microsoft, Google), français (Atos) ou asiatique (Alibaba), s'intéressent au calcul quantique, que ce soit pour de nouveaux supports physiques d'information de type quantique ou pour la mise au point d'une algorithmie innovante utilisant les principes quantiques. Enfin, le calcul quantique pourrait avoir des effets collatéraux dans le domaine de la cryptographie et de la sécurisation des données, en remettant en cause les méthodes de chiffrement actuelles, qui doivent être renouvelées par précaution. Ces technologies d'avant-garde mobilisent des investissements massifs, aussi en recherche fondamentale. Même si des grands axes d'applications ont déjà été identifiés (calcul, communications), des avancées ou des découvertes imprévues peuvent découler de cet engouement récent pour ce sujet complexe et pour lequel différentes pistes sont explorées⁽¹⁶⁾.

Les développements informatiques engagés depuis le début des années 2000 constituent la **deuxième révolution quantique**, correspondant à « *un point d'inflexion, passant de la recherche fondamentale théorique à une phase d'ingénierie et de développement* », ce que confirment les acteurs économiques⁽¹⁷⁾.

Des programmes d'investissement dans le monde entier

Les gouvernements suivent ces développements et investissent massivement dans le marché afin de conforter leur influence sur la scène internationale. Ainsi, en 2018, l'**Union Européenne** a prévu de consacrer un milliard d'euros sur 10 ans aux technologies quantiques, via un programme « *FET flagship* »⁽¹⁸⁾, qui fait suite au « *Quantum Manifesto* »⁽¹⁹⁾ déposé auprès de la Commission Européenne en 2016 par 3 000 membres de la communauté scientifique. Les fonds proviennent du programme Horizon 2020 mais aussi de sources nationales. L'intérêt est tel que des pays hors Union Européenne ont aussi rejoint le programme⁽²⁰⁾. Le programme, qui vise à inclure tous les aspects des technologies quantiques, se divise en **quatre domaines d'intérêt, appuyés sur une base commune de science fondamentale :**

- **le calcul quantique**, dont la puissance et la vitesse se trouveraient décuplées grâce au principe de superposition ;

- **la simulation quantique** pour reproduire de manière simplifiée les interactions quantiques entre atomes au sein de molécules ou de cristaux ;

- **les communications** pour échanger de l'information via des protocoles et des supports quantiques ultra-sécurisés ;

- **les capteurs quantiques** dont la précision est telle qu'elle permet des applications industrielles et en recherche fondamentale.

Les résultats du premier appel à projets du *flagship* ont été rendus publics fin octobre 2018 : parmi les vingt projets retenus, treize incluent des laboratoires rattachés au CNRS, deux avec participation d'Atos (Pasquans et Aqtion), et deux coordonnés par des organismes français, Sorbonne Université (projet PhoQuS) et Thales (projet ASTERIQS). La France se place parmi les cinq pays ayant eu les meilleurs taux de réussite⁽²¹⁾.

En complément de leur bon classement, certains pays, tels que l'**Allemagne** ou le **Royaume-Uni**, définissent des programmes nationaux de plusieurs centaines de millions d'euros⁽²²⁾ avec par exemple 650 M€ pour l'initiative allemande et plus de 500 M€ côté britannique. Une partie de ces plans nationaux vise à regrouper des acteurs académiques et des entreprises américaines.

Aux **Pays-Bas**, l'initiative *QuTech*⁽²³⁾, centre de recherche pour le calcul et l'internet quantique situé sur le campus de *TU Delft (Technische Universiteit Delft)*, dispose d'environ 150 M€ sur dix ans, provenant de fonds publics mais aussi des partenariats industriels avec Intel et Microsoft.

En 2016, dans la course internationale, la **Chine** a établi la première ligne de communication quantique depuis le satellite géostationnaire Micius du programme QUESS (*Quantum Experiments at Space Scale*). Ce lancement s'inscrivait dans le plan

quinquennal 2015-2020 comme une priorité pour la Chine, qui prévoit d'utiliser ce satellite pour sécuriser ses communications aussi bien militaires que commerciales. Selon le physicien Jian-Wei Pan, à la tête du projet, la Chine prévoit de mettre au point « un réseau mondial de communications quantiques d'ici 2030 »⁽²⁴⁾. Le programme quantique chinois s'intéresse aussi à l'informatique quantique et aux capteurs avec un nombre élevé de brevets déposés depuis 2015 et en augmentation constante depuis 2010. On estime, avec une forte imprécision, les budgets consacrés à ces deux axes à un milliard d'euros chacun.

Les lignes de communication quantique :

Les récents progrès permettent d'échanger de l'information entre deux utilisateurs distants en utilisant des photons intriqués.

Il est maintenant possible d'envoyer les paires intriquées dans deux fibres optiques partant dans des directions différentes afin d'établir une ligne de communication terrestre.

L'expérience chinoise QUESS a, elle, établi une ligne de communication dite satellitaire entre un satellite en orbite, émetteur de photons intriqués, et deux stations de réception au sol, séparées l'une de l'autre par 1 200 km.

Si les liaisons quantiques terrestres sont encore limitées à une centaine de kilomètres, les liaisons satellitaires ouvrent la voie à des échanges quantiques intercontinentaux et à plus grande échelle.

Aux **États-Unis**, si le secteur privé est déjà présent dans la course avec des investissements des géants des technologies (Google, IBM, Microsoft, Intel), la politique publique ne s'est mise en place que récemment. Ainsi le Congrès américain vient juste d'adopter, en décembre 2018, le *National Quantum Initiative Act*⁽²⁵⁾: ce programme, étalé également sur 10 ans, débutera par un premier plan quinquennal de plus d'un milliard de dollars. Il s'agira **notamment de former rapidement des ingénieurs et des développeurs quantiques, encore peu nombreux face aux perspectives de forte croissance des besoins du secteur**. Le Royaume-Uni insiste également sur cet axe, en réservant près de 200 M€ de son programme national à des programmes de thèses en technologies quantiques et un peu moins de 15 M€ pour former de jeunes chercheurs⁽²⁶⁾.

L'écosystème français

En France, depuis 2017, l'Agence nationale de la recherche (ANR) a instauré un Comité d'évaluation scientifique (CES 47) consacré aux technologies quantiques et doté d'environ 10 M€. À Grenoble, trois laboratoires (CEA-Leti, INAC et Institut Néel) se sont associés autour du projet QuCube afin de développer un processeur quantique à base de

silicium semiconducteur⁽²⁷⁾. Leur projet a été lauréat d'un financement européen ERC *Synergy Grant*, et bénéficiera de 14 M€ sur 6 ans. La région Île-de-France a, elle, reconnu les technologies quantiques comme un « Domaine d'Intérêt Majeur » (DIM), et finance le projet SIRTEQ⁽²⁸⁾ doté d'environ 10 M€ sur 4 ans.

Quelques **initiatives privées se mettent en place en amont d'une initiative nationale d'envergure**, à l'instar du fonds Quantonation⁽²⁹⁾, créée en septembre 2018. Celui-ci vise à lever un total de 40 M€ à investir en 4 ans afin de soutenir des start-up dès leurs débuts⁽³⁰⁾. Atos, de son côté, a investi et commercialise sa QLM (Quantum Learning Machine), seule plateforme de simulation quantique du marché avec des clients aux États-Unis et en Europe. Par ailleurs, IBM a inauguré en décembre 2018 son septième pôle d'excellence mondial, dénommé IBM Q Hub et centré sur le calcul quantique à Montpellier⁽³¹⁾.

Des efforts de transfert de technologie et de valorisation de la recherche se développent aussi dans la recherche française en physique quantique. Ainsi, la start-up Muquans⁽³²⁾, est spécialisée dans les gravimètres⁽³³⁾ quantiques et les horloges atomiques à très haute précision (dérive inférieure à 1 seconde sur 30 millions d'années). De même, la société Quandela⁽³⁴⁾, issue du monde académique (CNRS et Université Paris Saclay), fabrique des sources de photons indiscernables⁽³⁵⁾ pouvant servir de support d'information à un ordinateur quantique dit « optique ».

Conclusions et perspectives

Avec l'engagement de la deuxième révolution quantique, les États comme les industriels de différents pays lancent des plans ambitieux pour anticiper les changements et les opportunités à venir. Ainsi que le montre le programme du *flagship* européen, et sans exclure l'identification d'éventuelles utilisations aujourd'hui inconnues, par sérendipité, cette révolution, d'importance stratégique pour la France et l'Europe, interviendra dans des domaines divers, à l'intersection entre la recherche fondamentale et l'ingénierie, qui feront l'objet de prochaines notes scientifiques, en particulier sur l'informatique et les ordinateurs quantiques, ainsi que sur la cryptographie quantique et post-quantique.

Sites Internet de l'OPECST :

<http://www.assemblee-nationale.fr/commissions/opecest-index.asp>

<http://www.senat.fr/opecest/>

Experts consultés

M. Alain Aspect, physicien à l'Institut d'Optique, membre du Conseil scientifique de l'Office.

Mme Astrid Lambrecht, directrice de recherche au CNRS, directrice de l'Institut de physique du CNRS (INP/CNRS), membre du conseil scientifique de l'Office.

Mme Fanny Bouton, journaliste spécialisée dans les nouvelles technologies.

M. Antoine Browaeys, directeur de recherche à l'Institut d'Optique.

Mme Anne Canteaut, directrice de recherche à l'INRIA, groupe SECRET.

M. Philippe Chomaz, directeur scientifique exécutif de la Direction de la recherche fondamentale au CEA.

M. Thierry Debuisschert, ingénieur de recherche, Thalès.

M. Bruno Desruelle, PDG de la start-up Muquans.

Mme Eleni Diamanti, chargée de recherche au Laboratoire d'Informatique de Paris 6 (LIP6).

M. Philippe Duluc, directeur technique big data & security d'Atos.

M. Daniel Estève, directeur de recherche et chef du groupe Quantronique au CEA.

M. Olivier Ezratty, consultant spécialisé en nouvelles technologies et auteur du blog "Opinion libres".

M. Adrien Facon, chef de file du Programme RISQ, Directeur du groupe Innovation chez Secure IC.

M. Philippe Grangier, Directeur de Recherche CNRS et Responsable du Groupe Optique Quantique à l'Institut d'Optique.

M. Serge Haroche, professeur émérite au Collège de France, prix Nobel de physique 2012.

M. Christophe Jurczak, directeur général du fonds d'investissement Quantonation.

M. Anthony Leverrier, chargé de recherche à l'INRIA, dans le groupe SECRET.

M. Grégoire Ribordy, co-fondateur et PGD de la start-up ID Quantique.

Mme Pascale Senellart, directrice de recherche au Laboratoire de photonique et nanostructures (LPN) du CNRS. Co-fondatrice de la start-up Quandela.

M. Sébastien Tanzilli, Directeur de recherche et chargé de mission au CNRS sur les technologies quantiques.

M. Georges Uzelberger, AI/Advanced Analytics Solution chez IBM France.

M. Benoît Wintrebert, Conseiller en Innovation au Ministère des Armées.

Coordination scientifique de Mme Sarah Tigrine, conseillère scientifique (avec la participation de M. Gaëtan Douéneau).

Ouvrages de référence consultés :

- « Comprendre l'informatique quantique » O. Ezratty, novembre 2018 (e-book)

- Rapport des Académies américaines : National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2018. Quantum Computing : Progress and Prospects. The National Academies Press, Washington, DC. DOI : <https://doi.org/10.17226/25196>.

- « Clefs du CEA » N° 66- juin 2018 « révolutions quantiques »

Nota : en accord avec la déontologue de l'Assemblée nationale, Cédric Villani s'est mis en retrait de sa participation au Conseil scientifique d'ATOS – organe non décisionnel – pour la durée de ses travaux pour l'Office portant sur les technologies quantiques.

(1) Au singulier « quantum », qui vient du latin et qui signifie « combien ». En physique, désigne une quantité insécable (en énergie, en masse...).

(2) Heisenberg a été lauréat du Prix Nobel de physique 1932 pour sa contribution à la création de la mécanique quantique.

(3) Les horloges atomiques se basent sur la fréquence immuable de la transition entre les niveaux d'énergie du césium 133. Depuis 1967, cette fréquence sert aussi de référence pour fixer la seconde qui devient ainsi la durée au cours de laquelle 9 192 631 770 oscillations à la fréquence de cette transition ont lieu

(4) Pour comparaison, une montre à quartz classique dérive de 1 seconde par jour tandis que pour une horloge atomique la dérive est de 10 ns par jour (dix milliardièmes de seconde). Une désynchronisation de 1 seconde induit une erreur de position GPS de 300 000 km.

(5) Le mot "laser" est l'acronyme de "light amplification by stimulated emission of radiation". Le principe de base du laser repose sur la désexcitation d'un atome, stimulée par un apport d'énergie (lumineuse) correspondant à l'énergie de transition entre deux états électroniques. La mécanique quantique pose que ces niveaux sont discrets et parfaitement définis. Le photon émis par désexcitation s'ajoute au champ lumineux incident, ce qui crée le phénomène d'amplification.

(6) Richard Feynman, « *Simulating Physics with Computers* », International Journal of Theoretical Physics, vol. 21, nos 6–7, 1982, p. 467–488

(7) L'algorithme de Deutsch-Jozsa, qui sert à résoudre un problème de classification et qui n'a pas un grand intérêt pratique, constitue néanmoins le premier exemple d'algorithme quantique « utile » concrètement mis en œuvre.

(8) L'algorithme de Shor permet de factoriser un nombre, i.e. l'écrire comme un produit de nombres premiers (par exemple $15 = 3 \times 5$), en un temps exponentiellement plus rapide que les algorithmes classiques. Si cet algorithme venait à être implémenté sur une machine quantique performante, les protocoles de chiffrement actuels, qui reposent sur la difficulté du problème de factorisation, seraient alors mis en échec très rapidement.

(9) Les expériences menées par Alain Aspect au début des années 1980 sont souvent appelées les « expériences EPR » car elles répondent au paradoxe d'Einstein-Podolsky-Rosen (EPR), publié en 1935. Elles concernent le phénomène d'intrication quantique, avancé théoriquement par Niels Bohr. Einstein et ses collègues pensaient que l'intrication violait les lois de la physique, et plus particulièrement de la localité, et que le formalisme de la mécanique quantique était incomplet. Le débat est resté sans réponse jusqu'en 1964, quand John Bell, théoricien au CERN à Genève, publia un théorème, connu sous le terme « d'inégalités de Bell », qui permet de vérifier ce concept par l'expérience. C'est ce que fera Alain Aspect en 1981 en violant les inégalités de Bell et en apportant une preuve irréfutable de l'intrication entre une paire de photons.

(10) À titre d'exemple, pour $N=10$ bits quantiques, il existe alors $2^{10}=1024$ états possibles simultanément et pour $N=50$, on atteint $2^{50} \approx 10^{15}$ états superposés, soit un million de milliards.

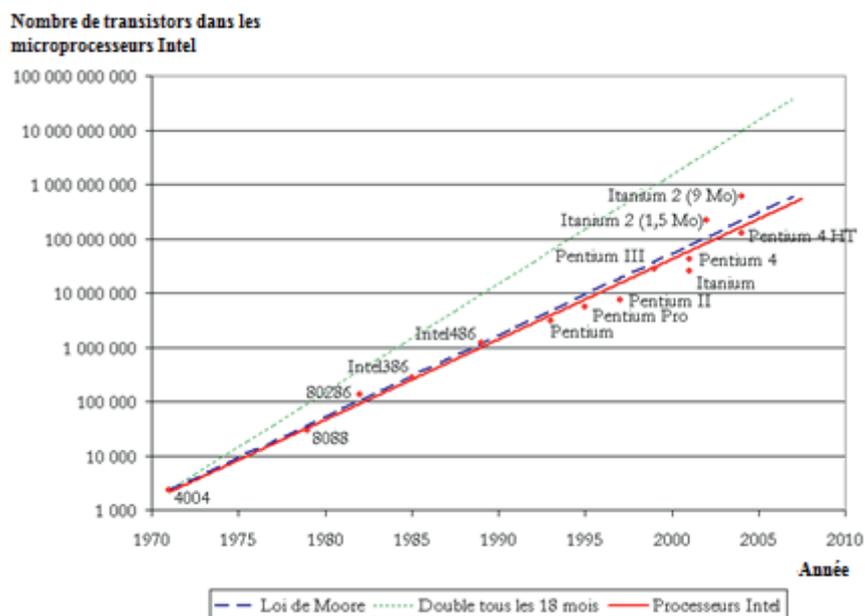
(11) Pour isoler un atome, deux techniques peuvent être mentionnées : le refroidissement (par hélium liquide à une température proche de -273 K soit le zéro absolu) ou le piégeage de l'atome dans une matrice de cristal (principe des « centres NV », dans lesquels un atome d'azote N est piégé dans une matrice de diamant).

(12) Grâce à un champ magnétique puissant, produit par un aimant supraconducteur, les tissus humains sont magnétisés en alignant leurs spins magnétiques. Couplé à un champ magnétique moins intense et oscillant, les spins ont alors un mouvement de précession qui produit un signal électromagnétique mesurable. Réalisé pour la première fois sur des êtres humains dans les années 1970, le principe de l'IRM a valu à ses inventeurs, Paul Lauterbur et Peter Mansfield le prix Nobel de physiologie ou médecine en 2003.

(13) On estime que, d'ici 2020, 1,7 mégaoctet (Mo) de données seront créées par seconde et par personne. Ceci représente le poids d'un fichier au format compressé MP3 d'une chanson d'environ 2 minutes.

(14) Même si les États-Unis et l'Asie restent clairement les leaders sur le marché des supercalculateurs, la France, qui dispose de la machine BullSequana créée par ATOS et opérée par le CEA, se place au 16^e rang mondial (données de novembre 2018). Sa consommation électrique, optimisée, s'élève à 4 MW ce qui correspond à la puissance maximale d'une éolienne offshore. La machine chinoise Taihulight, consomme elle 15 MW pour une facture énergétique de l'ordre de 22 millions d'euros par an (données 2017).

(15) Comparaison entre l'évolution réelle de la densité de transistors dans les processeurs informatiques (courbe rouge) et les prédictions de la loi de Moore depuis les années 1970 (courbe bleue, la courbe verte correspondant aux premières prévisions qui ont été réajustées depuis) :



Adapté de : Par Original téléversé par QcRef87 sur Wikipédia français. — Transféré de fr.wikipedia à Commons par Bloody-libu utilisant CommonsHelper., CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16066564>

(16) À titre d'exemple, Microsoft mise sur le calcul quantique à base de « fermion de Majorana », approche dénommée « informatique quantique topologique » et décrite par l'équipe de Michael Freedman (lauréat de la médaille Fields 1986). L'existence de cette particule, qui serait sa propre antiparticule, a été proposée par le physicien E. Majorana, mais n'a encore jamais été détectée de manière certaine. Cependant, si elle venait à être découverte, elle permettrait de mettre au point l'ordinateur quantique le plus fiable et le plus performant du marché actuel. <https://experiences.microsoft.fr/technique/intelligence-artificielle-ia-technique/informatique-quantique-pari-fou/>

(17) <https://www.morganstanley.com/ideas/quantum-computing>

(18) FET : Technologies futures émergentes - <http://www.horizon2020.gouv.fr/cid123504/1er-appel-du-fet-flagship-sur-les-technologies-quantiques.html>

(19) http://quope.eu/system/files/u7/93056_Quantum%20Manifesto_WEB.pdf

(20) Turquie, Israël et Suisse.

(21) Avec, sans surprise, l'Allemagne, le Royaume Uni, l'Italie et l'Espagne.

<http://www.cnrs.fr/fr/premiers-laureats-pour-linitiative-europeenne-sur-les-technologies-quantiques>

(22)

Pays (UE)	Montant (millions d'euros)	Pays (Hors UE)	Montant (millions d'euros)
Allemagne	650	Chine	~2 000
Royaume Uni	450	États Unis	1 000
Pays Bas	150		

Plans nationaux de financement public des technologies quantiques en Europe et dans le monde

(23) <https://qutech.nl/>

(24) <https://www.diplomatie.gouv.fr/fr/politique-etrangere-de-la-france/diplomatie-scientifique/veille-scientifique-et-technologique/chine/article/lancement-du-premier-satellite-a-communication-quantique-guess>

(25) <https://www.diplomatie.gouv.fr/fr/politique-etrangere-de-la-france/diplomatie-scientifique/veille-scientifique-et-technologique/etats-unis/article/national-quantum-initiative-act-le-retour-des-etats-unis-dans-la-course-aux>

(26) <https://www.diplomatie.gouv.fr/fr/politique-etrangere-de-la-france/diplomatie-scientifique/veille-scientifique-et-technologique/royaume-uni/article/financement-de-la-recherche-en-technologie-quantique>

(27) <http://www.cea.fr/presse/Pages/actualites-communiques/sciences-de-la-matiere/Un-ERC-Synergy-Grant-pour-la-recherche-grenobloise-sur-les-technologies-quantiques.aspx>

(28) <http://www.sirteq.org>

(29) <https://www.quantonation.com/fr/>

(30) Quantonation a déjà réalisé des investissements en France en particulier dans LightOn et dans Pasqal, la toute première start-up nationale dédiée à la réalisation d'un ordinateur quantique, fondé sur la technologie d'excellence française du refroidissement d'atomes par laser.

(31) <https://www-03.ibm.com/press/fr/fr/pressrelease/54572.wss>. Ce projet ambitionne de fédérer un réseau d'entreprises, d'organisations publiques et d'acteurs de la recherche et de l'enseignement supérieur utilisant les ressources quantiques d'IBM disponibles dans le cloud.

(32) <https://www.muquans.com/>

(33) Un gravimètre est un instrument de mesure destiné à quantifier le champ de pesanteur terrestre.

(34) <http://quandela.com/>

(35) Des photons sont dits « indiscernables » quand ils sont considérés comme identiques à tout point de vue.

Site de l'Université de Sherbrooke :

<https://www.usherbrooke.ca/actualites/nouvelles/societe/details/49253>

10 janvier 2023

Révolution quantique : notre société est-elle prête?

Isabelle Lacroix et Christian Sarra-Bournet

Les avancées technologiques en quantique représentent un changement de paradigme tant leur potentiel est grand. Comment déployer ces technologies de rupture sans créer un déséquilibre social et économique?

À l'Institut quantique de l'Université de Sherbrooke, comme ailleurs sur la planète, cette préparation passe par un dialogue constructif entre, notamment, les disciplines.

Rencontre mariant éthique et quantique avec Isabelle Lacroix, vice-doyenne au développement et à l'international à la Faculté des lettres et sciences humaines et professeure à l'École de politique appliquée, et Christian Sarra-Bournet, directeur administratif de l'Institut quantique de l'Université de Sherbrooke.

La science quantique va changer le monde. Cette révolution sera-t-elle aussi importante que l'arrivée des téléphones intelligents dans vos vies?

[M. Sarra-Bournet] Je crois que le potentiel est plus grand, mais il ne sera pas apparent dans la vie de tous les jours.

Les technologies quantiques sont vraiment des outils incroyables pour pouvoir continuer notre poursuite de l'avancement des connaissances. Comprendre l'univers, le monde dans lequel on vit, la nature...

Mais, si la science quantique nous permet de faire avancer les connaissances, ce sont les technologies qui en découleront qui changeront véritablement notre quotidien.

Par exemple, à l'aide d'un ordinateur quantique ayant un nombre considérable de qubits tolérants aux fautes, on pourra envisager un développement plus rapide de nouveaux médicaments. Est-ce que c'est le nouveau médicament qui aura un impact sur nos vies, ou l'arrivée de l'ordinateur quantique? En soi, la science quantique n'aura pas de répercussions directes sur la vie de tous les jours.

On peut faire un parallèle avec l'intelligence artificielle : une personne qui voit son parcours d'autobus optimisé ne dira pas que l'intelligence artificielle a amélioré son quotidien. Elle se dira simplement que c'est agréable d'avoir accès à cette technologie!

Parmi toutes les technologies quantiques qui seront développées, l'ordinateur quantique est celle dont le déploiement représente un plus grand enjeu éthique. Pourquoi?

[Pre Lacroix] Le potentiel de l'ordinateur quantique tel qu'on nous l'explique à nous, gens qui ne relèvent pas de ce domaine, c'est qu'il nous permettra d'accomplir des choses que nous sommes

incapables de faire présentement, et que cela va rendre obsolètes les autres technologies qui pourraient partager le marché économique ou social.

[M. Sarra-Bournet] Oui, c'est la technologie quantique qui aura le plus gros impact quand on réfléchit à ce qu'il permettra de réaliser. Le problème, c'est qu'on n'a pas de point de comparaison pour s'y préparer.

[Pre Lacroix] Mais il ne s'agit pas de dire que les technologies quantiques représentent un danger imminent et que notre monde risque de s'écrouler. Bien sûr, il faut se préoccuper des effets négatifs, mais il y a surtout une potentialité de retombées positives sur nos sociétés.

Que pouvons-nous faire dès maintenant pour nous assurer que ces technologies, dont l'ordinateur quantique, seront utilisées à bon escient?

[Pre Lacroix] Il faut s'assurer que la technologie soit placée entre les mains des bonnes personnes, soit un nombre critique d'individus qui ont l'objectif d'améliorer véritablement le bien commun.

Ce qu'on ne voudrait pas, c'est que l'ordinateur quantique soit contrôlé par une poignée de grandes entreprises ayant une mainmise sur l'ensemble du marché économique, voire une mainmise sur la sécurité de nos États. L'idéal, c'est que l'accès à cette technologie soit réparti entre de nombreuses entreprises qui peuvent se mettre au service du bien commun.

Prenons l'exemple des nouveaux médicaments. S'il y a trois entreprises qui réussissent à offrir ce service et que seules 14 personnes riches sur la planète sont en mesure de se payer ce traitement, on n'aura pas atteint l'objectif d'améliorer la vie de milliers de personnes avec cette technologie.

Pour éviter ce scénario, il faut dès maintenant établir un dialogue, d'abord entre disciplines. Par exemple, l'Institut quantique de l'Université de Sherbrooke m'a invitée en octobre dernier pour animer un webinaire sur les enjeux éthiques et politiques des sciences quantiques, parce que les gens de cet institut s'intéressent à ce que font les décideurs dans cet écosystème-là.

L'Institut quantique de l'Université de Sherbrooke a bien compris l'importance d'agir en amont. Quelles sont ses initiatives?

[M. Sarra-Bournet] Ce qu'on fait à l'Institut quantique et que d'autres essaient aussi de faire, c'est justement de démarrer ce dialogue-là. On participe notamment au Canadien Science Policy Conference. On a aussi organisé des activités avec l'Acfas, l'International Government Science Advice (INGSA) et le Fonds de recherche du Québec (FRQ) dans le but d'amener ce sujet sur la scène publique. De plus, au niveau du gouvernement fédéral, je participe à un panel d'experts qui se penche sur ce type de considérations.

Parmi les initiatives plus récentes, l'institut GESDA à Genève a lancé il y a quelques mois The Open Quantum Institute, une entité sans but lucratif ouverte à cette discussion à l'échelle internationale. Sa mission est de faire en sorte que les technologies quantiques soient développées pour le bien commun et non seulement pour des intérêts personnels, commerciaux ou nationalistes. C'est une initiative qui a lieu actuellement, et l'Institut quantique y participe.

Les pays travaillent donc déjà ensemble pour contrer ces enjeux potentiels?

[Pre Lacroix] À vrai dire, cette conversation entre les disciplines est tout à fait réaliste dans un environnement démocratique comme le Canada, les États-Unis, l'Allemagne et la Grande-Bretagne. Mais cette course internationale pour la maîtrise des technologies quantiques se fait aussi avec des États qui ne sont pas dans cet esprit démocratique, et cette réalité doit être prise en considération. Pensons à la Chine, qui veut être une force en cette matière, mais qui ne joue pas selon les mêmes règles que nous.

Maintenant que ce dialogue est ouvert entre les disciplines, quelle est la prochaine étape?

[Pre Lacroix] Quand on dit à des citoyens, à des groupes de la société civile ou à des décideurs « Ça va être gros, mais je n'ai aucune idée de ce que ça va être », les gens se disent « Parfait, on s'en reparle quand tu le sauras ». C'est normal, vous savez, les politiques publiques, il faut toujours bien avoir quelque chose à régler pour les créer.

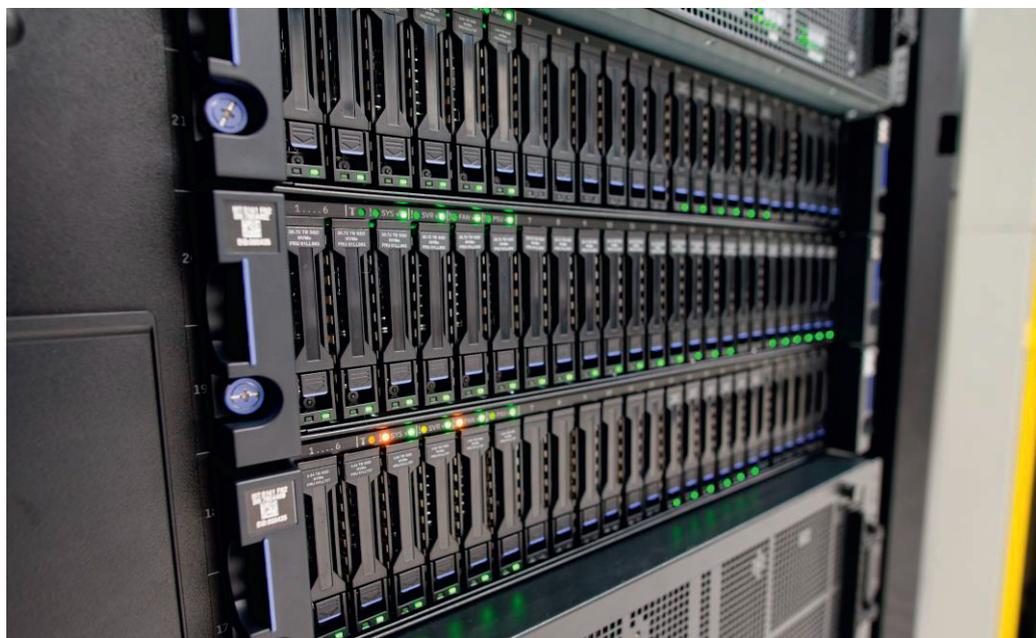
Toutefois, pour la question des technologies quantiques, il faut amener les groupes, la société civile et les décideurs à construire immédiatement des balises sur lesquelles on va tabler pour cadrer ce qui va devenir concret. Autrement dit, il faut les amener à se dire « Attendez, minute! Moi, je ne vais pas juste enrichir Google, il faut que ces technologies servent à autre chose! ».

Les appareils politiques sont censés être le gardien de l'équité. L'équité entre les individus, entre les entreprises, entre les nations, entre les êtres humains. Il faut dès maintenant, en même temps qu'on fait avancer les connaissances, qu'on fasse avancer cette réflexion.



L'Ifremer modernise Datarmor, le super-calculateur dédié aux données scientifiques sur l'océan en France

Les nouvelles techniques d'études de l'océan génèrent une quantité importante de données scientifiques issues d'instruments de mesure et de simulations numériques de plus en plus précises et gourmandes en temps de calcul et en stockage des données. Pour s'adapter à ces besoins croissants, l'Ifremer a entamé le renouvellement des infrastructures du centre de calcul haute performance Datarmor, le seul en France dédié à l'océan, au sein du Centre Ifremer Bretagne à Plouzané (Finistère).



Les infrastructures du centre Datarmor réunissent au sein du Centre Ifremer Bretagne (Plouzané, Finistère) des données issues d'observations sur tous les océans, de l'espace aux grands fonds marins. – Olivier Dugornay. Ifremer.

Contact presse

Julie Danet /
Alexis Mareschi
06 07 84 37 97 /
06 15 73 95 29
presse@ifremer.fr

www.ifremer.fr

 Ifremer_fr
 ifremer.fr
 ifremer_officiel

Les scientifiques collectent au quotidien des données précieuses sur l'océan, de nature et de sources différentes : observation de l'océan par satellite, cartographie des fonds marins par les navires océanographiques, mesures physico-chimiques et images collectées par les engins et observatoires sous-



marins, relevés des bouées instrumentées et des flotteurs, signalement par les réseaux d'observateurs, etc. Depuis 2017, l'Ifremer fédère les acteurs de la recherche océanographique en garantissant le stockage des données scientifiques et leur analyse grâce au supercalculateur Datarmor, le seul centre de données entièrement dédié au domaine marin en France.

Le centre de calcul Datarmor dispose actuellement d'une puissance de calcul de 426 téraflops (l'équivalent de 2 à 3 000 ordinateurs individuels réunis), d'une capacité de stockage de 10 péta-octets (10 millions de giga-octets) et de 4 supercalculateurs dédiés à l'intelligence artificielle. L'articulation de ces trois fonctions en font une infrastructure informatique originale entièrement adaptée à l'étude et à la modélisation de phénomènes environnementaux, qui permet de réaliser des simulations numériques de l'océan et ses évolutions.

Pour répondre aux besoins croissants des techniques de modélisation et garantir à la communauté scientifique l'accès à un équipement de pointe en matière de stockage des données et de puissance de calcul, l'Ifremer a entamé en 2023 la modernisation des infrastructures du centre Datarmor. Cet été, la plate-forme a été dotée de solutions de stockage de forte capacité nouvellement développées par les constructeurs IBM et NetApp.

« En nous équipant de matériel et de solutions logicielles nouvellement introduits sur le marché, nous nous assurons de maintenir le pôle à la pointe des capacités techniques disponibles et de profiter le plus longtemps possible du cycle de vie de ces équipements, **explique Benoît Morin, responsable de la plateforme Datarmor.** Ce nouveau matériel s'inscrit également dans une démarche éco-responsable : au terme du renouvellement, Datarmor disposera d'un parc de données de 60 péta-octets, soit 6 fois la capacité de stockage actuelle pour une consommation d'énergie identique. »

L'infrastructure s'inscrit dans une stratégie européenne et nationale d'analyse des données scientifiques, mais également dans le rayonnement scientifique de la région Bretagne. Son renouvellement est soutenu par l'État et la Région Bretagne dans le cadre du « Contrat de Plan État-Région 2021-2027 » (CPER) de Bretagne à hauteur de 4,5 millions d'euros, et du [projet Equipex+ GAIA-Data](#), porté notamment par l'infrastructure de recherche nationale [Data Terra](#), à hauteur de 1,2 millions d'euros ([3^{ème} Programme d'Investissements d'Avenir](#) opéré pour le compte de l'Etat par l'ANR), désormais intégrés au plan France 2030.

FACILITER L'ACCÈS AUX OUTILS DE CALCUL ET AUX DONNÉES POUR LES SCIENTIFIQUES

La plateforme Datarmor occupe une position stratégique dans l'écosystème scientifique national et européen, puisqu'elle permet de garantir aux chercheurs des universités et instituts de recherche français un accès gratuit à un outil de haute performance pour l'analyse des données des sciences océaniques.

« Les réseaux d'observation, les satellites et les modélisations fournissent une grande quantité de données météorologiques et océanographiques, et l'enjeu est de s'assurer que ces données restent actives, **explique Bertrand**

Contact presse

Julie Danet /
Alexis Mareschi
06 07 84 37 97 /
06 15 73 95 29
presse@ifremer.fr

www.ifremer.fr

Ifremer_fr
 ifremer.fr
 ifremer_officiel



Chapron, chercheur en océanographie satellitaire à l’Ifremer. Datarmor permet de consulter rapidement ces données archivées et de les comparer par exemple avec des relevés plus récents, pour identifier les phénomènes récurrents et mieux comprendre l’évolution du climat. »

Le pôle de calcul de l’Ifremer a mis en place une cellule d’ingénieurs dédiée à l’accompagnement des chercheurs pour utiliser au mieux les capacités techniques du centre Datarmor. Plus disponible et plus proche des scientifiques, elle assure un rôle d’intermédiaire avec les très grands centres nationaux comme le pôle national de données Océan, [ODATIS](#), et contribue à l’observation et la compréhension du système Terre, de la biodiversité et de l’environnement.

Contact presse

Julie Danet /
Alexis Mareschi
06 07 84 37 97 /
06 15 73 95 29
presse@ifremer.fr

www.ifremer.fr

 Ifremer_fr
 ifremer.fr
 ifremer_officiel

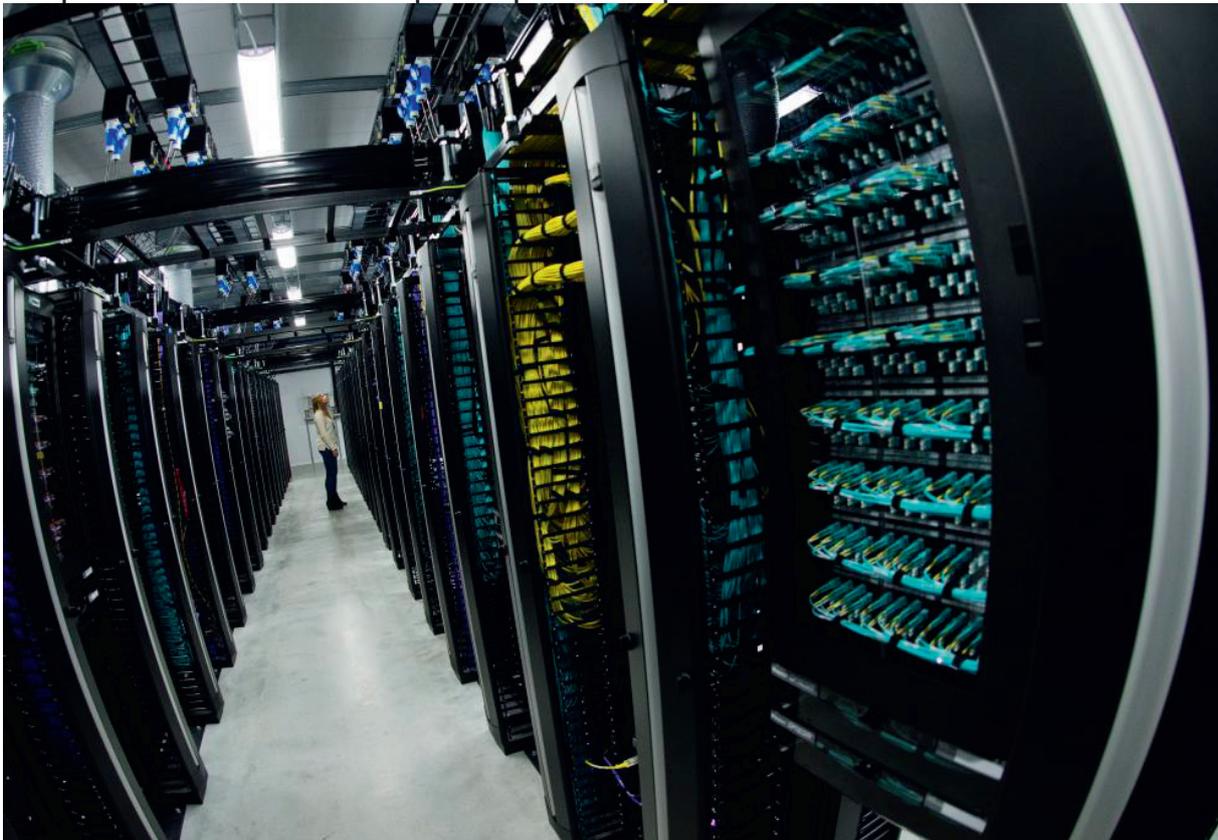
ARTICLE D'ACTUALITÉ

4 octobre 2022

Site internet de la Représentation de la Commission européenne en France

L'UE déploie la première technologie quantique sur six sites à travers l'Europe

Aujourd'hui, l'entreprise commune pour le calcul à haute performance européen (EC EuroHPC) a annoncé la sélection de six sites qui accueilleront les premiers ordinateurs quantiques européens.



Aujourd'hui, l'entreprise commune pour le calcul à haute performance européen (EC EuroHPC) a annoncé la sélection de six sites qui accueilleront les premiers ordinateurs quantiques européens. Ces sites se trouvent en Tchéquie, en Allemagne, en Espagne, en France, en Italie et en Pologne. Ils seront intégrés sur place dans les supercalculateurs existants et constitueront un vaste réseau dans toute l'Europe. L'investissement total prévu s'élève à plus de 100 millions d'euros, dont une moitié provient de l'UE et l'autre des 17 pays participant à l'EC EuroHPC. Les chercheurs universitaires et l'industrie, où qu'ils se trouvent en Europe, pourront accéder à ces six ordinateurs quantiques basés sur une technologie européenne de pointe.

Les nouveaux ordinateurs quantiques permettront également de répondre aux besoins croissants de l'industrie et du monde universitaire européens en matière de ressources informatiques quantiques et de nouveaux services potentiels. Ils seront capables de résoudre des problèmes

complexes liés à des domaines tels que la santé, le changement climatique, la logistique ou l'utilisation de l'énergie en quelques heures, alors que les systèmes actuels nécessitent des mois, voire des années, tout en consommant beaucoup plus d'énergie.

Margrethe Vestager, vice-présidente exécutive pour une Europe adaptée à l'ère du numérique, a déclaré : *«Voici un exemple de projet européen par excellence. Grâce à la mise en commun de ressources et de savoir-faire, nous pouvons jouer un rôle moteur dans un domaine essentiel pour l'avenir de notre société numérique. Cela contribue à la lutte que nous menons contre le changement climatique. Et il s'agit d'une étape essentielle dans notre volonté de déployer en Europe une infrastructure de supercalcul et d'informatique quantique de classe mondiale accessible dans toute l'UE.»*

Les nouveaux ordinateurs quantiques devraient être disponibles sur les six sites susmentionnés d'ici au second semestre de 2023. Ils soutiendront un large éventail d'applications présentant un intérêt industriel, scientifique et sociétal pour l'Europe:

- Développement beaucoup plus rapide et efficace de nouveaux médicaments, avec la création d'un «jumeau numérique» d'un corps humain sur lequel, par exemple, seront menés des essais virtuels de médicaments.
- Résolution de problèmes logistiques et de programmation complexes afin d'aider les entreprises à économiser du temps et du carburant.
- Développement et essai, dans un environnement virtuel, de nouveaux matériaux tels que des polymères pour avions, des convertisseurs catalytiques pour voitures, des cellules solaires ou des supraconducteurs à température ambiante qui pourraient stocker de l'énergie indéfiniment.

Ces nouveaux ordinateurs quantiques nous aideront à atteindre nos objectifs de la décennie numérique, à savoir disposer de notre premier ordinateur à accélération quantique d'ici à 2025 et être à la pointe des capacités quantiques d'ici à 2030.

Il s'agit d'une initiative purement européenne: ces machines seront entièrement constituées de matériel et de logiciels européens, tirant parti de la technologie européenne développée dans le cadre d'initiatives quantiques financées par l'UE, de programmes de recherche nationaux et d'investissements privés.

Prochaines étapes

L'annonce faite aujourd'hui s'inscrit dans le cadre d'un effort plus important dans le cadre duquel l'UE travaille à l'intégration des ordinateurs quantiques et des simulateurs européens en tant qu'accélérateurs de son infrastructure de supercalcul. D'autres ordinateurs quantiques seront achetés dans le futur. Afin de poursuivre le développement de l'informatique quantique, et plus particulièrement des logiciels quantiques, la Commission prévoit de créer des centres d'excellence pour la science et l'industrie axés sur les cas d'utilisation tant académique qu'industrielle pour les simulateurs et les ordinateurs quantiques.

Ces centres, qui s'adressent à tous les acteurs de l'industrie, du monde universitaire et plus largement à tous les utilisateurs des technologies quantiques, serviront de référence pour les applications quantiques universitaires et industrielles, fourniront des services, un soutien et des bibliothèques aux organisations en Europe, à l'instar des actuels centres d'excellence pour le calcul à haute performance.

Contexte

Les 17 pays de l'entreprise commune EuroHPC participant à cette initiative quantique sont les suivants: Belgique, Tchéquie, Danemark, Allemagne, Irlande, Espagne, France, Italie, Lettonie, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Slovénie, Finlande, Suède et Norvège.

Entreprise commune pour le calcul à haute performance européen

L'entreprise commune pour le calcul à haute performance européen (EC EuroHPC) est une entité juridique et financière créée en 2018 pour permettre à l'UE et aux pays participant à EuroHPC de coordonner leurs efforts et de mettre en commun leurs ressources dans le but de faire de l'Europe un leader mondial en matière de supercalcul. En juillet 2021, le Conseil a adopté le règlement relatif à l'entreprise commune EuroHPC, qui prévoit un investissement supplémentaire de 7 milliards d'euros.

L'entreprise commune EuroHPC a déjà financé le projet hybride de calcul à haute performance et de simulateur quantique (HPCQS), qui a débuté fin 2021. Ce projet vise à intégrer deux simulateurs quantiques, chacun contrôlant plus de 100 bits quantiques (qubits), dans deux supercalculateurs déjà existants:

- le supercalculateur Joliot Curie de GENCI, l'organisme national français de supercalcul, situé en France;
- le supercalculateur JUWELS du centre de supercalcul de Jülich, situé en Allemagne.

Ce faisant, HPCQS deviendra un incubateur unique au monde pour le calcul hybride supercalcul-calcul quantique.

Initiative phare sur les technologies quantiques

En 2016, les acteurs européens du secteur quantique ont publié le manifeste quantique, ce qui a conduit, en 2018, au lancement de l'initiative collaborative de recherche et d'innovation financée à hauteur d'un milliard d'euros par l'UE sur 10 ans: l'initiative phare sur les technologies quantiques.

La prochaine phase de l'initiative phare sur les technologies quantiques (financée au titre d'Horizon Europe) est lancée. Elle consolidera et développera la primauté européenne en matière de recherche dans le domaine des technologies quantiques et rapprochera les résultats de la recherche de l'exploitation industrielle. Les projets de l'initiative phare sur les technologies quantiques créent et développent des technologies pour des activités en aval, telles que le déploiement d'ordinateurs quantiques et de simulateurs dans EuroHPC ou le déploiement d'une infrastructure de distribution de clés quantiques (QKD) dans le cadre de l'initiative EuroQCI (infrastructure européenne de communication quantique).

Source : <https://home.cern/fr/news/news/computing/bringing-quantum-computing-society>
site internet du CERN

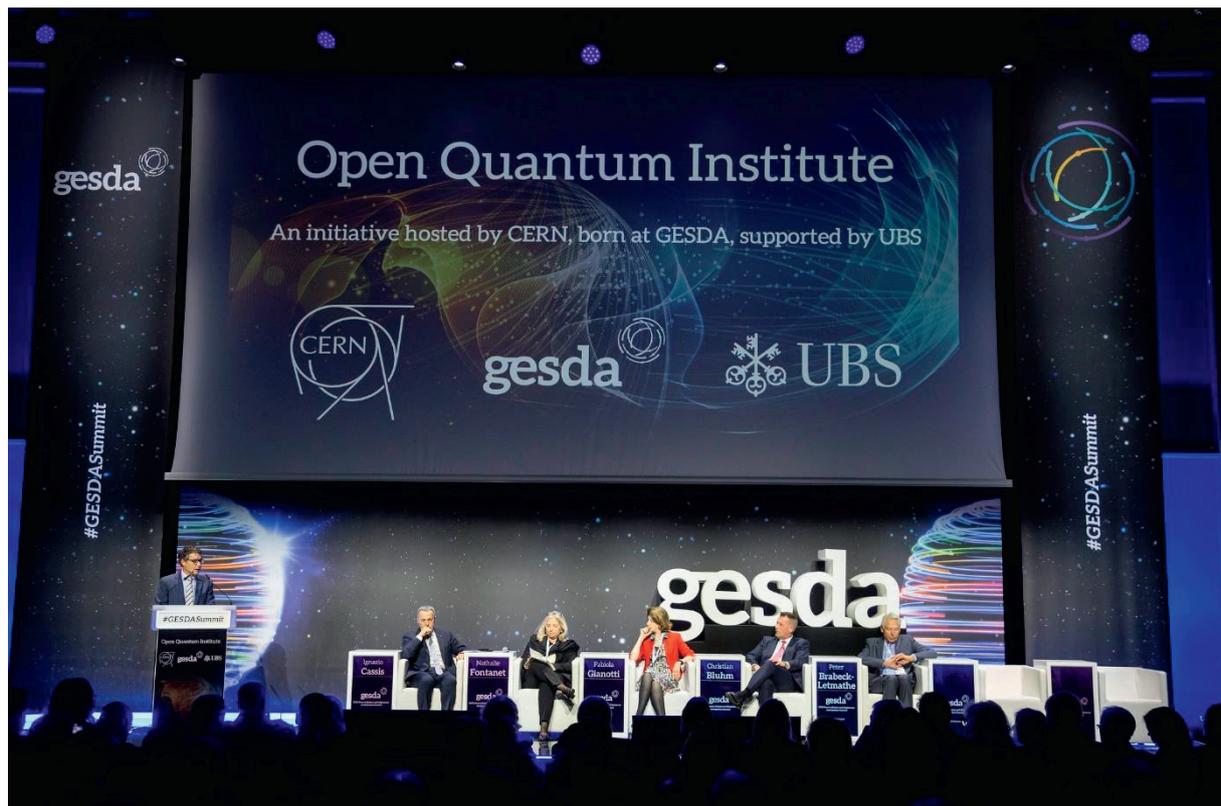
L'informatique quantique au service de la société

Un nouveau programme triennal basé au CERN, appelé « Institut ouvert de technologie quantique » a pour vocation de rendre largement disponibles les ressources d'informatique quantique et l'expertise technologique en la matière

16 OCTOBRE, 2023

|

Par Antonella Del Rosso



Annnonce du lancement de l'Open Quantum Institute le 13 octobre lors du sommet GESDA. (Image: GESDA/von Loebell)

Un nouveau programme triennal basé au CERN permettra de mettre les ressources d'informatique quantique et l'expertise technologique associée au service de projets destinés à soutenir les objectifs de développement durable des Nations Unies (ODD).

Le nouveau programme est appelé Institut ouvert de technologie quantique (*Open Quantum Institute -- OQI*). Accueilli par le CERN, l'OQI a été créé à l'initiative de la Fondation GESDA (*Geneva Science and Diplomacy Anticipator*) en collaboration avec quelque 130 experts, et il sera financé par l'UBS en tant que partenaire d'impact principal. L'annonce de la phase pilote de trois ans a été faite le 13 octobre 2023 lors du sommet GESDA 2023 et le programme s'inscrira pleinement dans l'initiative Technologie quantique (QTI) à compter du 1er mars 2024.

L'OQI sera, de facto, la branche sociétale de l'initiative QTI, qui a été créée au CERN en 2018 et est gérée par le département IT. Aujourd'hui, l'initiative QTI mobilise plusieurs scientifiques des départements et des expériences du CERN, autour de quatre domaines et applications principaux : l'informatique et les algorithmes quantiques ; la simulation quantique et le traitement de l'information ; la détection, la métrologie et les matériaux quantiques, ainsi que la communication et les réseaux quantiques.

L'objectif principal de l'OQI est de trouver des moyens de permettre à l'informatique quantique d'avoir l'impact le plus large possible sur la société en promouvant et en facilitant l'accès aux ressources d'informatique quantique et à l'expertise technologique associée. Grâce à l'OQI, les technologies de pointe naissantes seront également accessibles aux populations des régions mal desservies, ce qui contribuera à réduire une éventuelle nouvelle fracture numérique.

« Les ODD de l'ONU représentent le point de vue collectif de la communauté internationale sur les plus grands défis sociétaux d'aujourd'hui, explique Enrica Porcari, chef du département IT du CERN. C'est pourquoi nous sommes fiers d'accueillir l'OQI au CERN et de mettre à disposition une plateforme permettant de transcender les frontières géographiques et disciplinaires en exploitant la puissance de l'informatique quantique afin de répondre aux objectifs de développement durable des Nations Unies. Avec sa longue tradition de collaboration transfrontalière et de partage des connaissances, le CERN est l'endroit idéal pour accueillir la phase pilote de l'OQI et réaffirmer publiquement que l'innovation n'a pas de frontières. L'OQI renforcera l'image du CERN en tant qu'institution scientifique au service de la société, dans les États membres et États membres associés et au-delà, en aidant à répondre à certains des défis les plus urgents de l'humanité. Il contribuera au développement des réseaux du CERN à l'appui du transfert de connaissances, de l'éducation et de la formation dans le domaine des technologies quantiques ».

La fondation GESDA et ses partenaires ont mis en place une phase d'incubation pour l'OQI, qui a débuté il y a un an et qui mobilise des représentants du monde universitaire, du

secteur privé et de gouvernements, ainsi que de jeunes spécialistes, en vue d'identifier ensemble de futurs projets potentiels. *« Cette phase préparatoire nous a permis de concevoir une plateforme axée sur des éléments spécifiques, qui accélère réellement le potentiel de l'informatique quantique pour la société »*, confirme Enrica Porcari. L'optimisation de la chaîne d'approvisionnement alimentaire par l'informatique quantique pour une meilleure sécurité alimentaire (en lien avec l'ODD 2, faim « zéro »), une imagerie médicale plus précise grâce à des solutions d'apprentissage automatique quantique (en lien avec l'ODD 3, bonne santé et bien-être) et la simulation par informatique quantique pour améliorer le processus de catalyse intervenant dans la fixation du carbone à la surface des matériaux, réduisant ainsi le CO₂ dans l'atmosphère (en lien avec l'ODD 13, lutte contre les changements climatiques) sont autant d'exemples de cas d'utilisation potentiels à explorer en tant que projets au cours de la phase pilote de l'OQI.

Durant les trois années de sa phase pilote, l'Institut ouvert de technologie quantique soutiendra trois ou quatre projets ciblant des cas d'utilisation liés aux objectifs de développement durable des Nations Unies. Il jettera également les bases de la prochaine phase du programme et pourrait devenir une référence pour d'autres initiatives destinées à déployer les technologies quantiques pour le bien commun.

Qui sommes nous ?

Le CERN est aujourd'hui l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire. » À l'origine, l'acronyme correspondait à « Conseil européen pour la recherche nucléaire », un organe provisoire institué en 1952, qui avait pour mandat de créer en Europe une organisation de rang mondial pour la recherche en physique fondamentale. » À l'époque, la recherche en physique fondamentale avait pour principal objectif la compréhension de l'intérieur de l'atome, c'est-à-dire du noyau, d'où l'emploi du qualificatif « nucléaire ».

Lorsque le Laboratoire vit officiellement le jour, en 1954, le Conseil provisoire fut dissous et la nouvelle organisation fut baptisée Organisation européenne pour la recherche nucléaire. L'acronyme CERN fut toutefois conservé.

Aujourd'hui, notre compréhension de la matière va au-delà du noyau, et le principal domaine de recherche du CERN est la physique des particules, à savoir l'étude des composants fondamentaux de la matière ainsi que des forces auxquelles ils sont soumis. C'est pourquoi le CERN est souvent appelé « Laboratoire européen pour la physique des particules ».

Les enjeux de la physique quantique et les ruptures à anticiper

David DESJARDINS

| Colonel (air), auditeur de la 69^e session du CHEM.

Comme l'a rappelé le président de la République Emmanuel Macron l'occasion de son discours sur la stratégie de défense et de dissuasion à l'École militaire, le 7 février 2020 : « l'émergence de nouvelles technologies, comme [...] les applications de la physique quantique [...], est porteuse de nombreuses opportunités, mais également source de futures instabilités ⁽¹⁾ ». Même si les principes quantiques font déjà l'objet d'applications très utiles comme le laser, l'imagerie médicale ou la navigation, les progrès de la recherche ces dernières années laissent entrevoir une nouvelle génération d'applications disruptives qui donneront à ceux qui les maîtriseront un avantage certain dans les domaines économique, financier et également militaire.

Dans ce dernier domaine, les ruptures technologiques en matière de détection, de communication et de calcul sont, d'ores et déjà, une certitude. Seule subsiste une incertitude sur le calendrier. La physique quantique recèle ainsi le potentiel pour fournir la supériorité opérationnelle dont toutes les armées modernes sont en quête permanente. Conscientes de cette réalité, les grandes puissances engagent des moyens considérables dans la recherche. L'Europe s'efforce de suivre le tempo imprimé par les États-Unis et la Chine car attendre placidement n'est pas une option. Aussi, une bonne appréhension du changement de paradigme que sous-tendent les principes quantiques doit permettre d'anticiper la portée des technologies associées ainsi que les obstacles à lever. Dans ce cadre, la France est sur le point de se doter d'une feuille de route quantique interministérielle. Il appartient désormais au ministère des Armées de développer son propre plan d'action « technologies quantiques » pour permettre aux armées de faire leur révolution quantique à l'horizon 2040.

Comprendre les principes de la physique quantique

Les théories électromagnétiques, les lois de la mécanique et les règles de la thermodynamique ne permettent pas d'expliquer les phénomènes se déroulant dans le monde de l'infiniment petit. Révélée dans les années 1920 par des physiciens ⁽²⁾ créatifs et audacieux, la mécanique quantique décrit le comportement de la matière à l'échelle

⁽¹⁾ MACRON Emmanuel, « Discours du président de la République sur la stratégie de défense et de dissuasion devant les stagiaires de la 27^e promotion de l'École de Guerre », 7 février 2020 (www.elysee.fr/).

⁽²⁾ Max Planck, Albert Einstein, Niels Bohr, Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg, Max Born, etc.

Les enjeux de la physique quantique
et les ruptures à anticiper

subatomique. Sa formalisation constitua une révolution tant elle fut un défi pour l'entendement. Elle heurta le sens commun et suscita des visions parfois très divergentes ⁽³⁾. Ainsi, comme le disait un grand physicien enseignant les principes quantiques à ses élèves : « si vous m'avez compris, c'est que je n'ai pas été clair ⁽⁴⁾ ».

À l'échelle microscopique, les particules se comportent à la fois comme des corpuscules et des ondes. Les notions – contre-intuitives – de superposition, d'intrication, de tunnel quantique et de décohérence permettent d'appréhender l'essentiel des caractéristiques singulières du monde quantique.

La **superposition d'états** décrit l'aptitude d'une particule à exister dans plusieurs états au même moment. Il est possible de déterminer par le calcul la probabilité qu'elle se trouve dans un état précis. Pour le comprendre simplement, au lieu d'une particule, considérons une pièce de monnaie. Si la pièce repose à plat sur une table, il est possible de déterminer quelle face est visible. Imaginons maintenant la pièce qui tourne sur la tranche. Il n'est pas possible de définir si la face visible est pile ou face. Il semble que ce soit les deux en même temps.

Concernant le principe d'**intrication quantique**, il caractérise le fait que plusieurs particules peuvent être liées de telle manière qu'il est impossible de les décrire séparément même si elles sont physiquement séparées par une grande distance. En s'appuyant sur l'analogie avec une pièce de monnaie, l'intrication signifierait que faire tourner une pièce située à Paris ferait tourner une autre pièce à Tokyo exactement de la même manière, exactement au même moment et pour la même durée.

L'**effet tunnel**, quant à lui, traduit l'aptitude d'un objet quantique à franchir une barrière de potentiel sans posséder *a priori* l'énergie suffisante pour cela. Ce phénomène s'explique par le comportement ondulatoire de la particule qui peut se situer, de manière probabiliste, d'un côté et de l'autre de la barrière. Il trouve une application concrète dans certains microscopes (« à effet tunnel ») et dans certains appareils électroniques du quotidien (mémoire informatique, clé USB). En déplaçant les atomes un à un, il devient possible de les observer. De même, en utilisant un réservoir d'électrons, ils sont déplacés et constituent l'information (les bits dans la mémoire). Par ailleurs, ce principe est au cœur des nanosciences.

Ces propriétés quantiques disparaissent dès que l'on tente d'expliquer les phénomènes physiques observés au niveau macroscopique. Les objets quantiques doivent en effet être considérés comme interagissant fortement avec leur environnement. Il est possible de démontrer mathématiquement comment une interaction modifie les caractéristiques ondulatoires des différents états, les rendant ainsi incohérents les uns par

⁽³⁾ Einstein et Bohr se sont opposés avec force – mais toujours avec une grande bienveillance – sur la description de la physique quantique, incomplète pour le premier et complémentaire de la réalité pour le second. En exposant deux conceptions distinctes du monde physique, cette controverse revêtit une portée philosophique. Pour Einstein, qui rejette la description probabiliste, « Dieu ne joue pas aux dés ». PATY Michel, « Dieu joue-t-il au dé ? (La nature et les probabilités) », *Sciences et Avenir* n° 128, 2001, p. 6-7.

⁽⁴⁾ KLEIN Étienne, *Petit voyage dans le monde des quanta*, Flammarion, 2004, p. 14.

Les enjeux de la physique quantique et les ruptures à anticiper

rapport aux autres. Cette démonstration forme la **théorie de la décohérence** ⁽⁵⁾ de tout système quantique. Elle met en évidence le caractère éphémère des états de superposition et d'intrication qui peuvent très vite disparaître sous l'effet d'interactions tant naturelles que provoquées par l'observation de l'objet quantique. Par exemple, la lumière ambiante ou celle émise par un dispositif de mesure contribue à la décohérence. La théorie permet de calculer avec précision le temps après lequel la probabilité des états superposés devient négligeable. La durée de superposition d'un système quantique doit donc être considérée comme limitée. Ainsi, la mesure d'une particule permet d'extraire l'information relative à son état au moment même de la mesure mais provoque également sa destruction.

En résumé, à l'échelle atomique, les particules se comportent comme des corpuscules et des ondes, elles sont dans plusieurs états à la fois selon des règles probabilistes. Elles peuvent être intimement liées entre elles sans aucun lien concret les reliant. Elles peuvent traverser des « murs » et, finalement, perdent toutes ces caractéristiques dès que soumises aux interactions extérieures. Cela étant posé, il est possible d'envisager tout le potentiel des principes quantiques pour réaliser, une fois surmontés quelques obstacles techniques, des actions à un niveau jusqu'alors hors d'accès.

Les applications et les freins technologiques

Les principes quantiques appliqués à des technologies permettent d'envisager de nouvelles méthodes de mesure, de traitement et de partage de données. Ces propriétés sont exploitées depuis les années 1950 avec la mise au point du laser, des transistors et des semi-conducteurs, ces derniers ayant permis de développer les ordinateurs. Aujourd'hui, il est possible d'aller encore plus loin dans l'utilisation des phénomènes quantiques en stockant, traitant et analysant un nouveau type de données. Là, réside la révolution en cours. Elle est de même nature que celle amenée par le traitement informatique de l'information.

L'extraordinaire précision des capteurs quantiques

L'exploitation des propriétés quantiques de certaines particules permet de détecter, de mesurer et de réaliser des images avec une extrême précision. Elles améliorent les capacités de systèmes existants tout en ouvrant la voie à de nouvelles fonctionnalités.

En utilisant des systèmes quantiques intriqués, il est possible de détecter d'infimes variations de l'environnement. Des dispositifs existent pour mesurer finement le temps, les champs gravitationnel et magnétique terrestres ainsi que les variations de lumière. Ils offrent, d'ores et déjà, des facteurs d'amélioration de 10 à 100 (et bientôt à 1 000) par rapport aux instruments de mesure classiques. Ainsi, au cœur de chaque

⁽⁵⁾ La théorie de la décohérence a été introduite par Heinz-Dieter Zeh en 1970. Elle a reçu ses premières confirmations expérimentales en 1996.

Les enjeux de la physique quantique et les ruptures à anticiper

satellite *GPS* ⁽⁶⁾, se trouve une horloge, elle-même constituée d'atomes ⁽⁷⁾ superposés. Ce système quantique permet d'obtenir une référence temporelle extrêmement stable. Elle ne perd qu'une seconde en 100 millions d'années mais les scientifiques espèrent exploiter la technologie quantique pour faire encore mieux. De nouvelles générations d'horloges ne perdront qu'une seconde en un milliard d'années. Ce type de stabilité permet aux horloges d'être utilisées comme capteurs qui réagissent à de minuscules changements gravitationnels ou électromagnétiques. En intégrant de tels capteurs, il devient possible de développer des instruments de mesure comme des magnétomètres ⁽⁸⁾, des gravimètres ⁽⁹⁾, des accéléromètres ⁽¹⁰⁾ et des gyromètres ⁽¹¹⁾ d'une précision et d'une stabilité ⁽¹²⁾ accrues. Des entreprises, notamment européennes, commercialisent certains de ces dispositifs. Ils préfigurent de nouvelles solutions pour la navigation et la détection sous-marine ou celle de cavités souterraines.

L'imagerie constitue un autre domaine où l'apport des propriétés quantiques présente un fort potentiel d'amélioration. Des capteurs d'image utilisant l'effet tunnel, rendent possible l'observation à l'échelle moléculaire. Au niveau macroscopique, l'utilisation de photons intriqués de longueurs d'onde différentes permet, en réduisant les contraintes liées aux perturbations extérieures, de s'affranchir des conditions météorologiques pour observer une source lumineuse lointaine et ainsi réaliser une image à distance.

Enfin, un principe analogue utilisant des photons intriqués permet d'envisager la détection d'objet à distance. Une source émet un photon vers une cible. Lorsqu'il l'atteint, la modification de son état peut être observée à travers celui de son double. Tel un radar, la télédétection par laser (*LIDAR* ⁽¹³⁾) détecte un mobile distant. Toutefois, la mesure ne renseigne ni sur la forme ni sur la taille du mobile ; seule sa présence est détectée et des informations sur sa vitesse et sa distance peuvent être recueillies. L'imagerie et le radar quantique restent des domaines expérimentaux car les systèmes disponibles autorisent difficilement une utilisation hors d'un laboratoire.

L'avènement du calcul quantique

L'informatique classique utilise les « bits » pour produire le résultat de calculs. Les bits sont binaires car l'électronique s'appuie sur des composants traversés par une charge électrique ou pas. Ils prennent donc les valeurs discrètes de 1 ou 0. Les ordinateurs quantiques fonctionnent grâce à des *quantums bits* ou *qubits*. En combinant les

⁽⁶⁾ Le principe de fonctionnement d'un récepteur *GPS* (*Global Positioning System*) repose sur la mesure des écarts de temps entre les signaux reçus de différents satellites pour déterminer sa position.

⁽⁷⁾ Césium ou rubidium.

⁽⁸⁾ Le magnétomètre est un appareil qui sert à mesurer l'intensité et la direction d'un champ magnétique, Wikipédia.

⁽⁹⁾ Le gravimètre est un instrument de mesure destiné à quantifier le champ gravitationnel terrestre, Wikipédia.

⁽¹⁰⁾ L'accéléromètre est un capteur qui, fixé à un mobile, en mesure l'accélération linéaire, Wikipédia.

⁽¹¹⁾ Le gyromètre est un instrument qui mesure une vitesse angulaire. Une centrale inertielle qui élabore des informations de cap, d'attitude et de position utilise trois gyromètres et trois accéléromètres, Wikipédia.

⁽¹²⁾ Les capteurs quantiques n'ont quasiment pas besoin de réétalonnage. Ils peuvent ainsi effectuer des mesures pendant de longues périodes.

⁽¹³⁾ *Light Detection and Ranging*.

Les enjeux de la physique quantique
et les ruptures à anticiper

principes de superposition et d'intrication, ces systèmes quantiques sont capables d'être à la fois 0 et 1 en même temps, et d'interagir entre eux. Un *qubit* correspond à deux bits, il devient donc possible avec n *qubits* de coder 2^n bits. Ainsi, l'ordinateur quantique à 53 *qubits* que Google a déclaré avoir fait fonctionner le 23 octobre 2019 équivaut à une capacité de calcul de neuf millions de milliards (2^{53}) de bits. Ce dernier est parvenu à exécuter (avant de se détruire, voir *infra*) un calcul en 3 minutes et 20 secondes contre 10 000 ans pour l'ensemble des plus puissants calculateurs actuellement disponibles ⁽¹⁴⁾. De plus, l'intrication des *qubits* permet de réduire le nombre d'opérations logiques accélérant encore les calculs. Le traitement d'un grand nombre d'opérations en même temps devient possible alors qu'un processeur classique les réalise successivement. L'informatique quantique constitue une évolution exponentielle de la puissance de calcul dans un contexte où la loi de Moore ⁽¹⁵⁾ est sur le point de ne plus être valide. Le calcul quantique introduit de nouvelles méthodes qui permettront de résoudre des problèmes complexes inaccessibles pour les ordinateurs classiques actuels les plus avancés.

Cependant la conception de calculateurs quantiques pose deux défis majeurs. Le premier a trait à la conception des *qubits* et le second touche à leur manipulation. Pour fabriquer ces systèmes quantiques, plusieurs technologies existent ⁽¹⁶⁾. Dans l'état actuel de la recherche aucune d'entre elles ne domine. De grandes incertitudes subsistent quant à la technologie qui ouvrira la voie de la suprématie quantique. De même, pour réaliser des calculs, il est nécessaire de manipuler les *qubits* en modifiant leurs états ou en les intriquant. Pour cela, des impulsions laser ou électromagnétiques sont utilisées afin de former des portes quantiques en regroupant plusieurs *qubits*. Ces portes permettent de générer les fonctions essentielles au calcul quantique. Le *qubit* doit être isolé du « bruit » extérieur pour conserver sa cohérence. Cela exige de maintenir, lors des calculs, une très basse température (proche de 0 K, soit environ - 273 °C) et d'isoler les *qubits* de toute vibration et onde électromagnétique. Dans l'état actuel des capacités techniques, les perturbations extérieures ne peuvent être totalement évitées. Elles produisent, en conséquence, des décohérences quantiques et génèrent des erreurs dans les résultats obtenus. Il faut donc corriger ces erreurs en utilisant des architectures redondantes, ce qui exige de disposer d'un grand nombre de *qubits*. Par ailleurs, il est impossible de cloner ou dupliquer un *qubit*. Ce dernier est également détruit dès qu'il est lu ; il ne peut donc pas être lu deux fois. Cela signifie que la lecture du résultat doit se faire à la fin du calcul par le biais d'un algorithme quantique spécifique, très différent des algorithmes classiques. Cet algorithme ne peut être lancé qu'une seule fois compliquant ainsi sa mise au point. Par conséquent, les méthodes classiques de programmation, consistant à recopier la valeur d'une variable, sont inadaptées au calcul quantique.

⁽¹⁴⁾ LAROUSSERIE David, « Google annonce une percée majeure dans le calcul quantique », *Le Monde*, 23 octobre 2019.

⁽¹⁵⁾ Énoncée en 1965 par Gordon E. Moore, physicien américain cofondateur de la société Intel, cette loi empirique prédit le doublement de la puissance de calcul des ordinateurs à prix constant tous les 18 mois. Or, aujourd'hui, la taille des composants électroniques semble avoir atteint une limite.

⁽¹⁶⁾ Les supraconducteurs, les cavités de diamants et les ions piégés sont les technologies les plus avancées. La technologie à base de photons offre une plus grande facilité de manipulation des *qubits* mais la maîtrise de leurs interactions est complexe. Les spins d'électrons, les atomes neutres et les fermions de Majorana, enfin, sont des technologies exploratoires.

Les enjeux de la physique quantique et les ruptures à anticiper

Face à ces difficultés de conception et de mise au point, la simulation de calculateur quantique offre une piste concrète d'amélioration du fonctionnement des ordinateurs classiques tout en constituant un laboratoire pour développer le calcul quantique. Avant l'avènement de l'ordinateur quantique, il reste de nombreux problèmes à résoudre. Cela crée une véritable incertitude sur le point d'aboutissement des recherches en cours ⁽¹⁷⁾.

La sécurité absolue des communications

De façon générale, la sécurité des communications est assurée par le chiffrement des données échangées et le partage de clés de codage. Les principes de la physique quantique ouvrent la voie à de nouveaux protocoles encore plus sûrs. En effet, les photons, largement utilisés dans les communications optiques, offrent des méthodes cryptographiques spécifiques au monde quantique. En utilisant les phénomènes de superposition et d'intrication, il est possible de faire circuler un message qui pourra être décodé uniquement par l'émetteur et le récepteur. De plus, s'il est intercepté pendant son transfert, la mesure réalisée par un tiers aura pour effet d'annihiler la superposition et l'intrication informant ainsi l'émetteur de l'intrusion tout en rendant le message indéchiffrable. Le piratage d'une communication quantique est détecté et détruit la clé de chiffrement, instantanément ; le message arrive à son destinataire mais ne peut être lu. Cela reproduit, dans une certaine mesure, le principe du sceau en cire utilisé au Moyen-Âge pour identifier l'émetteur d'un message écrit et vérifier que celui-ci n'a pas été lu pendant le trajet vers le récepteur.

Cependant, compte tenu de l'atténuation de la lumière dans les fibres optiques, les taux de transfert de données quantiques et les distances de transmission restent assez faibles. La transmission de messages entiers n'est donc pas pleinement exploitable. Pour réduire ces contraintes, une pratique consiste à envoyer uniquement la clé cryptographique selon les principes quantiques. La distribution de clés cryptographiques quantiques (*Quantum Key Distribution* ou *QKD*) permet de coder et de décoder un message chiffré de manière classique et de les transmettre *via* des réseaux de télécommunication optique existants. Pour améliorer les performances, il est nécessaire d'utiliser des dispositifs optiques refroidis, encore au stade expérimental. Il est par ailleurs possible de générer des nombres aléatoires quantiques pour constituer les clés de chiffrement.

Outre l'interception, le décodage ⁽¹⁸⁾ des clés de chiffrement classiques représente un risque d'autant plus grand que le calcul quantique pourrait fournir une puissance de calcul telle, qu'elles n'y résisteront pas. Là encore, la distribution de clés

⁽¹⁷⁾ « Rien ne permet d'affirmer que le développement d'ordinateurs quantiques sera possible d'ici 2030. », SECRETARIAT GÉNÉRAL DE LA DÉFENSE ET DE LA SÉCURITÉ NATIONALE (SGDSN), *Chocs futurs : Étude prospective à l'horizon 2030 : impacts des transformations et ruptures technologiques sur notre environnement stratégique et de sécurité*, 2017, p. 181 (www.sgdsn.gov.fr/uploads/2017/04/sgdsn-document-prospectives-v5-bd.pdf).

⁽¹⁸⁾ Mathématicien américain, Peter Shor a développé en 1994 un algorithme quantique capable de résoudre le problème de factorisation, utilisé dans la majorité des systèmes de sécurité informatique. Il permettra à l'informatique quantique de décoder la plupart des clés de chiffrement classique.

Les enjeux de la physique quantique et les ruptures à anticiper

quantiques apporte une parade efficace. Toutefois, une alternative consiste à développer des algorithmes mathématiques résistant au calcul quantique. Ce dernier n'étant capable d'effectuer que des calculs à base de factorisation, certains problèmes mathématiques restent insolubles pour l'ordinateur quantique. De tels algorithmes constituent le fondement de la cryptographie *post*-quantique.

Des défis techniques à relever

La conception et la mise au point de dispositifs utilisant des systèmes quantiques se heurtent à de nombreux obstacles. En effet, la nature complexe et évanescence des propriétés quantiques rend tout particulièrement difficile le développement de technologies les employant. Un système quantique est extrêmement sensible aux perturbations extérieures bien plus que les systèmes électroniques classiques. Des variations mécaniques, thermiques ou encore électromagnétiques perturbent les objets quantiques et génèrent des erreurs qu'il est nécessaire de corriger. Cela freine, notamment, le développement de l'informatique quantique. Pour pallier ces contraintes, des dispositifs complexes souvent volumineux et lourds doivent accompagner les systèmes quantiques. En outre, des sources d'énergie de grande capacité sont requises pour faire fonctionner ces ensembles. Ainsi, la plupart des systèmes ne fonctionnent que dans l'environnement d'un laboratoire. Dans ce contexte, une large utilisation des technologies quantiques reste une perspective plus ou moins lointaine, 2030 semblant marquer un tournant pour certains spécialistes ⁽¹⁹⁾. Enfin, le fonctionnement singulier des systèmes quantique requiert de développer des algorithmes et une couche logicielle spécifiques dont la conception porte son propre lot de défis.

La recherche quantique ressemble donc plus à un marathon qu'à un sprint. Les États qui dominent sur la scène économique mondiale ont pris la mesure du caractère stratégique que revêt aujourd'hui la recherche quantique. Ils se sont résolument lancés dans cette course afin de tirer un avantage décisif des technologies issues de l'univers quantique.

L'écosystème mondial, européen et français du quantique

Aux États-Unis, le Congrès a adopté, en décembre 2018, le *National Quantum Initiative Act*. Il prévoit une forte croissance du secteur quantique et identifie le besoin de chercheurs à former. Il a été décidé de stimuler la recherche avec un premier plan quinquennal de plus d'un milliard de dollars. En parallèle, le *National Institute of Standards and Technology (NIST)* est chargé de piloter et de contrôler les sujets relatifs à la définition des normes et à la standardisation des applications quantiques ⁽²⁰⁾. L'écosystème quantique américain regroupe ⁽²¹⁾ 40 *start-up*, 50 fonds de capital-risque,

⁽¹⁹⁾ « McKinsey estime qu'il existera entre 2 000 et 5 000 ordinateurs quantiques dans le monde d'ici 2030 » in BERGOUNHOX Julien, « L'informatique quantique pèsera 1 000 milliards de dollars en 2035 », *L'Usine Digitale*, 9 mars 2020 (www.usine-digitale.fr/).

⁽²⁰⁾ Cf. NIST, « Quantum information science » (www.nist.gov/topics/quantum-information-science).

⁽²¹⁾ FORTEZA Paula (dir.), *Quantique : le virage technologique que la France ne ratera pas*, rapport parlementaire, janvier 2020, 64 pages.

Les enjeux de la physique quantique et les ruptures à anticiper

4 grandes sociétés industrielles (Google, IBM, Microsoft et Intel). À cela s'ajoutent les efforts considérables consentis par le secteur de la défense et orchestrés par la *DARPA* ⁽²²⁾. Les États-Unis sont à la pointe de la recherche quantique, notamment dans le domaine de l'ordinateur quantique. Ainsi, IBM, Microsoft et Google se livrent une compétition effrénée pour atteindre en premier la suprématie quantique.

Concernant la **Chine**, la recherche quantique représente une priorité stratégique assumée qui doit contribuer à l'objectif général de devenir la première puissance du monde en 2049. Le quantique est, en effet, érigé en priorité du 13^e plan quinquennal de la Chine (2016-2020) ⁽²³⁾. Ainsi, les domaines de la communication, de la détection et du calcul quantique sont l'objet d'expérimentations de grande ampleur. La Chine est particulièrement active dans le domaine de la distribution quantique de clés de chiffrement (*QKD*), en témoignent le nombre de brevets déposés ⁽²⁴⁾ et les expérimentations de démonstrateurs terrestres et spatiaux. En 2016, le programme *QUESS* (*Quantum Experiments at Space Scale*) établit une ligne de communication quantique avec le satellite *Micius*, reliant ainsi Pékin et Vienne pour diffuser des clés de chiffrement d'images et d'une conversation vidéo. Le satellite a également permis de transmettre, à l'aide de lasers, des paires de photons intriqués entre deux stations sol distantes de 1 200 km ⁽²⁵⁾. Une liaison quantique par fibre optique entre Pékin et Shanghai (2 000 km) a par ailleurs été ouverte en 2017. L'objectif annoncé consiste à disposer d'un réseau mondial de communication quantique à des fins civiles et militaires à l'horizon 2030, posant ainsi les bases d'un *Internet* quantique chinois ⁽²⁶⁾.

Dans un autre domaine stratégique, des chercheurs chinois ⁽²⁷⁾ annoncent l'avènement du premier prototype d'ordinateur quantique constitué de composants exclusivement chinois d'ici fin 2020. Ils considèrent que la maîtrise de cette technologie donnera un avantage identique à celui de la machine à vapeur sur la voiture à cheval. En matière de recherche fondamentale, la Chine semble en passe de rattraper son retard sur les États-Unis.

Concernant les capteurs quantiques, la Chine communique et met en scène son avance en matière de détection. Elle se serait ainsi dotée d'un radar quantique fonctionnel ⁽²⁸⁾ rendant obsolète le concept de furtivité des vecteurs aériens. La compétition quantique dans laquelle sont engagés Américains et Chinois semble se jouer également sur le terrain de la communication.

⁽²²⁾ *DARPA* : *Defense Advanced Research Projects Agency*. Aucune information ne filtre sur les budgets et les recherches dédiés au quantique au sein du secteur de la défense.

⁽²³⁾ WANG Yiwei, « XIII^e Plan quinquennal : des opportunités pour l'Europe », *La Chine au présent*, 8 mars 2016 (www.chinatoday.com.cn/french/picnews/article/2016-03/08/content_716714.htm).

⁽²⁴⁾ « In 2018, China registered 517 quantum communications and cryptography patents; the US registered 117 and Europe only 31 » in BURTON Charlie, « How China become a subatomic superpower with quantum technology », *GQ UK edition*, 2 août 2019 (www.gq-magazine.co.uk/article/quantum-technology-china).

⁽²⁵⁾ CASTELVECCHI Davide, « China's quantum satellite clears major hurdle on way to ultrasecure communications », *Nature*, 15 juin 2017.

⁽²⁶⁾ KHALATBARI Azar, « L'*Internet* quantique sera chinois », *Sciences et Avenir*, 13 août 2017 (www.sciencesetavenir.fr/).

⁽²⁷⁾ « La Chine intensifie la compétition quantique avec les États-Unis », *French.China.org*, 11 novembre 2019 (http://french.china.org.cn/business/txt/2019-11/11/content_75396319.htm)

⁽²⁸⁾ IKONICOFF Román, « Les Chinois auraient construit un "radar quantique" », *Science&Vie*, 14 juillet 2018.

Les enjeux de la physique quantique
et les ruptures à anticiper

Depuis 2010, de nombreux brevets liés aux capteurs et à l'informatique quantiques sont par ailleurs déposés par la Chine. Le budget consacré à la recherche quantique est estimé à 2 milliards d'euros pour les cinq années du plan en cours ⁽²⁹⁾. Toutefois d'autres sources évoquent plus de 10 Md€ ⁽³⁰⁾. Par ailleurs le secteur privé et notamment certaines entreprises du numérique telles Baidu, Alibaba et Huawei Technologies consacrent des budgets considérables à la recherche et au développement des technologies quantiques ⁽³¹⁾.

Autre compétiteur, la Russie laisse filtrer peu d'informations sur sa stratégie dans le domaine quantique, mais nul doute que les technologies quantiques, potentiellement disruptives, intéressent le pouvoir russe. Ce dernier peut pour cela compter sur des mathématiciens et physiciens aux compétences reconnues. Le gouvernement a annoncé en décembre 2019 qu'il consacrera 50 Md de roubles (600 millions €) à la recherche quantique sur les cinq prochaines années ⁽³²⁾ pour ainsi rester dans la course.

En Europe, l'Union européenne a lancé en 2018 le programme ⁽³³⁾ *Quantum Technologies flagship* doté d'un milliard d'euros sur dix ans. Organisé autour de quatre grands domaines ⁽³⁴⁾, le programme vise à financer les recherches et à fédérer les efforts des États-membres. La vision à long terme consiste au déploiement d'un *Internet* quantique qui relierait, en Europe, les capteurs, ordinateurs et simulateurs quantiques dans un large partage des ressources. Parallèlement, des plans nationaux regroupent au sein de partenariats des acteurs académiques et des sociétés telles que Microsoft, IBM et Intel. C'est le cas en Allemagne, au Royaume-Uni, aux Pays-Bas et également en France.

La France bénéficie d'un écosystème cohérent. Il est structuré autour de centres de recherche ⁽³⁵⁾ de grande qualité, de quelques groupes industriels ⁽³⁶⁾ volontaires et de *start-up* ⁽³⁷⁾ performantes. Grands groupes et *start-up* français commercialisent d'ores et déjà des applications quantiques avec succès. À titre d'exemple, Atos propose la seule plateforme de simulation quantique du marché ⁽³⁸⁾ et investit fortement dans

⁽²⁹⁾ VILLANY Cédric, « Les technologies quantiques introduction et enjeux », *Les notes scientifiques de l'Office* n° 13, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, mars 2019, 7 pages (<http://questions.assemblee-nationale.fr/>).

⁽³⁰⁾ Dans son rapport annuel, *The Military Balance 2019*, l'*International Institute for Strategic Studies (IISS)* évoque le projet chinois de construction d'un centre de recherche pour les sciences quantiques de l'information à Hefei dans la province de Anhui (région au sud de Pékin et à l'ouest de Shanghai), un projet à 10 Md\$.

⁽³¹⁾ LACROIX Hélène (D^e), « Les BATX chinois dans la course à l'informatique quantique : de la recherche au capital-risque en passant par la pharmacie et la fintech », *The Red (Team) Analysis Society*, 17 juillet 2019 (www.redanalysis.org/fr/2019/07/17/chinese-batx-race-to-quantum/)

⁽³²⁾ SCHIERMEIER Quirin, « Russia joins race to make quantum dreams a reality », *Nature*, 17 décembre 2019 (www.nature.com/articles/d41586-019-03855-z).

⁽³³⁾ Cf. EUROPEAN COMMISSION, « Shaping Europe's digital future – Policy, Quantum Technologies Flagship » (<https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/quantum-technologies>).

⁽³⁴⁾ Le calcul quantique ; la simulation des interactions quantiques à l'échelle moléculaire ; les communications quantiques ; et les capteurs quantiques.

⁽³⁵⁾ Centre national de la recherche scientifique (CNRS), Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), Office national d'études et de recherches aérospatiales (Onéra), Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (Inria), Université Paris-Saclay, etc.

⁽³⁶⁾ Thales, Atos, etc.

⁽³⁷⁾ Muquans, Quandela, Pasqal, VeryQloud, Aurea Technology, etc.

⁽³⁸⁾ ATOS Quantum Learning Machine.

Les enjeux de la physique quantique
et les ruptures à anticiper

le développement d'algorithmes quantiques, véritable système d'exploitation des ordinateurs quantiques. Atos s'est également lancé dans la fabrication d'un accélérateur quantique de type *Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ)* pour 2023. Pour sa part, la *start-up* Muquans a développé des horloges atomiques de très haute précision ainsi que des gravimètres quantiques pleinement opérationnels. Enfin, les algorithmes de calcul ainsi que certaines technologies habilitantes comme la cryogénie ou l'ultravide sont des domaines bien maîtrisés dans l'Hexagone. En matière de financement, un fonds de capital-risque « Quantonation » spécialisé dans les technologies quantiques a été créé en 2018 ⁽³⁹⁾. Il a vocation à lever 40 M€ pour soutenir sur quatre ans les *start-up* à leur début. Il faut également souligner l'engagement de la banque publique d'investissement Bpifrance à épauler l'entreprenariat français dans ce secteur.

Par ailleurs, le 9 janvier 2020, les conclusions du rapport quantique rédigé par la députée Paula Forteza ont été présentées ⁽⁴⁰⁾. Ce rapport met en lumière six recommandations stratégiques autour du calcul quantique, du développement de technologies, du développement des usages, de l'innovation, de la sécurité économique et de la gouvernance. À cette occasion, un groupe de travail composé de représentants de l'État, de chercheurs et de financiers a été mis en place. Il est chargé de produire une feuille de route avant l'été 2020. Il devrait permettre une déclinaison dans la loi pluriannuelle de programmation de la recherche et le lancement d'un véritable plan quantique français.

Pour ce qui concerne le ministère des Armées, l'Agence de l'innovation de défense (AID) est en première ligne pour stimuler la recherche et éveiller les consciences. Son directeur, Emmanuel Chiva, ne ménage pas ses efforts dans ce sens. Il rappelle que « rater la révolution quantique nous empêche de dormir » ⁽⁴¹⁾. Le ministère des Armées finance 230 nouvelles thèses sur le quantique chaque année. Selon M. Chiva, « la ministre Florence Parly a demandé à l'AID de lancer, d'ici mi-2020, un appel à projet pour développer les meilleurs capteurs quantiques possible avec l'Agence nationale de la recherche ».

L'Europe, dans son ensemble, consacre des budgets qui lui permettent de nourrir de réelles ambitions. Il est toutefois essentiel d'unir les efforts et de sélectionner les domaines de recherches à privilégier. En revanche, les Nations européennes pourront difficilement se doter des infrastructures de recherche tant les investissements requis sont considérables. Cette situation a pour conséquence regrettable le départ de chercheurs européens vers les centres de recherches américains où ils trouvent des conditions d'expérimentation optimales.

⁽³⁹⁾ Rubrique « About » du site officiel de Quantonation (www.quantonation.com/#about).

⁽⁴⁰⁾ FORTEZA Paula, HERTEMAN Jean-Paul et KERENIDIS Iordanis, *Quantique : le virage technologique que ne ratera pas la France – 37 propositions pour une stratégie nationale ambitieuse*, mission parlementaire, 2020, 64 pages (https://forteza.fr/wp-content/uploads/2020/01/A5_Rapport-quantique-public-BD.pdf).

⁽⁴¹⁾ Séminaire *Deep Tech Week* réunissant l'écosystème français du quantique au sein des locaux de Bpifrance, 11 mars 2020. Cf. POIREAULT Kévin, « Deep Tech Week : l'écosystème français du quantique veut accélérer la R&D », *Industrie & Technologie*, 11 mars 2020 (www.industrie-techno.com/).

Les enjeux de la physique quantique et les ruptures à anticiper

Des ruptures pour la défense

Considérant le potentiel des technologies quantiques et l'engouement des États pour s'en doter, nul doute que la seconde révolution quantique est en cours. Ces technologies, de nature disruptive ⁽⁴²⁾, conféreront un avantage stratégique à ceux qui les maîtriseront, ce qui induit d'indéniables enjeux d'autonomie, de souveraineté et de croissance économique. Dans le domaine de la sécurité et de la défense, elles sont de nature à générer des ruptures, c'est-à-dire qu'elles autoriseront de nouveaux modes d'actions, ou bien elles amélioreront des modes d'actions existants. Dans les deux cas, elles conféreront une avance significative et un avantage opérationnel décisif. Les applications quantiques recèlent le potentiel pour donner une supériorité opérationnelle décisive à une force militaire. L'utilisation des propriétés quantiques provoquera un bouleversement des méthodes et des capacités militaires dans des domaines aussi variés que les communications, le renseignement, la détection, la navigation autonome ainsi que l'intelligence artificielle (IA).

Vers des communications ultra-sécurisées

La sécurité des systèmes d'information et des données est un élément essentiel dans la protection et la défense d'une Nation. Les technologies quantiques portent la promesse de communications ultra-sécurisées. La maturité des applications de distribution de clés de chiffrement laisse entrevoir, à moyen terme, des solutions pour les échanges à courtes distances, de l'ordre de plusieurs kilomètres. Pour les communications à longues distances, même si des expérimentations impliquant des liaisons satellitaires ont été conduites, un usage à grande échelle n'est pas envisageable avant au moins une décennie. Ces nouvelles technologies conduiront à repenser la façon de communiquer et de relier des systèmes entre eux, et ce de manière autonome. En utilisant la téléportation quantique ⁽⁴³⁾, il sera possible de relier en permanence différentes parties d'un même système ainsi que plusieurs systèmes entre eux. Ces nouveaux moyens de communiquer remettront en question les architectures de communication en vigueur actuellement. Elles apporteront, en outre, des solutions encore plus sûres pour les communications sensibles telles que celles liées à la dissuasion nucléaire et, plus particulièrement, à l'acheminement de l'ordre présidentiel de tir.

Un saut quantique pour le renseignement

Les capteurs quantiques capables de révéler d'infimes variations des spectres lumineux et électromagnétiques ouvriront le chemin à des applications qui décupleront certaines capacités de renseignement. Des images lointaines prises dans des conditions météorologiques défavorables ainsi que des interceptions électromagnétiques

⁽⁴²⁾ « Although economical applications and widespread use are still years away, there is little doubt that they [quantum technologies] will have disruptive effect when they are employed at scale », IISS, *The Military Balance 2019*, chapter one, part III « *Quantum Computing and Defence* », février 2019.

⁽⁴³⁾ Protocole de communications consistant à transférer l'état quantique d'un système vers un autre système similaire et séparé spatialement du premier en mettant à profit l'intrication quantique, Wikipédia.

Les enjeux de la physique quantique et les ruptures à anticiper

seront possibles pour tout système doté de tels capteurs. Compte tenu de l'importance du renseignement au niveau tactique comme stratégique, celui qui maîtrisera ces technologies aura un avantage considérable. De même, le calcul quantique augmentera la puissance de calcul au service du traitement de masse de données collectées toujours plus nombreuses.

L'apport du quantique à la détection dans les airs, sous la terre et les océans

De la même manière, l'emploi de capteurs quantiques fera qu'il sera plus complexe de se dissimuler dans les airs, sur et sous la terre mais aussi dans les océans. Des usages civils de gravimètres quantiques, permettent déjà l'exploration souterraine et la détection de cavités enfermant des hydrocarbures ⁽⁴⁴⁾. Une miniaturisation de ces technologies permettrait de détecter des installations souterraines ennemies. Dans les domaines de la surveillance aérienne et sous-marine, de nombreux obstacles techniques restent encore à lever avant d'aboutir à un usage généralisé du radar quantique. En revanche, des capteurs quantiques encore immatures peuvent constituer des briques technologiques intégrées aux systèmes de détection classiques afin d'en améliorer les performances et de poursuivre leur développement. Un radar quantique ou un *LIDAR* génère moins d'émissions qu'un radar classique pour obtenir le même résultat ; on obtient ainsi une meilleure précision aux mêmes niveaux de puissance. Ce radar peut également fonctionner avec un très faible niveau de puissance le rendant plus discret et donc plus difficile à contrer par un adversaire. Ce principe est de nature à révolutionner la guerre sous-marine.

La détection quantique doit, par conséquent, conduire à revisiter le concept de furtivité des vecteurs aériens ou celui de la dilution des sous-marins dans leur milieu respectif. Furtivité contre quels systèmes de détection ? Il sera nécessaire de penser la furtivité davantage en termes de leurrage et de camouflage plutôt que d'indétectabilité. Pour cela, des technologies quantiques permettant la maîtrise des interactions lumière-matière seront très utiles. Au bilan, des besoins et des cas d'usage doivent être définis afin de guider la recherche et le développement d'applications.

La navigation quantique autonome

Les capteurs gravitationnels quantiques peuvent également être utilisés comme gyroscopes, jetant les bases de systèmes de navigation inertielle très précis qui s'affranchissent de signaux comme ceux du *GPS* ou de *Galileo*, sensibles au brouillage. Même s'il existe des moyens efficaces de navigation classique, l'utilisation de systèmes quantiques les rend encore plus précis et ce, dans un éventail d'emploi élargi. Ils offrent la redondance indispensable à l'efficacité opérationnelle. Ils apporteront également un plus grand niveau de sécurité et de sûreté aux systèmes autonomes pour les intégrer dans des espaces communs.

⁽⁴⁴⁾ Muqans, « Absolute Quantum Gravimeter. Applications—Exploration and management of underground resources: Hydrocarbon and mineral exploration » (www.muqans.com/product/absolute-quantum-gravimeter).

Les enjeux de la physique quantique et les ruptures à anticiper

Le traitement massif de données

De nombreuses incertitudes demeurent quant à la capacité de développer un ordinateur quantique d'emploi courant. Son développement relève parfois davantage du battage médiatique que de la réalité. On peut toutefois se souvenir de la taille et de la puissance des premiers ordinateurs et les comparer avec celles d'un *smartphone* que beaucoup possèdent désormais au fond de leur poche. Il semble donc raisonnable de penser qu'à l'horizon de vingt ans, le calcul quantique fournira une puissance de calcul encore jamais atteinte. En attendant l'avènement de l'ordinateur quantique, des capacités de calcul quantique intermédiaires seront progressivement disponibles et offriront de nouvelles possibilités de modéliser, d'optimiser et de simuler des systèmes complexes. Les simulateurs quantiques permettent d'ores et déjà d'accélérer les calculs de supercalculateurs classiques tout en poursuivant le développement de l'ordinateur quantique. Leur aptitude à résoudre des problèmes complexes permettra notamment de développer des applications d'aide à la décision. Il sera possible, par exemple, d'optimiser des flux logistiques sur un théâtre d'opérations ou bien de simuler des plans d'opérations. À terme, le calcul quantique permettra le traitement massif de données, dans un temps extrêmement court, rendant ainsi l'IA et les systèmes autonomes pleinement fonctionnels. L'ordinateur quantique constitue le levier indispensable au développement futur de ces nouvelles technologies. En matière de sécurité des communications, le risque que fait peser l'ordinateur quantique universel sur la cryptographie classique doit conduire à anticiper une parade sans tarder.

Enfin, les perspectives offertes par le calcul quantique ne sont pas toutes définies. Des applications ou cas d'usage inattendus ne manqueront pas de surgir, chacun de nature transformationnelle. Pour reprendre l'analogie avec l'informatique classique, rare sont ceux qui avaient anticipé l'invention du *smartphone* et ces applications. Il a pourtant fondamentalement changé, à l'échelle planétaire, la manière de communiquer.

Même si la pleine promesse des technologies quantiques en matière de sécurité et de défense reste inconnue, son pouvoir disruptif est indéniable et exige de rester dans la course à défaut de la mener.

Anticiper les ruptures et rester dans la course

Alors que les Européens sont toujours en train de s'adapter à la révolution numérique, la tentation est forte de se contenter d'injonctions incantatoires au sujet d'une révolution quantique qui promet d'être tout aussi disruptive, voire davantage. Les Nations européennes, individuellement ou collectivement, ne parviendront à suivre ni le rythme imprimé, ni le niveau de moyens engagés par les États-Unis et la Chine dans le développement des technologies quantiques. Le risque de décrochage est grand et l'exemple de la 5G ou encore l'absence d'équivalents européens des Gafam ⁽⁴⁵⁾

⁽⁴⁵⁾ Google, Amazon, Facebook, Apple et Microsoft (États-Unis).

Les enjeux de la physique quantique
et les ruptures à anticiper

ou des BATX⁽⁴⁶⁾ n'est pas de nature à rassurer. Il semble donc indispensable de donner corps à l'initiative de l'UE (*Quantum Technologies flagship program*) en fédérant les efforts consentis par les États-membres. Pour cela, la priorisation des domaines de recherche doit être poursuivie et précisée. Outre le calcul quantique et le développement d'un *Internet* quantique à l'horizon 2035-2040, le fort potentiel des capteurs quantiques dans les années à venir doit être exploité. Ce secteur est à suivre de près, notamment pour la nature duale de ses applications, civiles et militaires.

Autre point de vigilance, celui lié aux sujets de normalisation et de standardisation. Le nombre considérable de brevets américains et chinois doit être le signal pour réagir. L'enjeu est double : il s'agit de préserver une autonomie dans des domaines stratégiques et également de maintenir l'interopérabilité avec l'allié américain. Les technologies de cryptographie quantique comme les algorithmes indispensables aux ordinateurs quantiques contribueront à établir la norme dans le domaine de la communication et du calcul. Enfin, la maîtrise des technologies habilitantes permettra également de façonner le standard des applications quantiques.

Concernant la France, et plus spécifiquement le ministère des Armées, il apparaît essentiel de se doter d'un plan d'actions « technologies quantiques » pragmatique qui doit permettre aux armées d'intégrer cette révolution technologique à l'horizon 2040. Déclinaison de la feuille de route interministérielle, ce plan d'action pourrait s'articuler autour de quatre grands thèmes : la recherche, le domaine capacitaire, les doctrines et la coopération internationale.

Sur le plan de la **recherche scientifique**, le ministère des Armées doit poursuivre et densifier ses relations avec les centres de recherche nationaux ainsi que le monde industriel. Pour ce faire, l'AID doit être le catalyseur et proposer, en lien étroit avec les armées, un catalogue de cas d'usage. Ce dernier regrouperait les besoins militaires futurs pour lesquels les technologies quantiques apporteraient une solution et un niveau de performance susceptibles de donner l'avantage sur le terrain.

Dans le **domaine capacitaire**, les futurs programmes d'équipement devront intégrer un volet en lien avec les technologies quantiques. Il s'agit de définir quelle part prendront ces technologies dans les futurs programmes tels que le *SCAF*⁽⁴⁷⁾, le *MGCS*⁽⁴⁸⁾, le porte-avions nouvelle génération et le Sous-marin nucléaire lanceur d'engins (SNLE) de 3^e génération. Ces nouvelles capacités, intégreront-elles nativement des systèmes quantiques pour communiquer, détecter et naviguer ? Ou bien le choix, portera-t-il sur une intégration après la mise en service, à mi-vie, ou sur l'exclusion des technologies quantiques ? Autant de sujets qui méritent d'être étudiés sans délai pour des systèmes qui équiperont les forces armées à l'horizon 2040.

De même, l'apport prévisible des technologies quantiques doit conduire à une profonde **réflexion doctrinale et conceptuelle**. Les efforts déployés par la Chine et la

⁽⁴⁶⁾ Baidu, Alibaba, Tencent et Xiaomi (Chine).

⁽⁴⁷⁾ *Système aérien de combat du futur*, projet franco-allemand d'un ensemble de systèmes d'arme aérien connectés entre eux, rejoint par l'Espagne.

⁽⁴⁸⁾ *Main Ground Combat System*, char de combat visant à remplacer les *Leclerc* français et les *Leopard 2* allemands.

Les enjeux de la physique quantique
et les ruptures à anticiper

Russie laissent entrevoir la fin de la suprématie occidentale. Les interventions se feront dans des milieux de plus en plus contestés. L'enjeu consiste à préserver un avantage stratégique pour ne pas subir le tempo opérationnel d'un adversaire qui maîtriserait des technologies de rupture. Il s'agit donc de repenser la manière de combattre à l'aune du quantique car, comme le souligne le général Lecointre ⁽⁴⁹⁾, c'est l'accélération du tempo décisionnel qui assurera la supériorité opérationnelle. Aussi, les architectures de communication, de commandement et de contrôle seront à réinventer. Comment relier les systèmes de force entre eux ? Quelle sera la place de l'autonomie lorsque la puissance de calcul permettra la gestion massive de données dans un laps de temps très court ? Comment sera présentée la situation d'ensemble aux décideurs politiques et militaires et quels seront les outils d'aide à décision ? Autant de questions qui nécessitent des études approfondies suivant différents scénarios de montée en puissance des technologies quantiques. Également, dans des domaines tels que le cyberspace ou l'espace exo-atmosphérique ⁽⁵⁰⁾, pour lesquels les armées se dotent de plans ambitieux, l'apport potentiel du quantique reste une question ouverte qui inquiète certaines autorités ⁽⁵¹⁾. Les technologies quantiques contribueront très probablement à la montée en gamme des opérations dans ces deux domaines. Elles permettront même de donner corps aux opérations multidomaines. Enfin, la dissuasion nucléaire devra passer au filtre quantique : quels progrès sont susceptibles d'apporter les technologies quantiques dans le domaine de la sécurisation des communications ? Quelles menaces fait peser la détection quantique sur les vecteurs de la dissuasion ?

L'ensemble de ces sujets liés à la recherche, au développement capacitaire et à la doctrine ne peut se concevoir de manière isolée. Il doit largement alimenter la **coopération internationale** et particulièrement européenne. Aussi, le thème de l'interopérabilité doit-il être au cœur des préoccupations. Elle est indispensable et le fruit d'efforts constants. La standardisation et la normalisation des techniques qui seront utilisées constituent par conséquent autant d'enjeux majeurs. Le travail de l'Organisation du Traité de l'Atlantique Nord (Otan) en matière d'interopérabilité est un atout essentiel et la présence du Commandement allié de la transformation (*ACT*) à Norfolk sur le sol américain doit permettre de suivre ces sujets tout en renforçant le lien avec les initiatives américaines dans le domaine quantique.

⁽⁴⁹⁾ « La numérisation de l'espace de bataille est une réalité ancienne qui permet notamment d'avoir la vision la plus claire possible de la totalité du champ de bataille, des positions des alliés comme des ennemis, des niveaux de soutien logistique nécessaires à chacune des formations, et qui permet de détenir une supériorité opérationnelle au regard d'un aspect qui nous semble aujourd'hui majeur, à savoir l'accélération du tempo décisionnel. C'est cette accélération qui, dans un conflit de haute intensité, nous semble être de nature à assurer la supériorité opérationnelle. » COMMISSION DE DÉFENSE NATIONALE ET DES FORCES ARMÉES, « Audition du général François Lecointre, chef d'état-major des armées, sur le projet de loi de programmation militaire », 21 février 2018, Assemblée nationale (www.assemblee-nationale.fr/).

⁽⁵⁰⁾ « L'échiquier spatial international est en voie de bouleversement du fait des progrès quantiques des principales puissances et du rattrapage rapide des puissances spatiales de second rang. » ZAJEC Olivier, « Le paysage spatial militaire international : un bouleversement multipolaire entre ruptures technologiques et continuité de puissance », *Les Cahiers de la RDN (L'air et l'Espace enjeux de souveraineté et de liberté d'action de la France)* (www.defnat.com/).

⁽⁵¹⁾ « Dans le champ cyber, s'il est une technologie qui fera la différence, c'est l'informatique quantique, car elle changera totalement la donne en termes de puissance de calcul et produira des effets aussi importants que l'arrivée de la poudre sur le champ de bataille. » propos du député Thomas Gassilloud. Cf. COMMISSION DE LA DÉFENSE NATIONALE ET DES FORCES ARMÉES, « Audition de M. Louis Gautier, secrétaire général de la défense et de la sécurité nationale, sur le projet de loi de programmation militaire et sur la revue stratégique de cyberdéfense », 21 février 2018, Assemblée nationale (www.assemblee-nationale.fr/).

Les enjeux de la physique quantique
et les ruptures à anticiper

*
**

Les technologies utilisant les principes quantiques auront, à n'en pas douter, un impact majeur sur la défense en permettant de sécuriser certaines communications, de casser les codes d'autres, de détecter des systèmes dans l'air, sous la terre et sous les mers ainsi qu'en facilitant la prise de décision. Il est cependant impossible de prédire ni la magnitude de ces ruptures, ni le calendrier de leur mise en œuvre. Cependant, face aux enjeux que cela représente, il est primordial de rester dans la course et de contribuer, d'une façon ou d'une autre, au développement de technologies qui revêtent bien souvent un caractère dual. Pour les armées, réfléchir à des cas d'usage est une étape indispensable. Cette démarche doit permettre de guider la recherche et, surtout, de penser le format et l'organisation des armées de demain. Le contexte stratégique sera différent. Il sera marqué par la fin de la supériorité occidentale et obligera à agir dans des milieux contestés. Les technologies quantiques mais aussi l'IA ou encore les systèmes de systèmes mêlant combattants et plateformes autonomes doivent susciter une profonde réflexion sur ce que seront les armées en 2040 : quels contrats, quel format, quels concepts d'emploi et quels équipements ? Là se trouve, peut-être, la véritable révolution qu'il convient d'anticiper.

Éléments de bibliographie

- BUCHHOLZ Scott, MARIANI Joe, ROUTH Adam, KEYAL Akash et KISHNANI Panjkaj, « The realist's guide to quantum technology and national security », Deloitte Insights, 2020, 19 pages (www2.deloitte.com/).
- FORTEZA Paula, HERTEMAN Jean-Paul et KERENIDIS Iordanis, *Quantique : le virage technologique que ne ratera pas la France – 37 propositions pour une stratégie nationale ambitieuse*, mission parlementaire, 2020, 64 pages (https://forteza.fr/wp-content/uploads/2020/01/A5_Rapport-quantique-public-BD.pdf).
- INTERNATIONAL INSTITUTE FOR STRATEGIC STUDIES (IISS), *The Military Balance 2019*, février 2019, 504 pages.
- KLEIN Étienne, *Petit voyage dans le monde des quanta*, Flammarion, 2004, 190 pages.
- PLUCHET Blandine, *La Physique quantique pour les nuls*, First Edition, 2018, 264 pages.
- SECRÉTARIAT GÉNÉRAL DE LA DÉFENSE ET DE LA SÉCURITÉ NATIONALE (SGDSN), *Chocs futurs : Étude prospective à l'horizon 2030 : impacts des transformations et ruptures technologiques sur notre environnement stratégique et de sécurité*, 2017, 208 pages (www.sgdsn.gouv.fr/uploads/2017/04/sgdsn-document-prospectives-v5-bd.pdf).
- SHRÖDINGER Erwin, *Physique quantique et représentation du monde*, Éditions du Seuil, 1992, 185 pages.
- STARBUST, *Quantique, pour quoi faire ? Étude de marché*, 11 juin 2019, Innovation Défense Lab, 37 pages.
- VILLANY Cédric, « Les technologies quantiques introduction et enjeux », *Les notes scientifiques de l'Office n° 13*, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, mars 2019, 7 pages (<http://questions.assemblee-nationale.fr/>).
- ZAJEC Olivier, « Le paysage spatial militaire international : un bouleversement multipolaire entre ruptures technologiques et continuité de puissance », *Les Cahiers de la RDN (L'air et l'Espace enjeux de souveraineté et de liberté d'action de la France)* (www.defnat.com/e-RDN/vue-article-cahier.php?carticle=80).

La Grande Conversation

A quoi les technologies quantiques peuvent-elles servir ?

Société

Par Olivier Ezratty

Publié le 16 mai 2023

consultant et auteur, spécialisé en technologies quantiques, et cofondateur de la Quantum Energy Initiative

Dans l’imaginaire collectif, le quantique est associé à l’image du chat de Schrödinger, qui serait simultanément mort et vivant au même instant. Cette image fait cependant l’objet d’une interprétation erronée puisque la figure du chat servait à illustrer l’absurdité de l’application des concepts de la physique quantique à des objets macroscopiques. L’image qui s’est largement diffusée des technologies quantiques a donc été façonnée par une erreur de lecture. Il existe ainsi beaucoup d’incompréhensions à propos de ces technologies, très complexes. Il convient dans un premier temps de déconstruire les idées reçues à leur sujet : elles ont un potentiel considérable, mais ne nous soustrairont pas à la maladie ou au réchauffement climatique. Nous verrons ensuite

les risques et opportunités pour la démocratie et pour nos sociétés. Si certains éléments doivent d'abord être portés par les pouvoirs publics, la construction d'un écosystème durable est l'affaire de tous les acteurs.

Sommaire

1. Promesses et incertitudes

2. La révolution quantique peut-elle servir la démocratie ?

1. Promesses et incertitudes

Encore au stade de la recherche fondamentale, la « révolution quantique » actuelle est entourée d'incertitudes. Il faut distinguer deux grandes « révolutions quantiques ». La première est issue des découvertes en physique quantique de la fin du XIXe et du début du XXe siècle. Elles ont permis la manipulation de groupes de particules quantiques (photons, électrons). Puis, dans la deuxième moitié du XXe siècle, des technologies comme celles issues du transistor et des lasers ont émergé. La deuxième révolution quantique, dans laquelle nous sommes aujourd'hui, est fondée sur les découvertes en physique quantique depuis les années 1980. Elles permettent de manipuler des particules quantiques individuelles, leur superposition et leur intrication. Les technologies issues de ces découvertes sont de maturité variable et sont l'objet des investissements et des programmes quantiques actuels. Concrètement, les chercheurs et entreprises développent des ordinateurs, des capteurs quantiques ainsi qu'une nouvelle forme de cryptographie quantique ainsi que des réseaux et un Internet quantique.

Perspectives pour la recherche fondamentale et le secteur privé

Les technologies quantiques sont très prometteuses car elles offriront une puissance de calcul incomparable à celle dont nous pouvons disposer grâce à l'informatique classique. Les ordinateurs quantiques rendront possible la résolution de problèmes mathématiques en suspens. Il n'est ainsi pas question de produire des ordinateurs quantiques pour les particuliers, mais de développer des machines efficaces à destination des innovateurs, permettant de résoudre des problèmes jusqu'ici insolubles.

Les technologies quantiques peuvent être très utiles à la recherche, qu'elle soit fondamentale publique, ou privée. Par exemple, il serait potentiellement possible de créer des procédés de production des engrais de façon moins énergivore ^①. Les entreprises pourraient également trouver une grande utilité au quantique, notamment dans le secteur des transports ou des services financiers.

Des technologies complexes, encore loin du stade de la maturité

Les progrès restants pour porter cette technologie à maturité sont considérables. On estime que pour commencer à être « utiles », les ordinateurs quantiques doivent disposer de plus de 100 000 qubits fonctionnels et avoir un taux d'erreur proche de 0,01%. On en est encore loin aujourd'hui, puisque les ordinateurs les plus performants disposent d'environ 100 qubits avec un taux d'erreur autour de 1%. Il semble que ces machines devront dépasser les 10M de qubits fonctionnels pour offrir les

performances attendues aujourd'hui. On distingue donc six ordres de grandeur entre les capacités actuelles et le stade estimé de la maturité. Le défi est d'améliorer la qualité des qubits et de minimiser le taux d'erreur afin d'optimiser les ressources physiques nécessaires au fonctionnement des machines quantiques.

L'ordinateur quantique ne fonctionne pas comme un ordinateur classique. Côté logiciel, le coût d'entrée en mathématiques est beaucoup plus élevé pour les développeurs. Ces machines font tourner des logiciels à l'architecture très différente : il est impossible de copier des données et le résultat d'un calcul est obtenu après un grand nombre d'opérations (la machine tend asymptotiquement vers la solution). Côté matériel, un ordinateur quantique est très complexe et dépend de beaucoup d'éléments : il a généralement besoin d'être refroidi à très basse température (à l'aide de cryostats) et doit être piloté par un ordinateur classique couplé à des dispositifs de contrôle exploitant de l'électronique classique.

Au final, tous ces facteurs font qu'il est impossible de savoir quand nous disposerons d'un ordinateur quantique « utile ». Une hypothèse raisonnable est qu'ils commenceront à être utiles dans une quinzaine d'années. Mais le progrès technique étant continu et imprévisible, il est difficile d'avancer une date précise et de se prononcer sur ce que sera une machine utile. Dans ce domaine, il est très probable que la recherche débouche sur des propriétés et des applications inattendues de ces technologies (sérendipité). Il est toutefois possible de dégager trois temps du développement : une première période d'expérimentation à petite échelle, dans laquelle nous sommes, une deuxième où nous percevrons des débuts d'avantages quantiques et une troisième, plus lointaine, qui pourrait voir la généralisation de ces avantages.

L'orientation des financements publics et privés

La recherche appliquée concerne dans le monde un écosystème d'environ 70 entreprises développant des ordinateurs quantiques. Elles ont toutes en commun d'être des entreprises de recherche privées bénéficiant d'aides de leurs États respectifs (commande publique, subventions, association à des laboratoires de recherche publics) tout en ayant la puissance financière d'un laboratoire privé, avec une taille critique et des équipes dépassant les 100 personnes – contre une dizaine pour une équipe d'un laboratoire de recherche public. Ceci leur permet d'intégrer la recherche fondamentale en physique et d'en développer des applications technologiques.

Comme pour toute révolution technologique, le stade de la recherche fondamentale est très coûteux et incertain. Il est possible d'identifier deux risques principaux. Une grande partie de la recherche étant aujourd'hui effectuée par des entités privées, il est possible qu'elles atteignent une taille telle qu'elles deviennent difficiles à piloter pour les États. Ce faisant, il existe un risque que les travaux de recherche s'orientent davantage vers des applications sur des marchés matures et dynamiques (*supply chain*, finance), au détriment de l'utilité commune. D'autre part, les horizons temporels de ces travaux de recherche étant très longs, il est possible que les États choisissent de diminuer les financements publics faute de résultats rapides, ce qui freinerait les progrès dans le domaine. Les grandes puissances que sont les États-Unis et la Chine sont cependant peu à même de le faire, les enjeux géostratégiques étant significatifs, notamment en liaison avec la quête d'ordinateurs quantiques à même de casser les clés de protection de la cybersécurité actuelle.

2. La révolution quantique peut-elle servir la démocratie ?

Les technologies quantiques étant particulièrement complexes, un travail de vulgarisation à destination du grand public est nécessaire. Il existe encore peu d'interfaces. Les vulgarisateurs les plus connus permettent de faire connaître ces technologies mais, étant majoritairement physiciens, ils apportent peu d'informations sur les usages du quantique et sur les enjeux technologiques.

En parallèle, la vulgarisation du quantique fait émerger des « fausses sciences » qui représentent un danger : certains prétendent que les technologies quantiques pourront soigner de nombreuses maladies. De même, 95% des entreprises quantiques créées en Chine sont des entreprises de cosmétique dite quantique, qui sont des arnaques. La diffusion de ces informations erronées contribue à forger un mythe autour du quantique, alimentant des fantasmes. Comme avec chaque innovation technologique, ses promoteurs cherchent à susciter le rêve parmi le grand public et donc à conjuguer le futur au présent. Or, avec le quantique, la date d'arrivée à maturité est trop éloignée et incertaine, ce qui crée confusion et espoirs trompeurs.

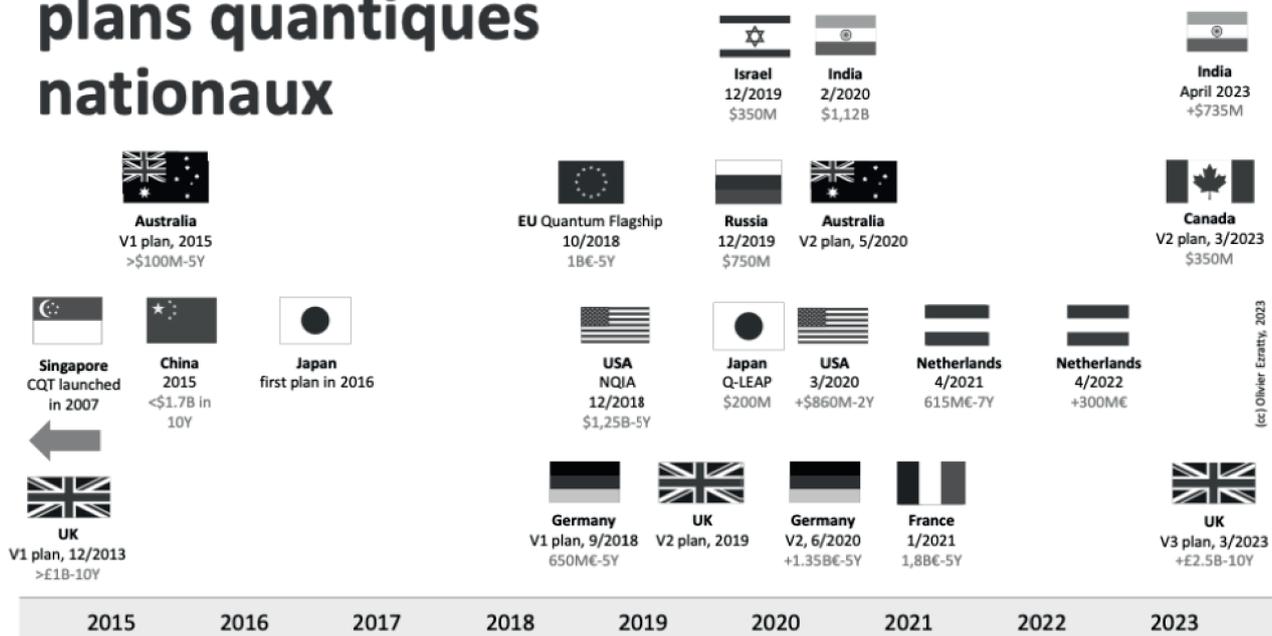
Concilier le temps politique et le temps de la recherche fondamentale

Le premier mémo administratif français à propos du quantique date de 2007. Depuis, le monde politique français cherche à comprendre les enjeux liés au quantique et y consacre du

temps. L'OPECST² de l'Assemblée nationale a rédigé plusieurs mémos sur le sujet (2019), ce qui a permis aux députés de mieux en appréhender les enjeux. Ils y consacrent toutefois trop peu de temps et il manque un groupe d'étude parlementaire spécifique pour constituer une interface entre le Parlement et l'écosystème. A l'issue de ces études, les rapports Forteza (janvier 2020) et Pottier (février 2020) ont montré l'importance de l'investissement public dans ce domaine. Le Gouvernement a lancé sa Stratégie Quantique Nationale en janvier 2021, intégrée ensuite dans le plan France 2030 annoncé en octobre 2021. Il faut toutefois relativiser les montants investis : sur le milliard annoncé, seuls 650M€ sont effectivement des crédits publics nationaux nouveaux, étalés sur 5 ans.

D'autres pays ont adopté des plans et ont débloqué des fonds depuis 2007. Aujourd'hui, toutes les grandes puissances en ont un. Il y a un enjeu géopolitique sous-jacent : être leader mondial permettrait par exemple de casser les clés actuelles de chiffrement d'internet (cryptographie).

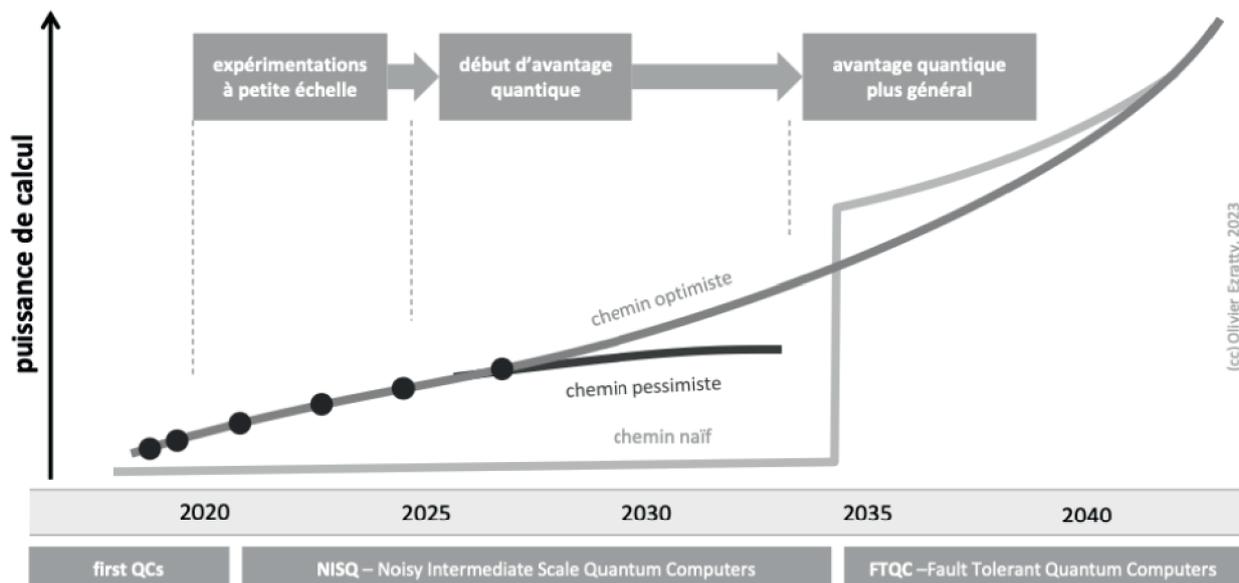
plans quantiques nationaux



Il reste difficile d'estimer les montants investis. Il est important de relativiser ceux affichés pour la Chine, qui sont bien inférieurs aux estimations les plus courantes. Il semblerait par

contre que les Etats-Unis soient les n°1 grâce aux financements privés (notamment IBM qui aurait investi environ 1 à 2 Mds sur 10 ans) et l'UE serait n°1 sur le financement public. La fragmentation actuelle des investissements européens (un plan par État et un plan européen de taille modeste) n'est pas un problème tant qu'ils financent la recherche fondamentale. Lorsque qu'il s'agira de financer des entreprises dans les prochaines années, le risque est de retrouver les mêmes écueils que pour les autres grands secteurs de la « tech » avec une grande fragmentation des efforts sur un marché intérieur lui-même aussi très fragmenté. Il convient d'agir dès maintenant pour orienter les financements européens autour de quelques projets européens bien identifiés pour maximiser les chances de voir émerger des acteurs compétitifs sur le plan international.

l'ordinateur quantique utile, pour quand ?



Les technologies quantiques représentent un enjeu de souveraineté

Les technologies quantiques pourraient révolutionner la cybersécurité. Un ordinateur quantique du futur aurait en effet

la capacité de casser les clés cryptographiques dites asymétriques utilisées actuellement en informatique classique sur Internet. Le quantique peut également faire l'objet d'un usage dual : il se pourrait qu'un capteur quantique puisse par exemple détecter les sous-marins nucléaires, déstabilisant la dissuasion nucléaire. C'est une des raisons qui incite les grandes puissances à maîtriser ces technologies.

L'approvisionnement en matières premières est aussi central car les ordinateurs ont besoin de matières rares comme le silicium 28. Jusqu'en 2018, seule la Russie en produisait. Orano a lancé une production française en 2023.

Le sujet des compétences recoupe celui de la souveraineté car une grande partie des chercheurs en quantique est originaire d'Europe mais part travailler aux Etats-Unis. Les universités disposent d'une offre de qualité en France, concernant quelques milliers d'étudiants par an et 1000 ou 2000 doctorants et post-doctorants, ce qui reste assez faible comparativement à d'autres domaines.

Dans le domaine économique, il s'agit de savoir s'il faut ouvrir le capital des start-ups aux investisseurs étrangers et comment orienter l'usage des technologies produites pour éviter des applications néfastes du quantique pour la société.

Sur le plan géopolitique, les choix opérés par les grandes puissances diffèrent déjà, chacune se spécialisant dans un domaine du quantique. Par exemple, la communication quantique n'a pas été jugée stratégique par les Etats-Unis et l'Europe, tandis que la Chine est leader dans ce secteur : elle a déployé le premier réseau de communication quantique ainsi que le premier satellite quantique en 2017. Ce dernier reste toutefois très peu performant. Le choix fait par les Chinois s'explique par leur volonté de mieux maîtriser leurs outils de cybersécurité. Les outils de physique quantique leur semblent plus faciles à maîtriser que les outils de cryptographie

classiques et post-quantiques. Cette protection physique n'est toutefois pas inviolable.

Une innovation responsable est-elle possible ?

Des questions éthiques se posent déjà dans le quantique. Même si la technologie n'est pas mature, il est possible d'anticiper les problèmes qu'elle va poser. Les biais dans l'IA étaient anticipés depuis longtemps, mais ce problème n'a été abordé que très tardivement. Dans le quantique, certains ont commencé à s'y intéresser très tôt. L'objet de ces préoccupations est d'anticiper et d'identifier les cas d'usage qui pourraient avoir des conséquences éthiques (manipulation du génome humain, cybersécurité, usage militaire).

Il existe aujourd'hui une tendance risquée des entrepreneurs et des chercheurs en quantique à « survendre » les produits qu'ils conçoivent pour attirer des investisseurs. Ce faisant, ils risquent de nuire à tout l'écosystème en alimentant les mythes et fantasmes qui se propagent. Il est donc important de les responsabiliser et de les inciter à plus de transparence sur la maturité de leurs technologies.

La Quantum Energy Initiative – une communauté mondiale de chercheurs – souhaite construire l'exemplarité de l'industrie des technologies quantiques. Un des enjeux principaux est de tout faire pour que cette industrie ne soit pas une grande consommatrice d'énergie. En effet, au rythme actuel, il existe un risque d'aboutir à une consommation d'énergie déraisonnable, annulant ainsi toutes les optimisations que ces technologies permettraient par ailleurs. Il est nécessaire d'influencer les concepteurs de technologies pour qu'ils fassent des choix exemplaires aujourd'hui et éviter que l'industrie ne s'engage dans une voie très énergivore. En évitant cela, le quantique pourrait constituer un vrai avantage énergétique.

Un autre enjeu est la diversité dans ce domaine, aussi peu féminisé que les autres pans du numérique, surtout sur les métiers scientifiques et techniques. Malgré tout, des femmes remarquables y jouent des rôles clés, notamment en France.

Notes

- ① Aujourd'hui, le rendement énergétique de la production d'engrais est de 4% et il consomme entre 1% et 2% de la consommation d'énergie sur Terre en étant responsable de 1,4% des émissions de CO₂ d'origine humaine.
- ② Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

Parlement européen

2019-2024



Commission des affaires juridiques

20.6.2022

COMPTE RENDU DE MISSION

à l'issue de la visite à Tallinn (Estonie) du 23 au 25 mai 2022

Commission des affaires juridiques

Membre de la mission:

Antonius Manders

(PPE)

Introduction

Avec l'avènement de l'intelligence artificielle, la numérisation des systèmes judiciaires est déjà en marche, avec notamment les contrôles rapides en ligne, l'analyse documentaire, l'anonymisation, le règlement en ligne des litiges, l'anticipation des décisions ou la gestion des cas.

La mission avait donc pour objet de s'intéresser au domaine de la justice numérique et d'étudier le modèle estonien de justice en ligne, l'un des plus efficaces et des plus aboutis de l'Union, ainsi que la manière dont les solutions d'intelligence artificielle peuvent contribuer à réduire la charge pesant sur les tribunaux et améliorer l'efficacité et la facilité d'utilisation du système judiciaire.

Elle fait suite à l'audition sur la technologie au service du droit et la justice en ligne organisée par la commission JURI le 17 mai 2022. La mission a également permis de recueillir des informations instructives sur la numérisation des procédures administratives au niveau d'un État membre et les rapports entre celle-ci et les droits et obligations des parties à une procédure administrative. Ces informations pourraient servir de base au rapport d'initiative portant sur la numérisation et le droit administratif que la commission a été autorisée à élaborer ainsi qu'à l'avis que la commission JURI doit rendre à la commission ITRE sur la révision du cadre européen relatif à une identité numérique (eIDAS).

Compte rendu succinct des réunions

La mission a débuté le 24 mai par une réunion avec M^{me} Maris Lauri, **ministre estonienne de la justice**, et une délégation de son ministère, lors de laquelle les intervenants ont présenté une introduction à la numérisation de la justice en Estonie. L'un des grands problèmes évoqués concerne la nécessité de mettre en place un système qui suscite la confiance et la question de la sécurité des données.

Ensuite, les participants ont assisté à une présentation du gouvernement estonien en ligne (ainsi que des bonnes pratiques) au centre **e-ESTONIA**. 99 % des services publics se font en ligne (la totalité des services à l'exception des mariages et des divorces). La délégation a pris connaissance de l'architecture mise en place («x-road») sur la base de la décentralisation du stockage des données et de l'échange de données entre entités, qui comporte notamment les volets e-residency (résidence électronique), e-health (santé en ligne), e-education (enseignement en ligne), e-voting (vote électronique) et l'ambassade de données.

Une réunion a eu lieu ensuite au **Centre des registres et des systèmes informatiques** (le centre informatique public relevant du ministère de la justice qui développe et gère les registres et les systèmes électroniques). Parmi les thèmes abordés figuraient l'acquisition de biens immobiliers (fonctionnement du cadastre en ligne) et la constitution d'une société, et, sur ce point, le registre des entreprises (dont le système de libre-service notarial), le logiciel de comptabilité (e-Financials) et la transmission des rapports annuels, ainsi qu'un projet de coopération avec l'Ukraine en matière de justice en ligne.

La dernière réunion du mardi 24 mai a eu lieu au siège d'**EU-LISA**. Des représentants d'eu-LISA, acteur de premier plan des processus de transformation numérique, ont présenté un aperçu des développements les plus importants d'eu-LISA en 2021 ainsi que ses priorités

pour 2022. S'en est suivi un échange de vues sur des dossiers liés à la justice, et notamment e-CODEX, auquel participe eu-LISA, et sur la poursuite de la numérisation de la coopération judiciaire transfrontière.

Le mercredi 25 mai, la délégation a rencontré deux juges du **tribunal du comté de Harju**. Parmi les thèmes abordés figuraient le recouvrement des créances (informations d'ordre juridique, notamment l'aide juridique), la présentation d'une plainte, la procédure d'ordonnance de recouvrement, les procédures judiciaires en ligne, l'obtention d'une décision de justice, les modalités de traitement virtuel des affaires (auditions hybrides ou à distance, signature numérique, fouilles, etc.).

La mission s'est terminée par une réunion au **ministère de la justice**, où a été présenté le projet d'espace de travail de cocréation en cours pour la rédaction des textes législatifs, lequel garantit la transparence à tous les stades de la procédure.

Conclusions

La visite et les discussions que la délégation a eues avec un vaste éventail d'interlocuteurs nous ont permis d'en savoir plus sur l'expérience acquise par l'Estonie dans la numérisation du domaine de la justice.

La mission a permis à la délégation de recueillir des informations nouvelles sur l'utilisation des outils numériques en vue d'améliorer les services publics aux citoyens et l'administration de la justice. Ces informations viendront à point nommé pour les dossiers de la commission JURI portant sur la numérisation de la coopération judiciaire transfrontière (2021/0394(COD) et 2021/0395(COD)), l'avis de la commission JURI à l'intention de la commission ITRE sur la révision du cadre européen relatif à une identité numérique (eIDAS - 2021/0136(COD)) et le futur rapport d'initiative sur la numérisation et le droit administratif. Elles pourraient également servir de base à d'autres initiatives à l'avenir sur le déploiement d'applications d'intelligence artificielle dans les domaines de la justice et de l'administration publique.