



IESF

SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS ET SCIENTIFIQUES DE FRANCE

CÔTE D'AZUR

BULLETIN

2021 – N°2



Bilan PMIS

Un projet ambitieux



SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS ET SCIENTIFIQUES DE FRANCE

CÔTE D'AZUR

8^e CAMPUS SOPHIA TECH Amphî Ouest 229

JOURNÉES NATIONALES DE L'INGÉNIEUR

Conférence à 14 h le 11 mars 2021

PLASSAT Gabriel Expert à l'ADEME

Quelles mobilités pour le futur ?

Jeux mathématiques

Sudoku

SOMMAIRE

1. Editorial : Un projet ambitieux ; serons-nous réceptifs ?	2
2. Journée Nationale de l'Ingénieur à Polytech Nice Sophia le 11 mars 2021	3
3. IESF- CA Evolution de l'Activité PMIS de 2018 à 2021	5
4. Les technologies quantiques : Contexte et enjeux, applications et perspectives	8
4.1 Introduction	8
4.2 Le contexte et les enjeux de la recherche	10
4.3 Le Plan quantique français	11
4.4 Les écosystèmes quantiques	12
4.5 Physique quantique et mécanique quantique.....	15
4.5.1 Le principe de superposition quantique	15
4.5.2 L'intrication quantique	16
4.5.3 La dualité onde-particule.....	16
4.6 Les technologies quantiques	17
4.6.1 L'informatique quantique et les qubits	18
4.6.2 Les capteurs quantiques.....	21
4.6.3 Les émulateurs, simulateurs et ordinateurs quantiques	22
4.6.4 Les communications quantiques.....	24
4.7 Eléments de prospective	25
4.8 Conclusion	26
4.9 Références.....	27
5. Jeux mathématiques : Solution du bulletin N°1 de 2021	30
6. Jeux mathématiques.....	31
7. Sudoku	32
8. Sur votre Agenda	32
9. Cotisations 2021	33

1. EDITORIAL : UN PROJET AMBITIEUX ; SERONS-NOUS RÉCEPTIFS ?



Un grand nombre d'êtres humains ont parfois plus de possibilités pour synthétiser le passé qu'à appréhender constructivement ce que seront les lendemains de l'humanité. Sur les bases du présent, envisageons ensemble les possibilités offertes à ce jour pour bâtir notre avenir terrestre.

Ingénieurs et scientifiques ont proposé dans ces derniers soixante ans et plus des évolutions techniques considérables qui n'ont pas toujours été appliquées pour améliorer nos conditions de vie en accord avec les évolutions mondiales intellectuelles, politiques, psychologiques et égalitaires du genre humain.

Sans remettre en cause les avancées technologiques considérables que nous avons générées, les implications liées à leurs réalisations devraient permettre de proposer des pistes pour un avenir mondial de complémentarité, de liberté et de solidarité.

Saint-Simon revient, pouvez-vous dire, mais il est souhaitable que cette analyse générale soit partagée par nombre d'ingénieurs et de scientifiques de tout domaine (sciences dures et sciences humaines).

Ingénieurs et scientifiques de la Côte d'Azur, ne pourrions-nous pas élaborer un livre blanc (ne m'accusez pas de racisme) sur le sujet, en travaillant ensemble dans le cadre d'un séminaire distanciel puis présentiel.

La première contribution de chacun synthétiserait en quelques mots clés les incompréhensions, aberrations, défauts du présent. Suivrait un travail de compilation qui, accepté, permettrait une seconde étape sur les possibilités pragmatiques d'action applicables en région, et pourquoi pas aux niveaux nationaux, européens, internationaux, dans un futur proche.

Utopiques ou pas, sommes-nous prêts à nous investir dans ce processus qui ne demande dans sa première étape qu'un petit effort de réflexion et l'envoi d'un courrier spécifique à philippe.hernandez3@online.fr.

Bon confinement à celles et ceux des Alpes Maritimes ; à tous meilleur temps possible. Que cette pandémie nous permette vite de vivre à nouveau sans contraintes (premier point peut-être de nos propositions, mais a priori sans possibilité d'action sur le coronavirus lui-même si ce n'est en le mutant inconsciemment en une souche inactive).

*Philippe Hernandez,
Past-président*

2. JOURNÉE NATIONALE DE L'INGÉNIEUR À POLYTECH NICE SOPHIA LE 11 MARS 2021



Les Journées Nationales de l'Ingénieur (JNI), organisées chaque année, illustrent l'attachement de la Société des Ingénieurs et Scientifiques de France (IESF) à défendre le progrès technique, souvent dans un souci de développement durable, à mettre en relief l'innovation et de manière générale l'industrie. Elle vise aussi à promouvoir les métiers sous-jacents, celui de l'Ingénieur et celui du Scientifique, tant dans le monde de l'entreprise que dans celui des instituts de recherche. Depuis quelques années, cette journée nationale est devenue mondiale, sous le nom de « Journée Mondiale de l'Ingénieur » (ou « Word Engineering Day ») et a été fixée au 4 mars. Le thème de cette année était : « L'ingénierie pour une planète saine -- Engineering for Sustainable Development: Delivering on the Sustainable Development Goals ». A mon sens, des notions absolument consensuelles et qui n'engagent à rien, mais qui vont bien dans l'air du temps.

En France, l'UNESCO a relayé l'évènement mondial le 4 mars, et une quinzaine de journées ont été organisées en province, sous l'égide des IESF. A titre d'exemple, à Lyon, le 20 mars, sur le thème « Entreprendre et réussir : le levier de l'innovation », à Strasbourg, le 18 mars sur celui de « L'entrepreneuriat au féminin en Région Alsace » ou encore à Grenoble, également le 18 mars sur le thème « Être Ingénieur et réussir comme entrepreneur », autant de sujets plus captivants et originaux.

L'intérêt de ces journées réside dans le fait que toutes les personnes et institutions évoluant dans le monde de l'ingénierie peuvent y participer : étudiants, associations de diplômés, école d'ingénieurs et évidemment ingénieurs déjà en poste, qui peuvent faire part de leur expérience. À noter également, la gratuité de l'entrée et l'extension au grand public pour lui montrer le rôle prégnant de l'ingénieur dans la vie quotidienne.

En ce qui nous concerne, nous avons tenu le 11 mars 2021 cette Journée Nationale de l'Ingénieur, à l'Ecole Polytech Nice Sophia, comme chaque année d'ailleurs, une tradition qui a fait ses preuves. J'en profite pour remercier le directeur de l'Ecole qui met à notre disposition un grand amphithéâtre. En retour, l'évènement permet aux étudiants, futurs ingénieurs, de se rapprocher de sujets non dispensés dans les cours, mais qui peuvent les valoriser. Labelisée par IESF national, elle a été programmée dans l'agenda général des JNI de province. Cette année, Gabriel Plassat, expert à l'ADEME et auprès de la communauté européenne, a orienté sa conférence sur le sujet : « Quelles mobilités pour le futur », une question centrale pour les déplacements dans le monde de demain. Dans son adresse, et entre autres, le conférencier a particulièrement insisté sur le fait que l'avènement du numérique aurait dû normalement réduire les mobilités, ce qui n'a pas été parce qu'il augmente notamment le nombre de personnes dans le réseau. Il convient donc de repenser l'activité de l'entreprise en tenant compte du numérique, qui peut aider, pour réduire les mobilités, à évacuer celles qui ne sont pas nécessaires, pas volontaires ou inutiles. Exposé très clair et passionnant, obligeant à se repositionner sur un sujet pour lequel une génération adulte -la nôtre- n'est pas encore totalement habituée à raisonner au fond.

Nous avons eu le plaisir d'accueillir M. le doyen Xavier Latour, Vice-président métropolitain (Nice), délégué à l'Enseignement Supérieur à la Recherche et à la Formation continue, représentant M. C. Estrosi, Président de la métropole, ainsi que M. A. Caminada, directeur de l'Ecole.

En présentiel, une vingtaine d'étudiants ont assisté à la conférence ; cent quarante l'ont suivi en visioconférence, dont quatre-vingt-dix encore au moment des questions : à noter que le présentiel n'était pas obligatoire.

Grande originalité de cette journée : pour la première fois, la conférence pouvait être entièrement suivie en visioconférence. Les moyens techniques ont été fournis par l'école, ainsi que le lien : toutes les personnes ayant visionnées en direct n'ont pas eu de déboires. Un grand merci à l'équipe technique, Cyril Tonin et Boris Ribaric pour l'école, Jacques et Pierre de notre côté, Bernard ayant assuré la prise en direct des questions sur le « chat ». La conférence, intégralement enregistrée est disponible sur notre site : coteazur.iesf.fr.

Enfin, grâce à « GB Productions » nous avons pu réaliser une petite vidéo de 3 minutes, présentant la journée, donnant la parole au conférencier et à une étudiante. Cette vidéo est également disponible sur notre site : coteazur.iesf.fr.

Nota : Les vidéos sont aussi accessibles directement sur la chaine YouTube IESF CA par les liens : [Conférence JNI du 11 mars 2021](#) et [Présentation JNI du 11 mars 2021](#)

Au final, une journée réussie, malgré des conditions sanitaires difficiles.

Un grand merci à tous les acteurs.

J.P. Rozelot

Président IESF-CA

Président du Conseil de Développement de la CAPG

Astronome honoraire

Membre élu de l'Académie des Sciences Naturelles de Catane (I)

3. IESF- CA EVOLUTION DE L'ACTIVITÉ PMIS DE 2018 À 2021

L'activité PMIS (Promotion des Métiers de l'Ingénieur et du Scientifique) est une action de communication visant à développer la connaissance des Métiers de l'Ingénieur, du Scientifique et du monde de l'Entreprise auprès des jeunes et du grand public.

En accord avec le rectorat, et compte tenu de nos ressources, cette action a été focalisée sur les lycées et particulièrement les classes de 1^{ère} à caractère scientifique pour permettre aux élèves de mûrir leur réflexion avec une prise de décision d'orientation l'année suivante.

En fonction de nos moyens nous pourrions étendre cette action auprès des classes de 3^{ème} des collèges et des classes de seconde des lycées.

Nous souhaitons mettre l'accent sur l'attractivité de ces métiers auprès des jeunes filles en faisant témoigner des femmes de notre association mais aussi en se rapprochant d'association telle que « Capital Filles » ou « Femmes Ingénieurs ».

Nous cherchons à développer également le contact avec les parents dans les Forums métiers et les Journées Portes Ouvertes des établissements tant pour leur rôle dans l'orientation de leurs enfants que pour les éclairer sur la réalité de nos métiers.



Ayant une convention de partenariat avec le rectorat notre couverture territoriale est celle de l'académie de Nice. Notre activité se répartie géographiquement comme suit : Métropole Nice Côte d'Azur 31%, Alpes-Maritimes hors NCA 40%, Var (hors Toulon) 14%, Toulon 15%.

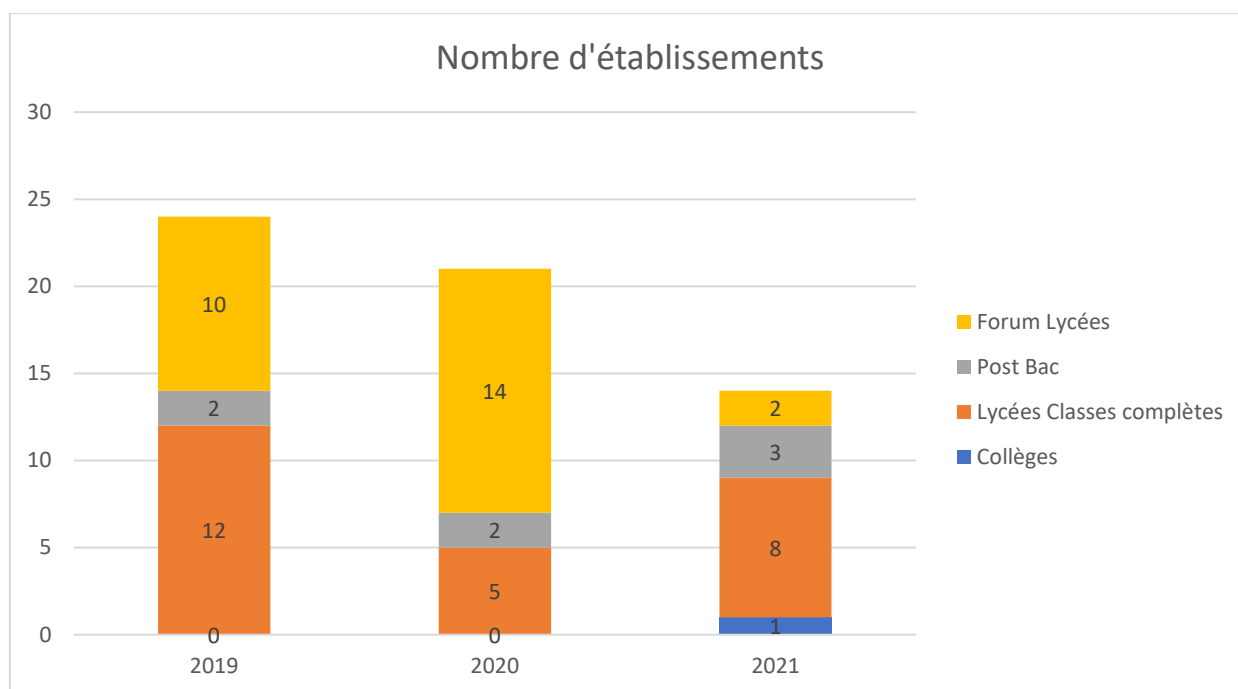
Nous intervenons sous forme de conférence « Ingénieur demain » qui comprend :

- Une vidéo ingénieur demain, ingénieur humain qui illustre la variété des activités et des métiers ainsi que la progressivité des carrières.
- Ingénieur Qui es-tu ? Que fais-tu ? Où es-tu ?
- Les secteurs porteurs !!!
- Les filières de formation
- Le monde de l'entreprise...et de la recherche.
- L'emploi et les salaires
- Questions Réponses

Le contenu a légèrement évolué ces dernières années pour s'adapter aux attentes des jeunes en renforçant la dimension humaine du métier, l'importance des « Softskills » de l'éthique, de la Responsabilité Sociétale des Entreprises et de la prise en compte des défis environnementaux.

Nos interventions, toujours sous forme de conférences, s'adressent à plusieurs cibles.

- Des classes complètes de Lycées, ce qui a pour avantage d'informer des élèves qui a priori n'étaient pas intéressés.
- Des classes complètes de première année d'IUT ou de classes préparatoires.
Rappelons que 40% des étudiants des IUT poursuivent leurs études après le DUT.
- Des Forums de métiers organisés dans les lycées. Dans ce cas la participation est un choix des élèves ils ont souvent pour objectif de s'inscrire à 3 métiers.



Si nous prenons en référence l'année scolaire 2018 2019

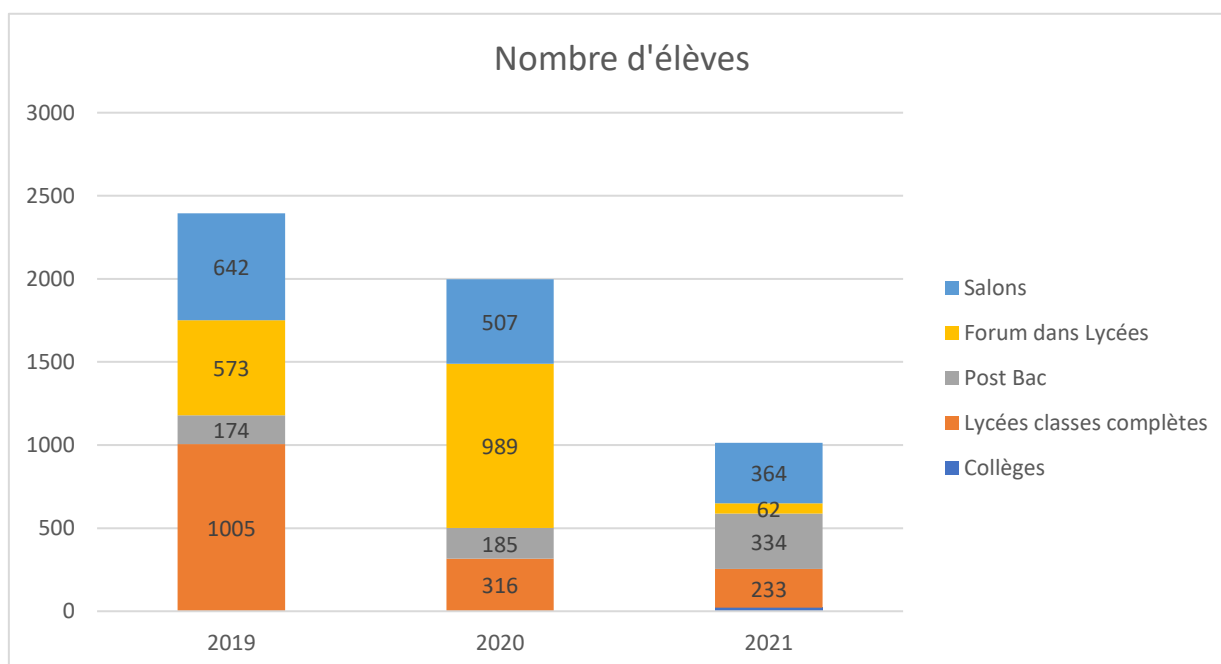
L'année scolaire 2019 2020 est caractérisée par une légère baisse du nombre total d'établissements liée à la pandémie.

Il y a, par ailleurs, une évolution significative des cibles, suite à la réforme du bac qui a été mise en application en classe de première en 2019, et donc avec l'apparition des spécialités, le concept de classes complètes disparaît.

On constate également que, de plus en plus d'établissements concentrent la visite d'intervenants extérieurs en organisant des Forums de métiers.

Ces deux facteurs entraîneront un accroissement du nombre de Forums au détriment des classes complètes.

L'année scolaire 2020 2021, en ce qui concerne nos interventions, est largement avancée et on constate un impact très fort de la pandémie. En effet la plupart des établissements ont supprimé leur Forum métiers vu le risque de mixage important des classes et des intervenants extérieurs.



Sur le plan du nombre d'élèves la diminution de classes complètes au profit du choix de la participation par les élèves entraîne une diminution du nombre d'élèves touchés pour un même nombre d'établissements, cette tendance se maintiendra les années suivantes.

Une baisse de 12% en nombre d'établissements correspond à une baisse de 17% en nombre d'élèves.

En référence à l'année scolaire 2018 2019, durant l'année 2019 2020, l'apparition de la pandémie a entraîné des suppressions d'événements publics tels que la Nuit de l'Orientation organisée par la CCI, le Salon de l'Apprentissage etc.

Pour l'année scolaire 2020 2021, pour les mêmes raisons, des événements importants comme la Fête de la Science ont été supprimés. Tous les salons, qui ont été maintenus, se sont déroulés en distanciel, en général diffusé en direct sur les chaînes Youtube des organisateurs de l'événement.

La majorité des interventions Post Bac ont été faites en distanciel conformément aux dispositions prises par l'Université.

En global, pour cette dernière année, 62% des interventions ont été faites en distanciel.

Il est certain que cela n'apporte pas la même qualité de contact et les questions réponses par « chat » ne donnent pas la même interactivité. Toutefois cela nous a permis de garder une activité et maintenir le contact avec les élèves/étudiants.

On peut raisonnablement espérer, pour l'année scolaire prochaine, un retour, avec des contacts directs, mais aussi bénéficier de ce que toute cette année nous aura appris dans les diverses technologies d'intervention à distance et ainsi de proposer une offre mixte permettant d'augmenter les voies d'accès à nos conférences.

Jean-Louis Droulin

Past-Président IESF Côte-d'Azur

Conférence PMIS à l'institut Stanislas de Cannes le 23/12/2020

En termes de PMIS (Promotion des Métiers de l'Ingénieur et du Scientifique), la fin de l'année 2020 a été marquée par un retour aux activités en présentiel mais avec beaucoup d'incertitudes.

En particulier, une conférence au sein de l'institut Stanislas de Cannes avait été décidée avec le Directeur-Adjoint chargé de l'Enseignement Supérieur en une téléconférence tenue le mercredi 30 septembre, avant les mesures de deuxième confinement.

Toutefois, cette conférence a pu avoir lieu en la salle Stanislas, dans le strict respect des gestes barrières, juste avant les vacances scolaires de fin d'année et face à des étudiantes et étudiants en CPGE (Classes Préparatoires Grandes Ecoles).

Parité oblige, cette conférence a été basée sur les témoignages d'une Ingénieure et d'un Ingénieur qui ont apporté des éclairages personnels sur le vécu au quotidien de leurs métiers respectifs.

D'une durée d'environ 1h30, cette conférence a été appréciée par toutes et tous.



Elle a permis à la douzaine de filles présentes de cerner concrètement un poste de Chef de Projet au féminin.

Elle s'est déroulée dans le cadre du traditionnel "Forum des Anciens" dont un compte-rendu est accessible par le lien ci-dessous :

<https://www.stanislas-cannes.com/23-prepas/1616-le-retour-des-ancien-ne-s>

Didier Lleu

4. LES TECHNOLOGIES QUANTIQUES : CONTEXTE ET ENJEUX, APPLICATIONS ET PERSPECTIVES

Quantum technologies : Context and challenges, applications and foresight

Jean-Pierre DAMIANO

Ancien ingénieur de recherches (Université Côte d'Azur CNRS)

Membre IESF-Côte d'Azur et URSI-France

jean-pierre.damiano@univ-cotedazur.fr

Résumé

Compte-tenu du contexte européen et mondial, de la compétition scientifique et technologique internationale, il existe des défis que notre société, où l'échange d'informations est omniprésent, doit relever. Il s'agit des enjeux concernant les technologies quantiques. Les pays qui les maîtriseront, auront un avantage stratégique indéniable dans les domaines de la médecine moléculaire, des nouveaux matériaux, du stockage du dioxyde de carbone, etc. Des Etats, des géants industriels, des consortiums privés et académiques de recherche investissent massivement dans des projets de recherche fondamentale ou d'innovation de rupture dans les secteurs de la communication, du calcul, de la simulation, de la cryptographie, de la métrologie et des capteurs quantiques. Cet article non exhaustif commente les enjeux économiques et sociétaux, décrit l'état des recherches, etc. Il expose quelques rappels de mécanique quantique, des éléments de technologie nécessaires et présente quelques applications actuelles et futures. Il offre des éléments de prospective. Les images ou les figures sont la propriété de leurs auteurs cités comme source. Pour en savoir plus, des références bibliographiques et des liens vers les sites d'organismes et d'institutions sont indiqués.

Mots-clefs

Algorithme, calcul quantique, capteurs, communication, cryptographie, cybersécurité, ingénierie quantique, innovation, intelligence artificielle, intrication, métrologie, photonique, physique quantique, quantique, qubits, scalabilité, simulation, superposition, supraconducteur, technologie quantique

Abstract

Given the European and global context, the international scientific and technological competition, there are challenges that our society, where the exchange of information is omnipresent, must meet. These are the issues regarding quantum technologies. The countries which master them will have an undeniable strategic advantage in the fields of molecular medicine, new materials, carbon dioxide storage, etc. States, industrial giants, private and academic research consortia are investing massively in fundamental research or breakthrough innovation projects in the communication, computing, simulation, cryptography, metrology and other sectors. quantum sensors. This non-exhaustive article comments on economic and societal issues, describes the state of research, etc. It presents some reminders of quantum mechanics, necessary elements of technology and presents some current and future applications. It offers elements of foresight. Images or figures are the property of their authors cited as the source. For more information, bibliographical references and links to the websites of organizations and institutions are provided.

Keywords

Algorithm, quantum computing, sensors, communication, cryptography, cybersecurity, quantum engineering, innovation, artificial intelligence, entanglement, metrology, photonics, quantum physics, quantum, qubits, scalability, simulation, superposition, superconductor, quantum technology

4.1 INTRODUCTION

Compte-tenu du contexte mondial, des tensions économiques et politiques internationales, de la compétition scientifique et technologique, il existe des défis que notre société doit relever. Il s'agit des enjeux concernant les technologies quantiques conduisant au contrôle de systèmes quantiques individuels ou de dispositifs quantiques. Elles sont caractérisées par l'utilisation des propriétés de la matière comme la superposition quantique d'états d'un dispositif physique ou l'intrication quantique de plusieurs sous-parties de ce dispositif.

Les principes de la physique quantique sont déjà appliqués quotidiennement dans divers dispositifs technologiques - les transistors, les lasers, le positionnement par satellite (GPS), les mémoires des appareils électroniques, les LED, l'IRM, etc. Les applications sont aujourd'hui les capteurs quantiques et la métrologie, les simulateurs quantiques, les communications quantiques et l'informatique quantique. Cette dernière aidera à résoudre des problèmes complexes que l'informatique classique ne peut pas effectuer. Pour d'autres problèmes, elle ne sera qu'un puissant accélérateur. Le calcul quantique pourrait, par exemple, être un outil incontournable pour modéliser les réactions chimiques à l'échelle moléculaire, en simuler le fonctionnement, d'où une meilleure connaissance et une prédiction des interactions protéines-médicaments adaptées au patient. Les capteurs quantiques concernent les voitures autonomes, les nouvelles sources d'énergie, l'industrie, les systèmes de défense, etc.

Dans l'informatique classique, les bits correspondent à des charges électriques circulantes qui traduisent le passage d'un courant électrique (bit de valeur 1) ou son absence (bit de valeur 0). La lecture du bit est déterministe : 0 ou 1. Dans l'informatique quantique, on considère des qubits qui peuvent prendre à la fois les valeurs 0 et 1 dans une proportion variable correspondant à la notion de superposition d'états. Un qubit est initialisé à 0. Suite aux différents

traitements (algorithmes), il se situe dans une infinité d'états et la valeur de sortie est 0 ou 1. Les qubits peuvent aussi être liés à d'autres qubits par une propriété appelée intrication. Les qubits sont des dispositifs matériels qui intègrent des particules élémentaires comme les ions piégés, les quasi-particules comme les fermions de Majorana, etc. Dans le cas de dispositifs supraconducteurs ou de quantum dots à silicium, l'état quantique s'appuie sur un grand nombre de particules, ici, des électrons.

Les technologies quantiques connaissent une forte expansion. Les Etats ont pris conscience que leur souveraineté pouvait être remise en cause si des investissements conséquents n'étaient pas réalisés dans la recherche fondamentale et appliquée, et dans des processus d'innovation de rupture. Les géants du numérique comme les GAFAM (Google, Apple, Facebook, Amazon et Microsoft), Alibaba et bien d'autres multiplient leurs efforts de recherche et donc attribuent des budgets conséquents.

Des investissements importants sont donc consacrés particulièrement par de nombreux pays, de quelques centaines de millions d'euros à plusieurs milliards. Depuis quelques années, des plans nationaux quantiques ont ainsi été lancés par des pays asiatiques comme l'Inde, la Chine, la Corée du Sud, le Japon, etc. En 2018, l'Union Européenne a lancé un *Quantum Technologies Flagship* (1 Md€) finançant déjà une vingtaine de projets financés. Ainsi les Etats-Unis ont promulgué une loi, *National Quantum Initiative Act*, offrant aux différentes agences fédérales des moyens financiers pour que le pays reste leader dans le domaine quantique.

Fort de ses compétences reconnues, d'un écosystème dynamique, d'une recherche d'excellence et d'industries de pointe, la France désire rester dans la compétition internationale et y jouer un des premiers rôles. Le rapport de la mission d'étude parlementaire (remis en janvier 2020 par la députée Paula Forteza) « Quantique : le virage technologique que la France ne ratera pas », préconise d'augmenter l'investissement sur ces technologies, de créer trois hubs quantiques à Paris, Saclay et Grenoble, sans oublier la formation avec des parcours spécialisés anticipant les besoins en ingénierie et technique industrielle. En janvier 2021, a été initié le Plan Quantique dont l'objectif est de fédérer les forces industrielles et de recherche, et de développer les actions en faveur de la recherche, l'industrie et la formation avec un budget de 1,8 Md€ sur 5 ans. La stratégie a été définie avec l'appui du CNRS, du CEA et de l'Inria. Pour atteindre un tel objectif, l'ingénierie intégrative mettant en jeu de nombreuses disciplines mérite d'être considérée, d'autant plus qu'avec les investissements dans les programmes nationaux et internationaux, l'émergence d'un grand nombre de start-up adossées aux organismes de recherche et aux industriels sera un atout indéniable.

Si certains annoncent les ordinateurs quantiques dans les 5 ou 10 ans à venir, d'autres mettent en avant les contraintes de réalisation tel le refroidissement nécessaire proche du zéro absolu, le coût des matériaux, etc. Il est indispensable de prendre en compte qu'un qubit d'une machine n'est pas équivalent à un qubit d'une autre machine. La puissance d'un ordinateur se mesure en nombre de qubits mais en prenant en compte le taux d'erreur et le temps de cohérence. Des contraintes thermodynamiques existent avec les qubits supraconducteurs et silicium, d'autres sont liées à la production de semi-conducteurs de qualité pour les qubits silicium et en nanophotonique, etc.

Un des défis à résoudre est la réalisation d'ordinateurs quantiques scalables c'est-à-dire capables d'accroître ses capacités de calcul sous une charge accrue quand des ressources généralement matérielles sont ajoutées.

En résumé, cet article non exhaustif expose les enjeux et les défis relatifs aux applications des technologies quantiques dont la maîtrise devrait assurer un avantage stratégique indéniable dans de nombreux domaines - la chimie, la santé, les communications, l'intelligence artificielle, la cryptographie, la cybersécurité, l'énergie, le développement durable, le climat, la finance, etc.

Il présente les recherches actuelles et différentes applications, etc. Il donne quelques éléments de prospective. Les références citées sont proposées pour approfondir le sujet.



Illustration de la conférence [Le quantique, c'est fantastique](#)
14 juin 2018 à Nantes, au Web2day par [Hélène Pouille](#)

4.2 LE CONTEXTE ET LES ENJEUX DE LA RECHERCHE

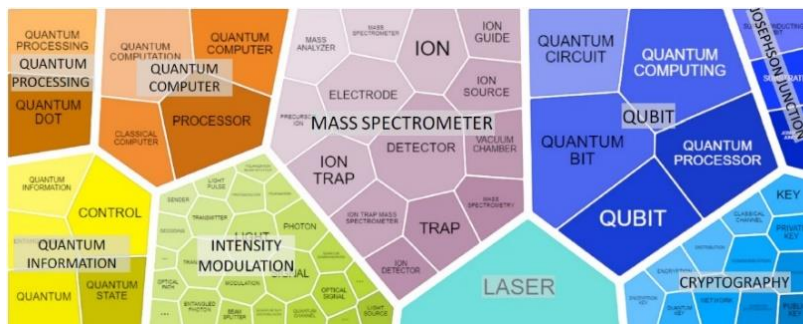
Compte-tenu de la compétition scientifique et technologique internationale, il existe des défis que notre société où l'échange d'informations est omniprésent, doit relever : ils concernent les technologies quantiques d'où des enjeux de souveraineté indéniables. Les pays qui les maîtriseront, auront un avantage stratégique indéniable dans les domaines de la médecine moléculaire, des nouveaux matériaux, de la chimie, du stockage du dioxyde de carbone, etc. Des Etats, des géants industriels, des organismes privés et académiques de recherche investissent massivement dans des projets de recherche fondamentale ou d'innovation de rupture dans les secteurs de la communication, du calcul, de la simulation, de la cryptographie, de la métrologie et des capteurs quantiques.

Du point de vue des brevets déposés aux Etats-Unis, IBM occupe la première place avec 9130 brevets déposés aux Etats-Unis en 2020 dont une part importante concerne l'informatique quantique. IBM est suivi par Samsung, puis Canon, Microsoft, Intel, etc. C'est le domaine informatique qui y est fortement représenté. Au niveau mondial, IBM arrive en seconde place derrière Samsung. Plusieurs entreprises industrielles telles que Bosch et General Electric s'invitent aussi dans le top 10.

L'analyse des brevets concernant le quantique, et plus précisément l'informatique quantique, entre 2010 et 2020 laisse apparaître que les États-Unis sont devant la Chine et le Japon, avec des enjeux de souveraineté très importants même si la France et l'Union Européenne ont développé une grande partie de la recherche académique dans ce domaine.

Cependant, la Chine devient leader pour les applications quantiques du type communication quantique, cryptographie quantique ou encore algorithme quantique.

Une étude scientométrique concernant l'informatique quantique a été réalisée sur la période 2010-2020, à partir des publications indexées dans la base de données [Scopus](#). Cela concerne 111 pays dont les 10 plus productifs totalisent 98,9 % des publications : Etats-Unis, Chine, le Royaume-Uni, ..., la France (9^{ème} position et 4,3% des publications).



Représentation des concepts techniques les plus utilisés à partir des brevets étudiés. D'autres regroupements sont possibles.



Les institutions les plus prolifiques
160 à 524 publications chacune

[Sources : [Lorsque le monde de l'informatique quantique rencontre le monde des brevets !](#) B. Delsol, HAUTIER IP, 25 août 2020 ; [Lab Quantique](#) ; [LeBigData](#) ; [Les enjeux de la recherche et l'intelligence économique et stratégique](#), J.-P. Damiano, Tech. Ing. Octobre 2019].

Aux Etats-Unis, dès 2014, la coordination de la recherche dans les différentes branches du quantique a été initiée. Face au risque de domination de la Chine, fin 2018, le gouvernement américain a promulgué une loi dotant les agences fédérales (DoE, NSF, etc.) d'un premier financement de 1,25M\$ à répartir sur des projets pour une période de cinq ans : le National Quantum Initiative Act ([NQI Act](#)) en vue de coordonner les collaborations et les compétences « pour accélérer la recherche et le développement quantique pour la sécurité économique et nationale » du pays. Le fort partenariat des mondes académique et industriel a permis une activité de recherche et d'innovation très prolifique. Des plans nationaux quantiques ont été initiés et développés dans de nombreux pays. La figure suivante en donne quelques détails.

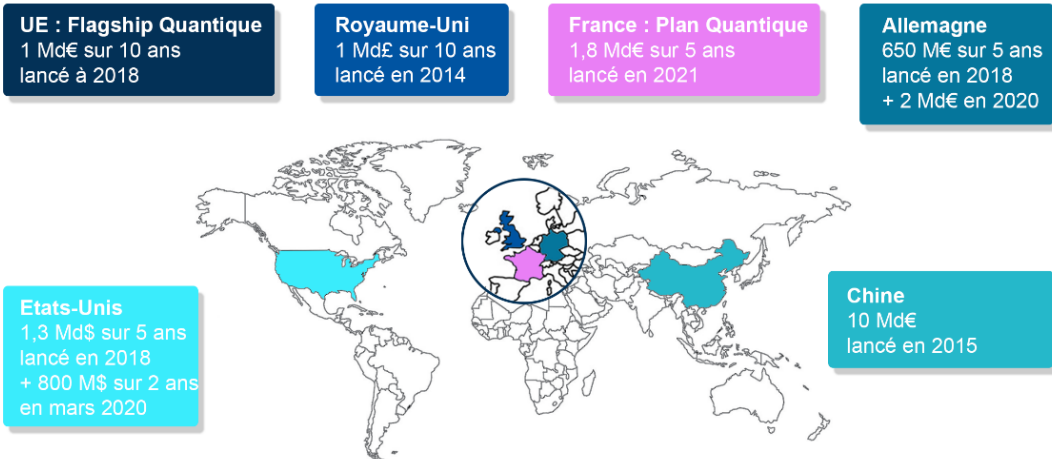
L'Union Européenne (UE) a déployé des efforts importants pour se positionner parmi les premiers dans cette course internationale. En mai 2016, des milliers de scientifiques issus des mondes académique et industriel signaient un document : le [Manifeste quantique](#). Ils demandaient aux États membres et à la Commission européenne de formuler une stratégie commune afin que l'UE soit et reste à l'avant-garde de la deuxième révolution quantique.

Deux ans plus tard, l'UE initie un programme d'envergure, le [Quantum Technologies Flagship](#), pour soutenir les projets européens de recherche et d'innovation relatifs aux technologies quantiques (1Md€ sur 10 ans). Il a déjà soutenu [19 projets dont dix avec une participation du CNRS](#) dans les domaines des capteurs quantiques, des communications, du calcul et de la simulation.

Par exemple, [S2QUIP](#) (Scalable Two-Dimensional Quantum Integrated Photonics) conçoit et réalise des circuits photoniques intégrés quantiques afin de permettre les échanges entre des porteurs d'informations quantiques par des canaux. Dans le cas de la détection quantique et de la métrologie, [MetaboliQs](#) est un projet tirant partie de la dynamique diamantique à température ambiante pour une imagerie cardiaque multimodale sûre, aidant à diagnostiquer les maladies cardiovasculaires.

Le Plan Quantique, ambitieux et attendu

Quelques investissements gouvernementaux dans les technologies quantiques autour du globe.



© CNRS - Source : sites gouvernementaux, rapport Forteza et Olivier Ezratty

La France fait face à une concurrence accrue liée aussi bien aux performances des États-Unis, du Royaume-Uni, de l'Allemagne qu'à l'émergence de nouveaux acteurs de la recherche dont l'Asie du Sud-Est, la Corée, la Chine, l'Inde, etc. Elle a des atouts certains comme l'excellence scientifique des travaux de ses chercheurs reconnus par leurs pairs au niveau international, par exemple - Dassault Systèmes n°1 mondial des logiciels de conception par ordinateur ; Atos fabricant reconnu de supercalculateurs, *simulateurs quantiques* ; STMicroelectronics, SOITEC, le CEA-Leti constituant une filière de premier plan mondial en microélectronique ; Thales en métrologie quantique, etc. On peut citer la ville de Grenoble qui se classe parmi les cinq premières villes innovantes en nanotechnologies au monde et première en Europe grâce à son écosystème alliant start-up et entreprises innovantes, instituts d'enseignement et de recherche œuvrant dans le domaine de la haute technologie. Plus spécifiquement dans le quantique (calcul, thermodynamique, cryptographie, etc.), il faut saluer le travail effectué par les chercheurs du [CNRS](#), du [CEA](#) et de [Inria](#).

- En 2012, le Prix Nobel de physique a été décerné au français Serge Haroche et à l'Américain David G. Wineland pour leurs travaux sur la physique quantique et les photons [[les Echos](#)].
- En 2010, le Prix Wolf a récompensé les résultats des recherches d'Alain Aspect en physique quantique [[FranceTvInfo](#)]. En 2005, il avait reçu la médaille d'or du CNRS pour ses travaux pionniers sur l'intrication quantique. Pour mémoire, Alain Aspect, Philippe Grangier et Jean Dalibard avaient prouvé l'existence de l'intrication quantique dans leur fameuse expérience de 1982 [[FuturaSciences](#)].
- En 2007, le Prix Nobel de Physique a été attribué à Albert Fert, professeur à l'Université Paris-Sud 11, directeur scientifique au sein de l'Unité mixte de physique CNRS/Thales, lauréat du Japan Prize 2007 et du Wolf Prize 2007, médaille d'or du CNRS en 2003. Cela récompensait ses travaux dans le domaine des nanosciences, dont la découverte de la magnétorésistance géante (GMR). Le colauréat est l'allemand Peter Grünberg pour des travaux de même nature. [conférence d'Albert Fert à l'Ecole Normale Supérieure, le 20 septembre 2007 - [Spintronique : le spin s'invite en électronique](#)]

Ces réussites sont le fait des mondes académique et industriel à travers des actions de coopération, des contrats, des partenariats, des programmes, de la mobilité des chercheurs, etc. permettant le regroupement de compétences et de sources d'investissement. Cela implique évidemment des politiques de valorisation, de formations, de filières d'enseignement spécialisé, des réglementations, une bonne connaissance des aspects juridiques et financiers et des droits de la protection intellectuelle.

[Sources : [les acteurs de l'informatique quantique](#), déc. 2020 [INRIA](#) ; G. Bousquet, [La physique quantique est partout dans notre quotidien](#), Sciences et techniques, Rencontres d'Occitanie, invité S. Haroche, La Dépêche, 25 janv. 2017 ; [Les enjeux de la recherche et l'intelligence économique et stratégique](#), J.-P. Damiano, Tech. Ing. Oct. 2019]

4.3 LE PLAN QUANTIQUE FRANÇAIS

Le rapport « [Quantique : le virage technologique que la France ne ratera pas](#) » de la mission d'étude parlementaire, confiée par le Premier Ministre en mars 2018 à la députée Paula Forteza, a été remis, le 9 janvier 2020. Il a été rédigé avec deux co-rapporteurs, Jean-Paul Hertaman, Président d'honneur du GIFAS, PDG du Groupe SAFRAN, et Iordanis Kerenidis, DR CNRS. Ce rapport propose plusieurs recommandations concernant l'augmentation des investissements sur les technologies quantiques à hauteur de 1,4 Md€ sur 5 ans, la création de trois hubs quantiques à Paris, Saclay, Grenoble et enfin la formation de nouveaux talents issus de cursus en ingénierie et en informatique quantique.

Ambitions pour la France

- Devenir l'un des leaders mondiaux en matière de calculateurs quantiques tolérants aux défauts (LSQ) et bruités de taille intermédiaire (NISQ) ;
- Devenir l'un des leaders mondiaux en matière de logiciels métiers ;
- Jouir d'une large autonomie industrielle sur les technologies habilitantes et sur les capteurs à base des impuretés dans le diamant ;
- Maintenir une indépendance stratégique sur les technologies de cryptographie.

[Source : [ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation](#), janvier 2020]

Les recommandations stratégiques

- Une infrastructure de calcul quantique de pointe à destination de la recherche et l'industrie ;
- Un programme de développement technologique ambitieux associant acteurs publics et privés ;
- Un programme de soutien au développement des usages associés aux secteurs technologiques ;
- Un environnement d'innovation efficace basé sur des pôles de recherche et développement reconnus au plan international ;
- Une stratégie de sécurité économique adaptée ;
- Une gouvernance efficace, agile et dotée d'un pouvoir décisionnel, associant l'Etat, les organismes de recherche et les industriels.

En regard des enjeux stratégiques et de l'urgence d'avoir les moyens de se positionner parmi les meilleurs, le [Plan quantique français](#) a été initié le 21 janvier 2021. Il est financé à hauteur de 1,8 Md€ sur 5 ans. Selon [Sébastien Tanzelli](#), chargé de mission technologies quantiques au CNRS et membre de la Task Force pilotée par l'État, le plan permettra de structurer les forces vives du pays sur le domaine des technologies quantiques et des technologies « habilitantes » (matériaux de pointe et cryogénie). Le plan reprend certaines propositions du rapport [Forteza](#).

Pour relever ces défis, le plan prévoit des actions en faveur de la recherche, de l'industrie et de la formation, financées par le PIA et le plan « France relance », à hauteur de 1,8 Md€ :

- Simulateurs et machines partiellement quantiques : 350 M€ ;
- Ordinateurs quantiques à part entière : 430 M€ ;
- Capteurs : 250 M€ ;
- Cryptographie post-quantique : 150 M€ ;
- Communications quantiques : 320 M€ ;
- Technologies annexes (cryogénie, etc.) : 300 M€.

4.4 LES ÉCOSYSTÈMES QUANTIQUES

Un écosystème quantique est la mise en synergie, sur une unité géographique, de la recherche fondamentale interdisciplinaire (physique quantique, ingénierie, informatique, sciences humaines et sociales), de l'industrie, de la formation, des plateformes technologiques et du soutien à l'innovation. Au sein d'une telle disposition, les universités de recherche savent organiser la circulation des savoirs et des personnes, ainsi que leurs réseaux nationaux et internationaux d'enseignants, de chercheurs et d'ingénieurs publics et privés.

Avec leurs partenaires industriels, les organismes de recherche, les services de l'Etat, les start-up issues de leurs laboratoires, les universités sont au cœur de grands programmes ambitieux sur le quantique et les technologies (atomes froids, photonique, silicium, cryogénie, logiciels, cryptographie, etc.) en vue de la mise en place d'une filière française et européenne souveraine.

Pour atteindre un haut niveau de performance dans les équipes de recherche travaillant sur les technologies quantiques, il est nécessaire d'associer des expertises pluridisciplinaires et de développer un cursus de formation inspirée par les avancées scientifiques afin de résoudre les problèmes rencontrés. C'est l'ingénierie intégrative qui conduira à trouver des solutions deeptech et donnera un avantage certain pour un positionnement européen ou mondial.

Par exemple, le pôle grenoblois est au sein d'un maillage industriel important comprenant entre autres, Air Liquide qui amène ses compétences dans la cryogénie et STMicroelectronics dans la micro-électronique. Ainsi le [GIANT](#) (*Grenoble Innovation for Advanced New Technologies*) est une alliance de 8 partenaires issus de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'industrie parmi lesquels sont présents des laboratoires européens de renommée mondiale : l'*European Molecular Biology Laboratory* ([EMBL](#)), la source de lumière de l'*European Synchrotron Radiation Facility* ([ESRF](#)) et la source de neutrons de l'*Institut Laue-Langevin* ([ILL](#)).

LES UNIVERSITÉS MEMBRES



De même le CNRS soutient de nombreuses start-up positionnées particulièrement sur les capteurs quantiques et les systèmes de communication quantique :

- La société [Quandela](#) développe des sources à photon unique et des modules de plateforme unique d'informatique quantique à l'aide de qubits photoniques et de points quantiques semi-conducteurs. Les recherches sont issues du [C2N](#) (Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, CNRS - Université Paris-Saclay) accompagné par la société [Atos](#). Elle a remporté l'appel à projets Innov'up Leader PIA, lancé par l'État et la Région Île-de-France et opéré par Bpifrance. Elle avait eu une levée de fonds d'amorçage à 1,5 M€. Prometheus est sa nouvelle génération de générateurs de photons indistingables, exploitables dans le calcul et la cryptographie quantiques ;
- La start-up [Alice & Bob](#) a réussi à résoudre un type d'erreur quantique par le développement du bit quantique du Chat intégrant une correction autonome d'erreur (avec les laboratoires de l'ENS Paris, l'ENS de Lyon, les Mines ParisTech, l'INRIA et le CEA Saclay). Cela va permettre la mise au point d'un ordinateur quantique prototype opérationnel dans les 5 ans à venir. Une levée de 3,3 M€ a eu lieu auprès de fonds d'investissement (fonds PSL avec deux Elaia et Breega) ;
- La société [Pasqal](#), forte de nombreuses réalisations dans l'ingénierie des lasers, des systèmes de vide et de détection, développe ses recherches sur les simulateurs quantiques programmables pour résoudre des problèmes complexes. Pasqal est la première start-up française de hardware quantique, une des toutes premières en Europe. Elle a obtenu un partenariat avec [Atos](#) pour développer un accélérateur quantique reposant sur la technologie des atomes neutres afin de développer des systèmes hybrides quantique-HPC exploitables à court terme (HPC : High Performance Computing). Récemment, [EuroHPC](#), initiative conjointe de l'UE, de pays européens et de partenaires privés, a sélectionné le consortium européen HPCQS (regroupant le CNRS, le CEA, l'INRIA, Atos et Pasqal) en vue de réaliser en 2023 le premier ordinateur européen intégrant un accélérateur quantique d'au moins 100 qubits.

De nombreuses autres start-up amènent leur part d'innovation. Elles arrivent à lever des fonds pour débiter leurs travaux de recherche. En voici quelques-unes (non exhaustif !) ci-après :

- Le laboratoire de physique de l'ENS héberge la start-up [C12 Quantum Electronics](#), cofondée en janvier 2020 par Matthieu et Pierre Desjardins. Elle développe des processeurs quantiques d'haute-fidélité, grâce aux nanotubes de carbone : amélioration de l'isolation des électrons piégés et le temps de stabilité (cohérence) des qubits d'un facteur 100, atteignant une seconde. Ayant une interface minimale avec son environnement, le qubit du processeur a le potentiel d'avoir une probabilité très faible d'erreur. C'est une technologie prometteuse issue de l'électronique quantique, de la science des matériaux et de la nano-fabrication ;
- [ParityQC](#) développe des architectures pour les ordinateurs quantiques pour résoudre des problèmes d'optimisation. L'architecture Parity Quantum Computing fournit le jeu d'instructions et la disposition des puces quantiques numériques ou analogiques ainsi que des algorithmes quantiques par co-développement. Elle est indépendante de la plate-forme et de la méthode avec des avantages adaptés. Par sa complexité réduite, elle rend les plates-formes matérielles hautement évolutives ;
- [VeriQloud](#) est spécialisée dans la fourniture de solutions logicielles de sécurisation quantique des télécommunications. La communication quantique peut améliorer la sécurité, mais les contraintes matérielles la réservent aux infrastructures à grande échelle. VeriQloud a conçu Qline, une architecture matérielle et surtout logicielle de télécommunications, particulièrement économe en infrastructure réseau photonique par rapport aux architectures quantiques traditionnelles. Qline rend la cybersécurité quantique réalisable à petite échelle. Une recherche est menée sur les applications, les logiciels et les architectures. La distribution de clés quantiques (QKD) suivant le protocole de Bennet et Brassard (le premier en cryptographie quantique) permet l'établissement de clés secrètes sur un canal de communication non sécurisé : sécurité inconditionnelle où toute tentative de corrompre les données est impossible ;
- [LightOn](#) est née d'une collaboration entre l'Institut Langevin et le LKB. Elle développe le calcul photonique haute performance pour l'IA transformatrice à grande échelle. Sa technologie révolutionnaire, plus efficace en énergie et en vitesse, débloque des modèles d'apprentissage automatique d'ordre de grandeur plus grands que l'état de l'art, en réinventant l'ensemble du matériel et de la pile algorithmique. La technologie, sous licence exclusive de l'université PSL, a été initialement développée dans des laboratoires de l'ENS et de l'ESPCI à Paris.

Pour plus de détails, [l'e-book d'Olivier Ezratty et Quantum Computing Report, List of Private/Startup Companies](#)

Les investissements accompagnent les défis technologiques, les enjeux économiques et de souveraineté provoqués par le développement des recherches et réalisations quantiques. Pour mémoire, Bpifrance joue un rôle important dans le financement des start-up et des entreprises qui se lancent dans l'industrialisation d'applications liées aux technologies quantiques. Il faut noter que [Quantonation](#) est le premier fonds d'investissement français spécialisé entièrement dans les technologies quantiques.

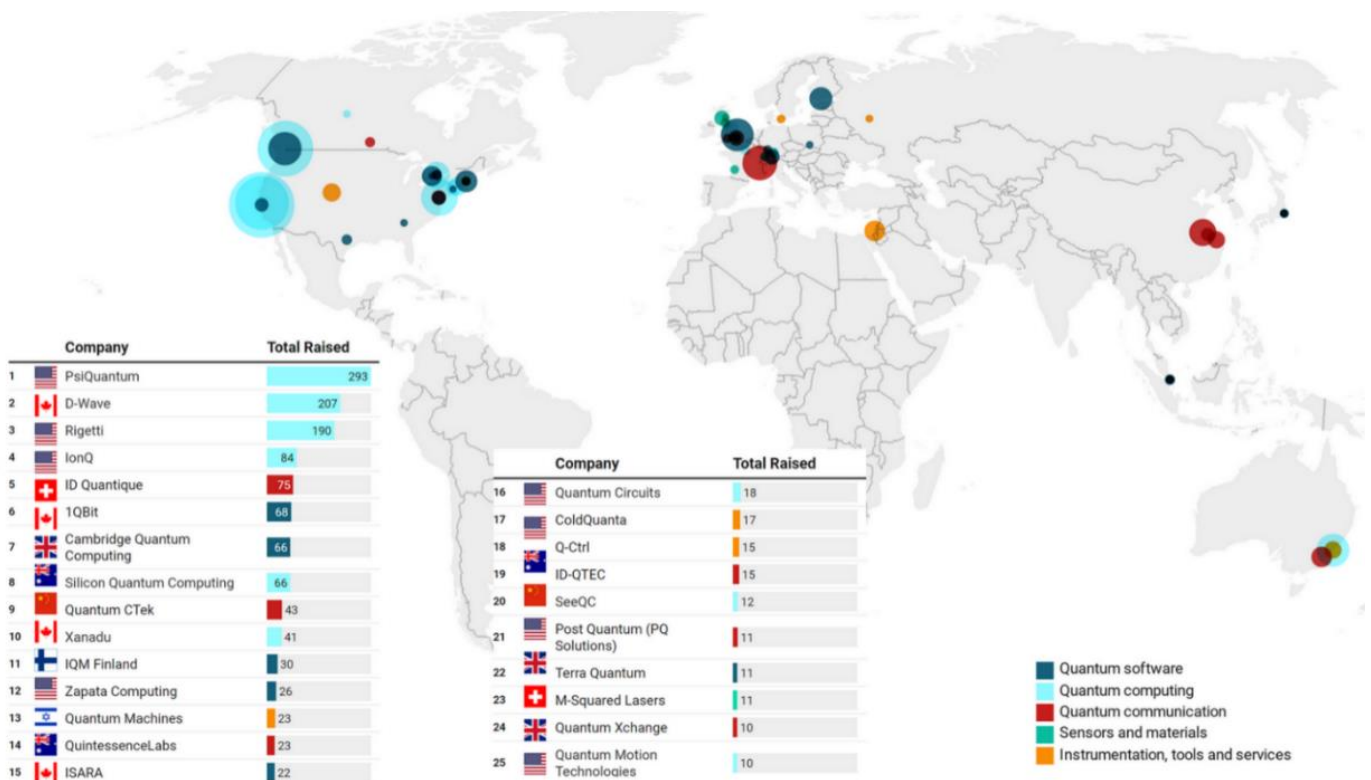
Le quatrième programme d'investissements d'avenir ([PIA 4](#)) a présenté plusieurs dispositifs pour soutenir la recherche et l'innovation françaises (8 janvier 2021), à côté d'autres dispositifs régionaux, nationaux et européens, et des moyens de la [Loi de programmation de la recherche](#) (LPR). Le pilote scientifique CNRS pour ce Programme et équipements prioritaires de recherche (PEPR) est Sébastien Tanzilli, DR CNRS à l'Institut de physique de Nice, directeur du [GDR "Ingénierie quantique : fondements et applications"](#) et directeur adjoint scientifique pour les technologies quantiques à l'Institut de physique (INP).

Les PEPR représentent la partie des stratégies nationales d'accélération, consacrée à la structuration des communautés de recherche et aux premières avancées scientifiques. « *Notre force en quantique repose aussi sur l'émergence de start-up qui valorisent déjà les découvertes scientifiques des laboratoires* » : confirme Alain Schuhl, directeur général délégué à la science du CNRS.

Dans une étude récente publiée par [Michel Kurek](#), il apparaît que, depuis 2012, 1,5 Md\$ ont été investis dans des start-up de technologie quantique (80 répertoriées dans la base de données).

- Près des deux tiers des investissements déclarés (62,5%) ont été consacrés à 15 entreprises travaillant à la construction de processeurs quantiques (hardware) ;
- Les logiciels (37 firmes) ont reçu 285 M\$ et les communications (12 entreprises) ont levé 192 M\$;
- Les techniques de mesure ou de détection basées sur la physique quantique (9 sociétés) ont reçu 23 M\$ et les composants de base (8 sociétés) ont levé 62 M\$.

La figure, ci-après, illustre les start-up ayant reçu plus d'1 M\$ en investissements et les 25 plus importantes : elles se trouvent surtout en Amérique du Nord ([PsiQuantum](#), [D-Wave](#), [IonQ](#), [Rigetti](#)). Toutes les start-up ne sont pas au même niveau de développement et la liste n'est pas exhaustive.



[Sources :

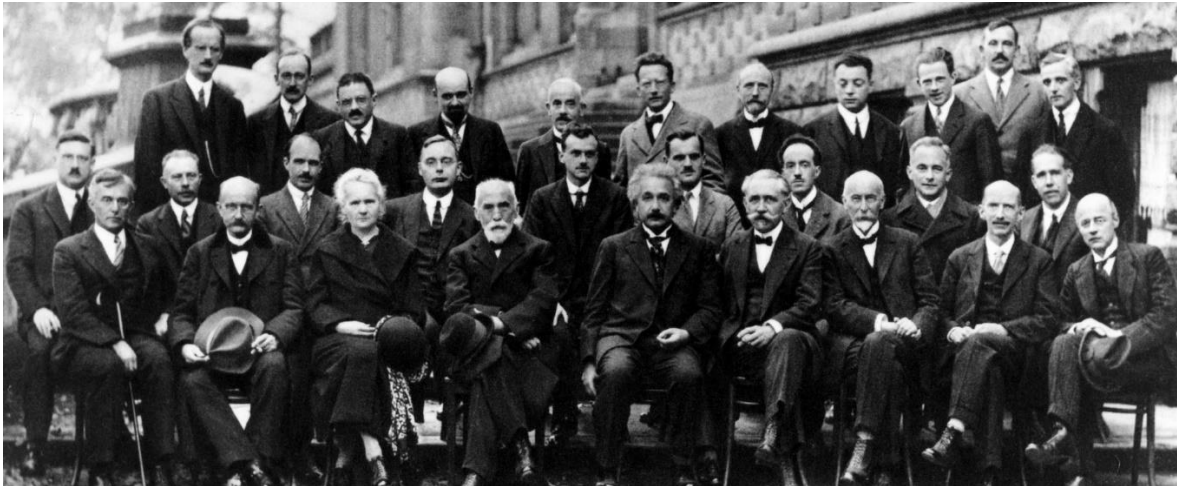
- [Les start-up françaises parées pour la transition quantique](#), CNRS Le Journal, 27 nov. 2020, actualisée 12 janv. 2021
- [Plan national quantique, La France se dote de ressources complémentaires pour accélérer la recherche sur les technologies quantiques](#), A. Brenac. REE n°1 (2021)
- [Comprendre l'informatique quantique](#), O. Ezratty, sept. 2020
- [Un nouveau record se profile dans le financement par capital-risque des startups quantiques](#), M. Kurek, 8 sept. 2020
- [La recherche française au cœur du Plan Quantique](#), CNRS, 21 janvier 2021
- [La France doit construire un écosystème des technologies quantiques](#), tribune de Christophe Jurczak et al., Le Monde, 24 janvier 2021

4.5 PHYSIQUE QUANTIQUE ET MÉCANIQUE QUANTIQUE

Les théories quantiques marquent une rupture avec la physique classique comprenant la mécanique newtonienne et la théorie électromagnétique de Maxwell, comme ce fut le cas avec la théorie de la relativité d'Einstein.

La [physique quantique](#) est l'appellation générale du corpus de théories physiques, nées au début du XX^{ème} siècle, qui décrivent le comportement des atomes et des particules et permettent d'élucider certaines propriétés du rayonnement électromagnétique. Elle a initiée la physique atomique, la physique nucléaire, la chimie, etc. sans oublier son rôle dans la compréhension des premières phases de constitution de l'Univers. Cette physique obéit à des lois étranges et contre-intuitives. Elle concerne donc des domaines où l'utilisation des lois de la [mécanique quantique](#) est nécessaire pour comprendre les phénomènes en jeu. La mécanique quantique est la théorie fondamentale des particules de matière constituant les objets de l'univers et des champs de force animant ces objets.

Mathématiciens et physiciens ont travaillé ensemble pour tenter d'expliquer le rayonnement du corps noir, l'effet photo-électrique ou l'existence des raies spectrales. Les premiers ont élaboré des modèles théoriques, les seconds ont réalisé des expériences qui ont permis d'identifier les paradoxes.



5^{ème} congrès de Physique Solvay en octobre 1927, à Bruxelles, sur le thème « Électrons et photons ».

Parmi les 29 scientifiques présents, 17 étaient ou devinrent prix Nobel !

Leurs échanges ont été enrichissants et ont conduit à des interprétations physiques prometteuses.

3^{ème} rang : Auguste **Piccard** (1884-1962), Emile **Henriot** (1885-1961), Paul **Ehrenfest** (1880-1933), Edouard **Herzen** (1877-1936), Theophile **de Donder** (1872-1957), Erwin **Schrödinger** (1887-1961), Jules-Emile **Verschaffelt** (1870-1955), Wolfgang **Pauli** (1900-1958), Werner **Heisenberg** (1901-1976), Ralph **Fowler** (1889-1944), Léon **Brillouin** (1889-1969)

2^{ème} rang : Peter **Debye** (1884-1966), Martin **Knudsen** (1871-1949), William Lawrence **Bragg** (1890-1971), Hendrik **Kramers** (1894-1952), Paul **Dirac** (1902-1984), Arthur **Compton** (1892-1962), Louis **de Broglie** (1892-1987), Max **Born** (1882-1970), Niels **Bohr** (1885-1962)

1^{er} rang : Irving **Langmuir** (1881-1957), Max **Planck** (1858-1947), Marie **Curie** (1867-1934), Hendrik **Lorentz** (1853-1928), Albert **Einstein** (1879-1955), Paul **Langevin** (1872-1946), Charles-Eugène **Guye** (1866-1942), Charles Thomson Rees **Wilson** (1869-1959), Owen Williams **Richardson** (1879-1959)

[Sources : Bernard Diu, *Le congrès Solvay de 1927 : petite chronique d'un grand événement*, Bibnum [En ligne], Physique, mis en ligne le 01 avril 2009, consulté le 31 mars 2021. <http://journals.openedition.org/bibnum/846> ; Site de vulgarisation scientifique d'Etienne Klein. <https://etienneklein.fr/congres-solvay/>

Si le formalisme mathématique de la mécanique quantique est proprement efficace, son interprétation crée des conflits au sein de la communauté scientifique : la superposition quantique, l'intrication ou la non-localité, la dualité onde-corpuscule.

4.5.1 LE PRINCIPE DE SUPERPOSITION QUANTIQUE

En mécanique quantique, il exprime qu'un même état d'un système quantique (particule, atome, photon, etc.) peut posséder plusieurs valeurs pour une certaine quantité observable (spin, position, quantité de mouvement, etc.). Il se représente donc par un vecteur dans un espace vectoriel (espace de Hilbert) décomposable en une combinaison linéaire de vecteurs selon une base donnée. Par exemple, si l'on s'intéresse à la position d'une particule, cet état doit être représenté comme une somme d'un nombre infini de vecteurs, chacun étant relatif à une position précise dans l'espace : c'est l'état de superposition. Le carré de la norme de chacun de ces vecteurs représente la probabilité de présence de la particule à une position donnée. L'opération de mesure détruit la superposition : elle consiste à projeter le vecteur, représentant toutes les positions possibles, sur un des vecteurs de la base, et d'obtenir ainsi une position (ou toute autre observable) précise.

4.5.2 L'INTRICATION QUANTIQUE

L'intrication quantique est un phénomène, issu des équations de la théorie quantique, découvert par Erwin Schrödinger et Albert Einstein avec ses collaborateurs Boris Podolsky et Nathan Rosen : deux particules émises simultanément se comportent par la suite comme un système unique. Elles conservent des propriétés quantiques corrélées. Une mesure effectuée sur l'une permet de déduire l'état de l'autre quelle que soit la distance qui les sépare.

Les états intriqués (ou enchevêtrés) ne peuvent pas être utilisés pour communiquer d'un point à un autre de l'espace-temps plus vite que la lumière : ils sont seulement coordonnés et le résultat de la mesure relatif au premier objet est toujours aléatoire. Le théorème de Bell démontre que l'intrication donne lieu à des actions non-locales. Toute interception de ces particules change la mesure et devient visible. Par exemple, une paire de photons intriqués constitue toutefois un objet très fragile car à la moindre perturbation, elle perd son caractère quantique. Il est donc nécessaire de la maintenir dans l'espace très contrôlé des laboratoires ou au sein de fibres optiques.

C'est la démonstration de l'existence de l'intrication quantique par [Alain Aspect](#) et ses collègues Philippe Grangier, Gérard Roger et Jean Dalibard effective en 1982, qui a permis de développer les recherches quantiques. Le théorème de Bell et l'intrication quantique ont donc des applications potentielles dans les domaines de l'information quantique, tels que la cryptographie quantique, la téléportation quantique ou l'ordinateur quantique.

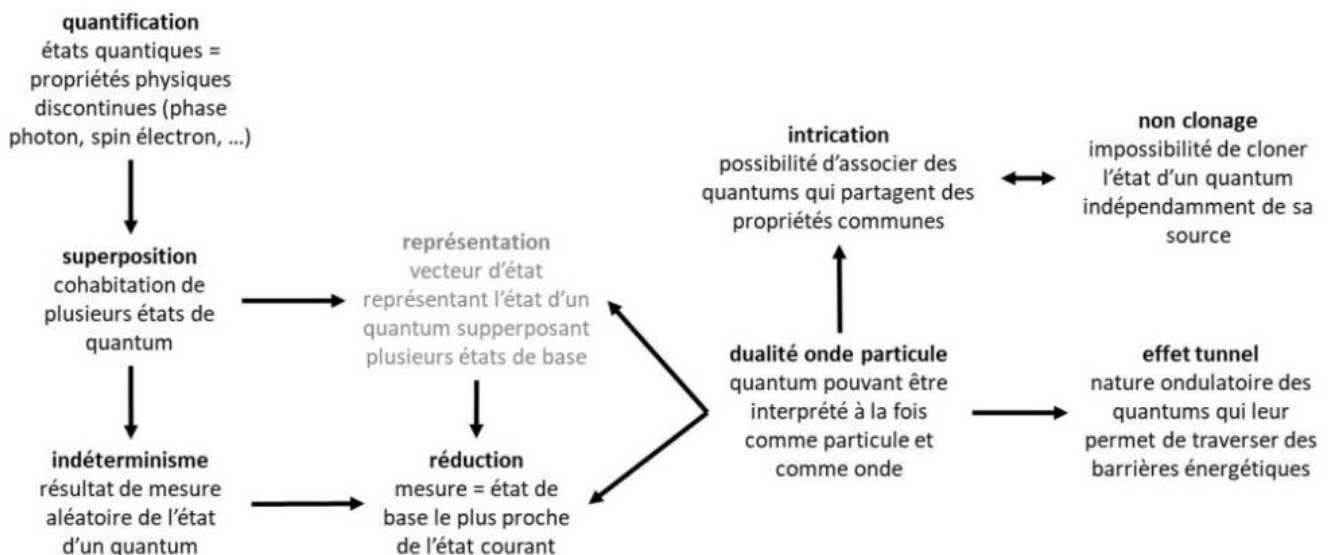
[Sources : [Comprendre l'informatique quantique](#), Opinions libres, 9 sept.2020, Olivier Ezratty ; [Wikipédia](#)]

« Pour comprendre ce principe, imaginons que l'on coupe une chemise en deux parties (gauche et droite). À l'aveugle, on met chaque partie de la chemise dans deux boîtes différentes. Ces deux boîtes sont envoyées en deux endroits différents, par exemple New-York et Tokyo. Une fois arrivée à Tokyo, la boîte est ouverte contenant la partie gauche de la chemise. Du coup on a instantanément l'information que la partie droite se trouve à New-York, et ceci sans ouvrir la boîte de New-York. L'information de New-York s'est donc « propagée instantanément » vers Tokyo. Notre correspondant tokyoïte peut, sans avoir ouvert sa propre boîte, appeler son correspondant de New-York et lui demander d'ouvrir sa boîte : l'observation du contenu par le correspondant new-yorkais, lui permet de transmettre immédiatement l'information du contenu de la boîte de Tokyo sans pour autant l'avoir ouverte. Il y a donc bien une sorte de lien immédiat entre les deux boîtes quant à l'information sur leur contenu, une sorte de collaboration implicite entre les deux boîtes. »

[Source : [Comprendre le quantum computing pour se préparer à l'inattendu](#). Rapport CIGREF, février 2020]

4.5.3 LA DUALITÉ ONDE-PARTICULE

Les électrons peuvent se comporter comme des ondes suite à un phénomène de diffraction lorsqu'ils sont projetés contre un cristal, par exemple. En fait, la matière comme la lumière doivent être décrites en utilisant les concepts d'onde (fréquence, longueur d'onde, interférences, etc.) et de particule (masse, énergie, mouvement) : c'est la dualité onde-particule. Ainsi il est possible de faire interagir des qubits physiques comme des ions piégés avec de l'énergie sous forme de photons émis par des lasers, selon les algorithmes quantiques écrits. C'est donc la dualité onde-particule qui conduit à la valeur finale parmi les valeurs superposées dans les états de registres de qubits.



(cc) Olivier Ezratty, 2018

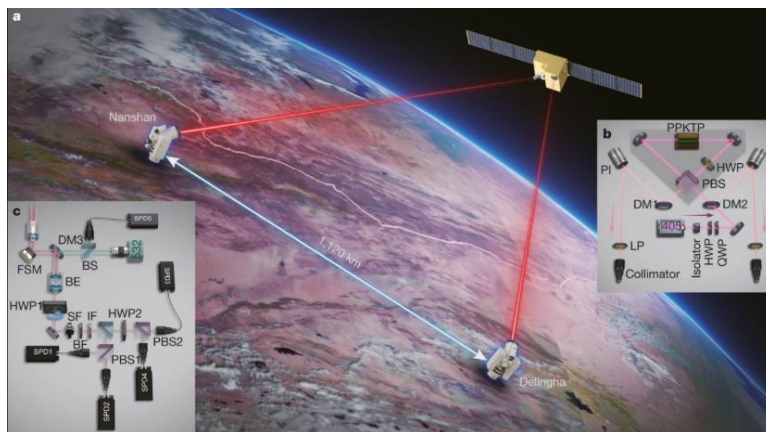
Schéma de connexion et relations de causalité des principes de base de la physique quantique

Des chercheurs chinois, grâce au satellite Micius, lancé en 2016, ont réussi à transmettre à la surface de la Terre, depuis l'espace, une clé de cryptage quantique.

A son bord, un système laser et de cristal envoie vers la Terre des millions de paires de photons intriqués, par seconde. Seule une paire parvient au sol, un photon au récepteur de Delingha, l'autre à Lijiang, distants de 1 203 km.

Comme prévu par la théorie, une mesure sur l'un a permis de connaître l'état de l'autre. C'est bien une transmission quantique sur cette distance qui a été réalisée.

[Source : [Sciences et Avenir](#)]



[Source : Yin, J., Li, YH., Liao, SK. *et al.* Entanglement-based secure quantum cryptography over 1,120 kilometres. *Nature* (582), 501–505 (2020).

<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2401-y>

Image crédit : Fengyun-3C/Visible and Infrared Radiometer.

Quelques exemples quantiques au sein du vivant

[Source : [Wikipedia](#)]

- les *setæ* des geckos adhèrent au verre par un processus inexplicable en physique classique. Leur adhérence aux surfaces fonctionne grâce aux forces de van der Waals (potentiel interatomique dû à une interaction électrique de faible intensité entre deux atomes ou molécules, ou entre une molécule et un cristal) ;
- Les récepteurs de l'odorat semblent dépendre de l'effet tunnel, pour acheminer des électrons à l'intérieur même des molécules odorantes, afin de les distinguer d'autres molécules structurellement analogues ;
- Certaines structures protéiques bactériennes se comportent comme des ordinateurs quantiques primitifs, « calculant » le meilleur canal de transport des électrons parmi tous les chemins possibles ;
- De récents travaux sur la photosynthèse ont révélé que l'intrication quantique des photons joue un rôle essentiel dans cette opération fondamentale du règne végétal, phénomène que l'on tente actuellement d'imiter pour optimiser la production d'énergie solaire ;
- La migration de certains oiseaux facilitée par la perception du champ magnétique terrestre serait due à un mécanisme mettant en jeu des électrons intriqués.

4.6 LES TECHNOLOGIES QUANTIQUES

Les technologies quantiques sont devenues un enjeu de souveraineté, que ce soit autour des questions de cryptographie ou d'outillage pour la recherche et les industries, mais aussi dans les sonars et radars quantiques. Ce potentiel technologique et industriel du quantique explique la mobilisation de nombreux États, notamment parce qu'ils sont les principaux organisateurs et investisseurs de la recherche fondamentale.

Les technologies mettent en œuvre des superpositions quantiques d'états et/ou des états intriqués de divers systèmes physiques.

Le classement des technologies peut se concevoir selon le type d'objet quantique considéré :

- Les systèmes d'optique quantique impliquant des photons (grains de lumière) piégés dans des cavités ou se propageant dans le vide ou dans des fibres optiques ;
- Les systèmes à atomes chauds ou froids ;
- Les systèmes à ions piégés électromagnétiquement ;
- Les systèmes impliquant des spins électroniques ou nucléaires ;
- Les systèmes à base de circuits quantiques supraconducteurs ou d'oscillateurs mécaniques.

Cependant, un autre classement par domaine applicatif, comme au [SIRTEQ](#) (Science et Ingénierie en région Île-de-France pour les technologies quantiques) labellisé Domaine d'intérêt majeur (DIM), financé par la Région Île-de-France, est organisé :

- L'informatique quantique ;
- Les capteurs quantiques et la métrologie (horloges atomiques des satellites GPS, gravimètres quantiques, etc.) ;
- Les simulateurs quantiques (pouvant reproduire le comportement de systèmes quantiques) ;
- Les communications quantiques (pour assurer l'inviolabilité d'une information communiquée le long de fibres optiques).

4.6.1 L'INFORMATIQUE QUANTIQUE ET LES QUBITS

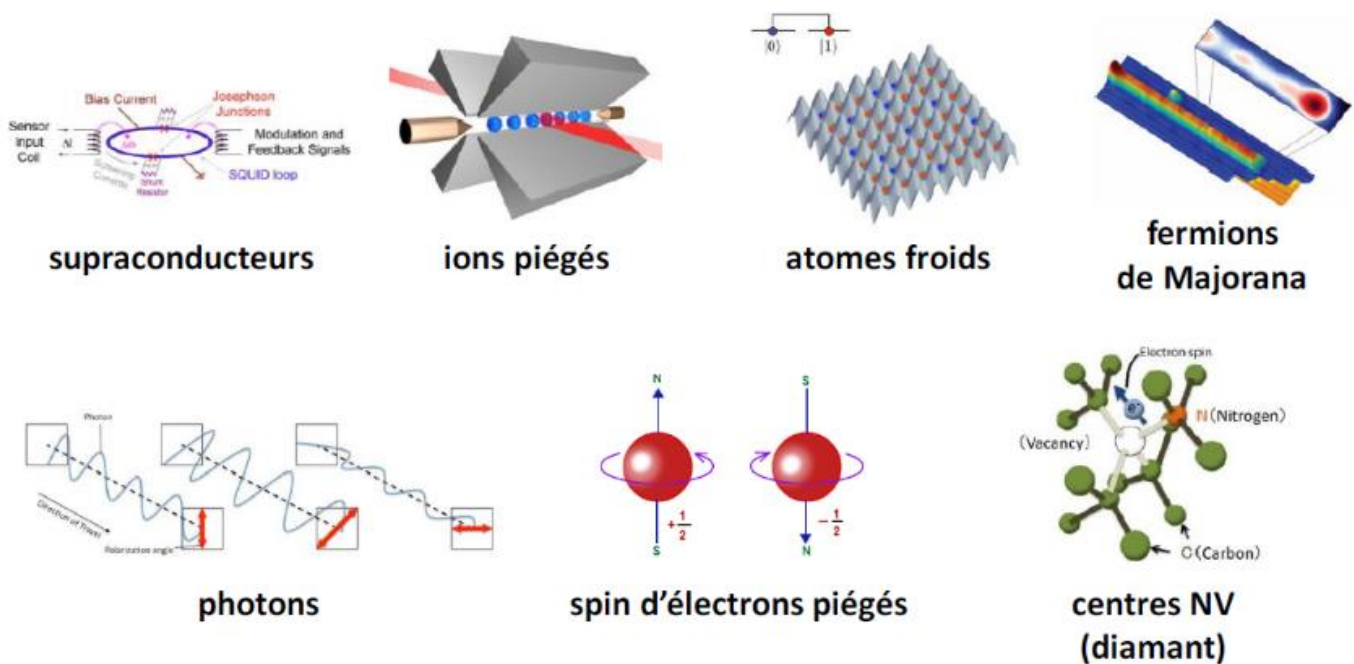
Dans l'informatique classique, les bits correspondent à des charges électriques circulantes qui traduisent le passage d'un courant électrique (bit de valeur 1) ou son absence (bit de valeur 0). La lecture du bit est alors déterministe : 0 ou 1.

Dans l'informatique quantique, on considère des qubits qui peuvent prendre à la fois les valeurs 0 et 1 dans une proportion variable correspondant à la notion de superposition d'états. Un qubit est initialisé à 0. Le système exploite l'intrication entre les qubits et les probabilités associées aux superpositions pour réaliser une série d'opérations, de telle sorte que certaines probabilités soient augmentées (cela constituera les bonnes réponses) et d'autres diminuées, voire nulles (les mauvaises réponses). La valeur de sortie est 0 ou 1.

Un ordinateur classique exécute N instructions de manière séquentielle et fournit un résultat au bout de la chaîne d'instructions. Dans le cas d'un ordinateur quantique, la superposition d'états d'un qubit génère un système à 2^N combinaisons simultanées qui produit une solution immédiate au moment de sa mesure, d'où un gain de puissance très important. En utilisant le principe d'intrication, il est possible de synchroniser plusieurs qubits en des lieux différents ou d'en faire des copies. Si on fait une mesure sur l'un, les autres qubits intriqués en sont immédiatement affectés.

En ce qui concerne les erreurs et autres anomalies, les technologies actuelles mises en œuvre dans les ordinateurs classiques permettent de corriger les erreurs induites par les composants électroniques avec peu de ressources (mémoire, etc.) avec un taux de fiabilité de 100%. Avec le quantique, les qubits restent très sensibles aux interactions avec leur environnement et perdent ainsi leurs propriétés quantiques : phénomène de décohérence, donc cause d'arrêt du traitement algorithmique en cours.

L'informatique quantique, Cuong Ngo-Mai. Conférence organisée conjointement par le [Cara IBM Sud-Est](#) et le [Club MultiMedia](#) (Club Micro, Club Video-Création), 9 mars 2020, Visio-conférence [Jitsi](#)

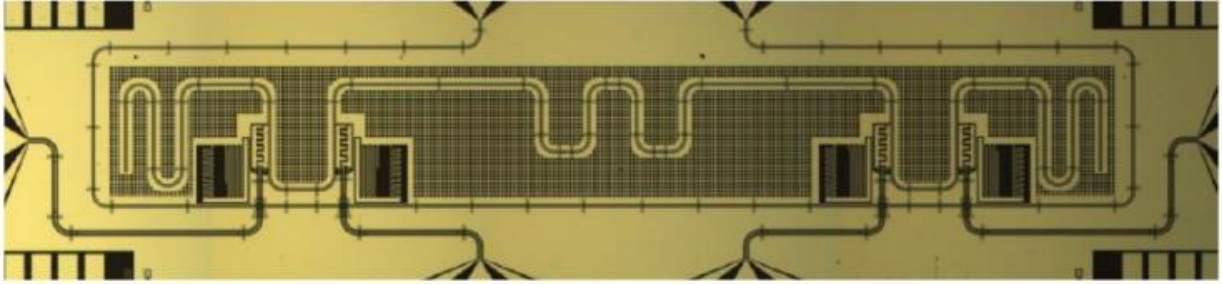


Les qubits sont des dispositifs physiques qui intègrent des particules élémentaires comme les ions piégés, les quasi-particules comme les fermions de Majorana, etc.

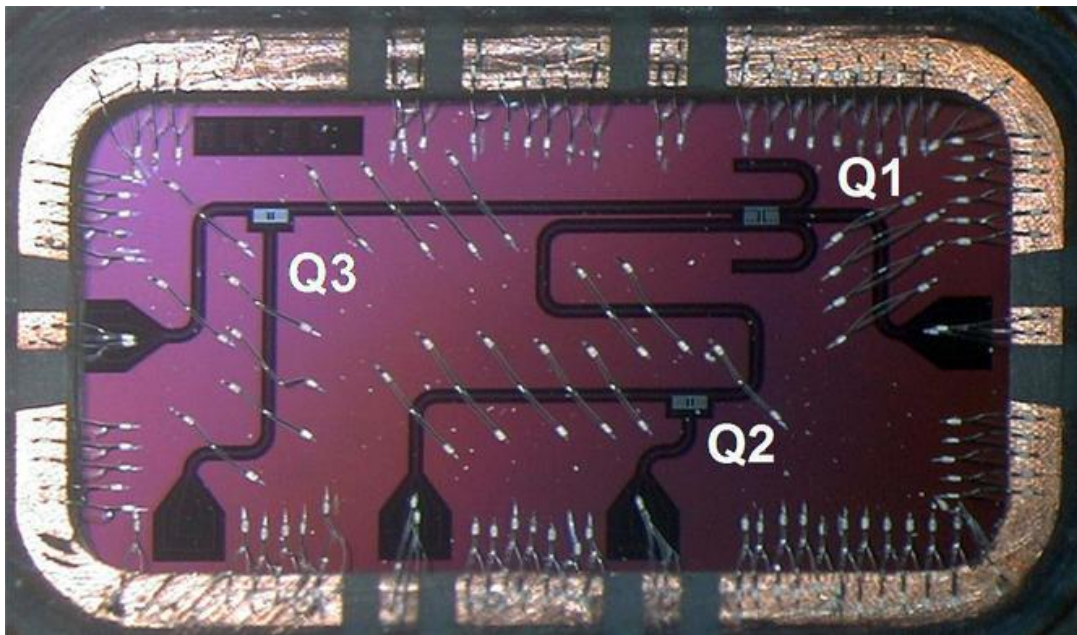
Dans le cas de dispositifs supraconducteurs ou de quantum dots à silicium, l'état quantique s'appuie sur un grand nombre de particules, ici, des électrons.

La recherche sur les qubits s'est d'abord naturellement portée sur des systèmes à base d'atomes ou d'ions, bien que ces systèmes microscopiques soient difficiles à contrôler individuellement et à coupler. Puis elle s'est dirigée vers des systèmes plus faciles à contrôler, comme des circuits électriques ne fonctionnant pas, en général, en régime quantique. Lorsqu'on veut créer de grands systèmes ou des qubits en série, il faut composer avec les standards industriels. Ainsi, les qubits de spin dans le silicium de petite taille (typiquement 30 nm) sont compatibles avec les technologies CMOS, largement connues et utilisées dans l'industrie microélectronique. Dans ce cas, plus le temps de cohérence du spin augmente, plus la fidélité des opérations de calcul quantique et la capacité à effectuer une séquence complète d'opérations s'améliorent.

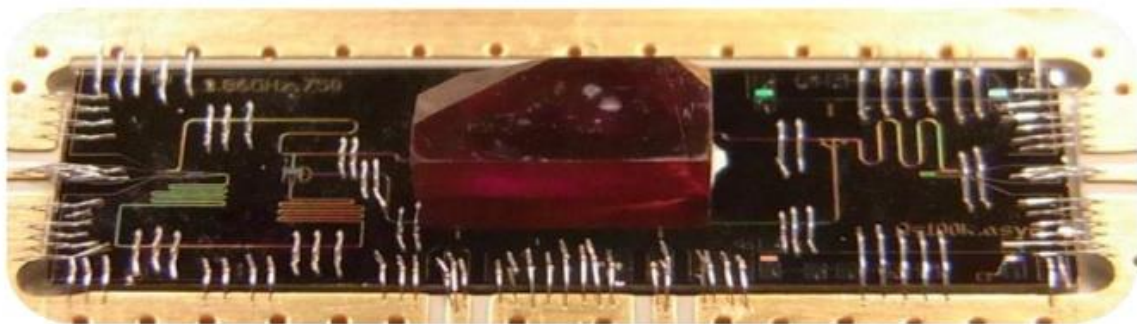
Ci-après sont présentées quelques technologies de réalisation des qubits avec leurs principes de fonctionnement. Ces fiches élaborées par Industrie & Technologies donnent une synthèse intéressante à consulter accompagnée de schémas explicites, etc.



Un processeur quantique composé de quatre qubits, réalisé et mis en œuvre au groupe Quantronique du Service de physique de l'état condensé (unité mixte de recherche CEA - CNRS, au CEA Paris-Saclay) © CEA



Puce à circuits supraconducteurs intégrant 3 qubits (taille réelle : 8mm x 4mm) © IBM Research
[Ordinateur : les promesses de l'aube quantique](#), CNRS Le Journal, 15 avril 2019



Circuit hybride supraconducteur - optique quantique développé, réalisé et mis œuvre au groupe Quantronique du Service de physique de l'état condensé (unité mixte de recherche CEA - CNRS, au CEA Paris-Saclay). Au centre un diamant porteur d'un ensemble de centres azote-lacune, dont le spin est porteur de l'information quantique.

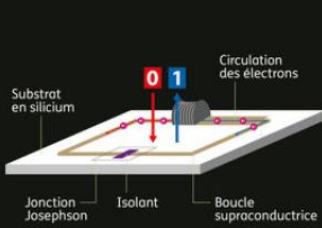
© CEA [Opportunités et défis de la recherche sur le calcul quantique](#), Dossiers Presse CEA, 14 juin 2018

[Sources : O. Ezratty, [Comprendre l'informatique quantique](#), 3^{ème} éd. sept. 2020. [Comprendre l'informatique quantique - qubits](#) FrenchWeb ; [Informatique quantique. Comprendre le quantum computing pour se préparer à l'inattendu](#). Rapport CIGREF, février 2020]

LES CINQ PRINCIPALES TECHNOLOGIES EN LICE

QUBIT SUPRACONDUCTEUR

Le plus mature



Principe

Le qubit supraconducteur de charge s'appuie sur une boucle d'un matériau supraconducteur contenant une jonction Josephson (supra-isolant-supra). Cet objet quantique possède deux états propres 0 et 1 correspondant aux deux sens du supercourant parcourant la boucle.

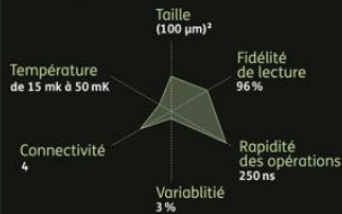
Avancée

Acteurs privés

IBM, Google, Intel, Rigetti, IQM, OQC, Raytheon, Alice & Bob...

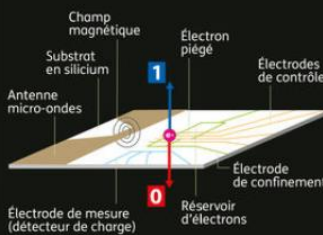
Nombre de qubits intriqués

53 (Google et IBM)



QUBIT SILICIUM

Proche de l'industrie



Principe

Un électron piégé dans une boîte quantique (quantum dot), couplée à un réservoir d'électrons et réalisée sur un substrat de silicium, forme le qubit. Les deux états 0 et 1 correspondent aux deux états « up » et « down » du spin de l'électron.

Avancée

Acteurs privés

Intel, NTT, SQC, Equal1.labs, Quantum Motion

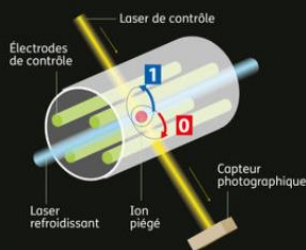
Nombre de qubits intriqués

4 (QuTech, TU Delft)



QUBIT À ION PIÉGÉ

Le plus fiable



Principe

Le qubit repose sur un atome, par exemple d'ytterbium, ionisé et refroidi puis piégé sous ultra-vide à l'aide d'électrodes. L'encodage du qubit sur ses deux états 0 et 1 se fait sur deux états électroniques de l'électron de la couche de valence de l'ion.

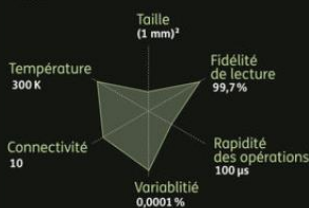
Avancée

Acteurs privés

IonQ, Honeywell, AQT, Oxford Ionics, Quantum Factory, NextGenQ

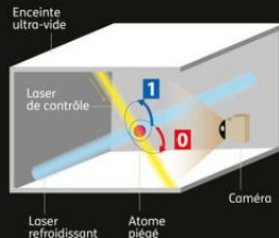
Nombre de qubits intriqués

11 (IonQ)



QUBIT À ATOME NEUTRE

Le champion de la cohérence



Principe

Un atome, par exemple de rubidium, refroidi par laser et piégé par pince optique, sous ultra-vide, est placé dans un état d'excitation élevé, dit de Rydberg, où l'électron de valence est sur une orbite très éloignée du noyau. L'état 0 ou 1 du qubit correspond à deux niveaux énergétiques différents de l'atome.

Avancée

Acteurs privés

Pasqal, Atom Computing, QuEra

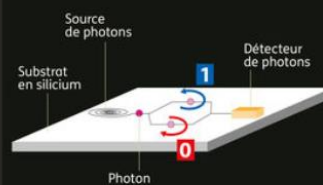
Nombre de qubits intriqués

51 (simulation)



QUBIT PHOTONIQUE

Le moins frileux



Principe

Utilisant des sources, des manipulateurs et des détecteurs de photons optoélectroniques, le qubit photonique est généralement encodé sur la polarisation du photon, mais peut aussi l'être sur d'autres de ses propriétés comme la fréquence.

Avancée

Acteurs privés

PsiQuantum, Xanadu, Quandela, Quix, Orca Computing, Tundra, LightOn, BardeenQ

Nombre de qubits intriqués

20 (Chine)



[Source : [Calcul quantique : la course aux qubits reste ouverte](#), Industries & Technologies n°1039, Kevin Poireault, 3 février 2021]

4.6.2 LES CAPTEURS QUANTIQUES

Les superpositions d'états quantiques sont très sensibles à l'environnement et fournissent des capteurs d'une grande précision : horloges atomiques, accéléromètres, gyromètres, gravimètres, etc. Les progrès sans cesse croissants dans le contrôle et la réduction des sources de bruits classiques amènent la sensibilité de ces capteurs à une limite quantique.

Dans le cas d'applications civiles (maisons intelligentes, voitures autonomes, contrôle de trafic, industrie, médecine, etc.), les capteurs quantiques se trouvent en concurrence directe avec des capteurs plus classiques dont les performances ne cessent de s'améliorer. Cependant, ils sont appelés à jouer un rôle prépondérant dans les domaines d'applications de défense : la navigation, l'interception électromagnétique et la télédétection, par exemple :

- Les capteurs quantiques de navigation (basés sur les atomes refroidis par laser ou sur les impuretés dans le diamant) sont capables de mesurer précisément les variations de certaines propriétés physiques du globe terrestre comme les champs électromagnétiques ou gravitationnels. Une cartographie à très haute définition permet de se positionner sans avoir recours au GPS ;
- L'interception électromagnétique pourrait être beaucoup plus performante en utilisant des capteurs à base d'impuretés dans le diamant afin de réaliser des analyses spectrales des signaux électromagnétiques de plusieurs ordres de grandeurs plus fines que les technologies actuelles ;
- Le radar quantique est une technologie de télédétection émergente fondée sur l'illumination quantique. S'il tient ses promesses il sera en capacité de détecter les avions furtifs, de filtrer les tentatives délibérées de brouillage, etc.

[Source : rapport [Forteza](#)]

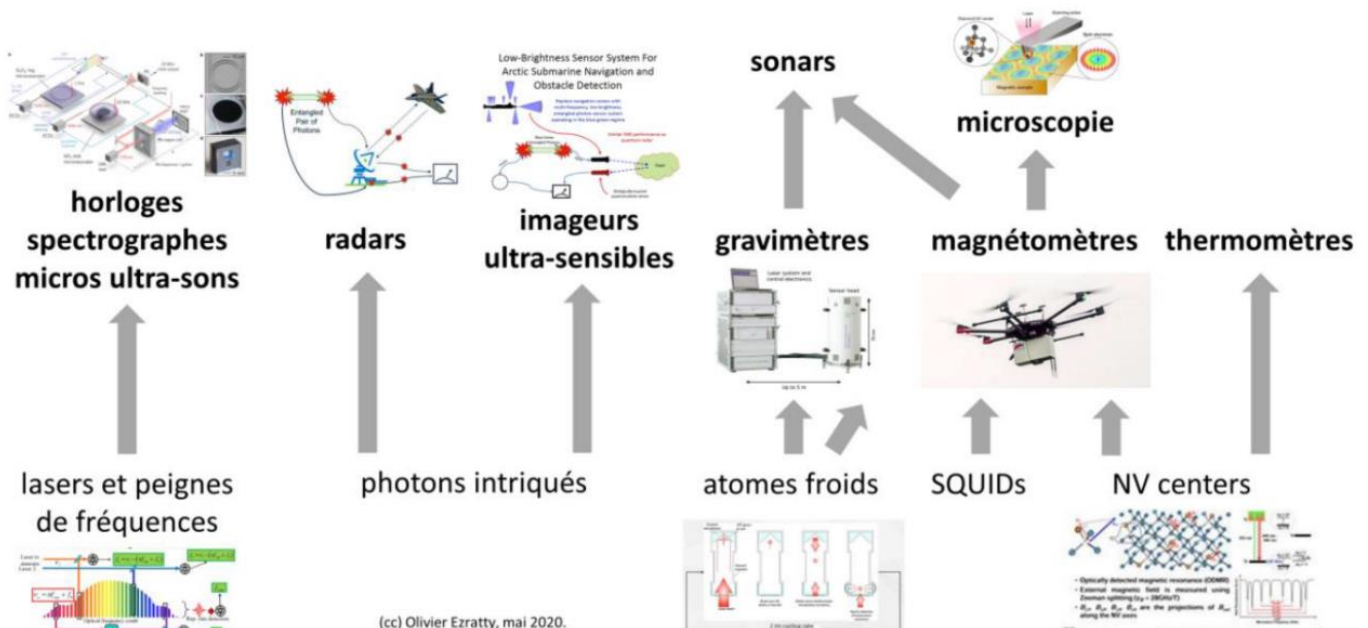
Ainsi dans les laboratoires de [Thales](#), de nombreuses études sont réalisées sur les dispositifs supraconducteurs à interférence quantique pour la conception et la réalisation d'antennes quantiques miniatures, couvrant un très large spectre d'ondes, utilisables dans l'imagerie cérébrale ou bien dans la détection de particules. Les capteurs quantiques à l'état solide, tels que les centres colorés dans le diamant, font l'objet de recherches pour démontrer leur capacité à mesurer des champs magnétiques de très faible intensité (pour l'IRM par exemple). Les ions terre-rare vont permettre l'analyse d'un spectre de radiofréquences sur de large bandes spectrales en continu visant à désencombrer et optimiser les réseaux. D'autres thématiques sont développées comme les capteurs pour les futures centrales inertielles quantiques à bord des avions.

Le gravimètre quantique absolu de [mquans](#) est le seul capteur de gravité quantique offrant des caractéristiques uniques grâce à sa technologie disruptive :

- Mesure de gravité absolue au niveau μGal ;
- Acquisition de données continue automatisée pendant plusieurs mois ;
- Pas de dérive à long terme ;
- Excellente immunité aux vibrations du sol grâce à un système de compensation active (pas de mécanique).



[Source : [mquans](#)]



Nature de qubits et type de capteurs (O. Ezratty, [Comprendre l'informatique quantique](#), 2020)

Les deux groupes allemands [Q.ant](#) et [la filiale de Trumpf et Sick](#) commercialisent leur premier capteur quantique QuantAlyzer destiné à l'industrie des microprocesseurs, du traitement de l'air, de la chimie et de la pharmacie. Selon le président de Sick, ces capteurs basés sur la lumière laser sont capables de mesurer en *continu la taille des particules (de l'ordre d'un cinquième de micromètre), leur concentration, leur vitesse, leur direction dans les fluides et dans les gaz. La commercialisation est prévue cette année.* La stratégie de [l'Allemagne](#) est de développer sa propre filière de production de technologies quantiques, pour laquelle le gouvernement a alloué 2 Md€ de subvention dans le cadre du prochain plan de relance.

4.6.3 LES ÉMULATEURS, SIMULATEURS ET ORDINATEURS QUANTIQUES

Les émulateurs quantiques sont utilisés pour simuler l'exécution d'algorithmes quantiques dans des ordinateurs traditionnels. Ils transforment les algorithmes, les portes quantiques et les qubits pour exploiter les capacités de traitement de ces ordinateurs. Des algorithmes quantiques sont testés sans ordinateur quantique. Dans le même ordre d'idée, des supercalculateurs peuvent simuler jusqu'à une centaine de qubits avec un faible nombre de portes quantiques, mais les records sont régulièrement battus : encore faut-il bien connaître les conditions d'exécution des machines. Beaucoup de puissance est nécessaire pour stocker les 2^N états de registres quantiques à N qubits, sans oublier les multiplications de matrice en nombres flottants.

- Atos propose l'Atos [Quantum Learning Machine](#) (QLM) afin de découvrir l'informatique quantique sur des machines traditionnelle, de développer des applications et algorithmes quantiques. Elle comprend un environnement de programmation universel, permettant de simuler jusqu'à 41 qubits, dans les dimensions standard d'un serveur d'entreprise. Elle utilise un langage de programmation quantique universel (AQASM, Atos Quantum Assembly Language, langage hybride basé sur Python) ;
- Dans le domaine du cloud quantique, [Amazon Web Services](#) (AWS) propose le service Amazon Braket offrant un environnement de développement pour explorer et concevoir des algorithmes quantiques, les tester sur des simulations d'ordinateurs quantiques et les exécuter sur les technologies matérielles quantiques de votre choix : simulateurs quantiques, machines à pièges à ions (machines [IonQ](#)), machines à recuit quantiques ([D-Wave](#)), machines à qubit supraconducteur universel ([Rigetti](#)) ;
- Les laboratoires Sandia ont mis un banc de test informatique, le Quantum Scientific Computing Open User Testbed ([QSCOUT](#)), en libre accès au public donnant aux utilisateurs les outils nécessaires pour étudier la machine elle-même. QSCOUT utilise la technologie des ions piégés et fonctionne à des températures plus chaudes qu'avec des supraconducteurs. Les signaux obtenus sont plus clairs que les circuits et conservent les informations plus longtemps. Le système devrait être étendu de 3 à 32 qubits d'ici les trois ans à venir. Des scientifiques de l'Université de l'Indiana ont été les premiers à l'utiliser. Des chercheurs d'IBM, d'Oak Ridge National Laboratory, de l'Université du Nouveau-Mexique, de l'Université de Californie à Berkeley, etc. sont aussi sélectionnés pour travailler sur le banc de test.

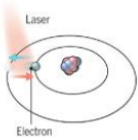
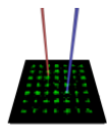
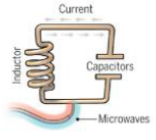

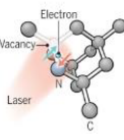
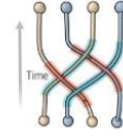
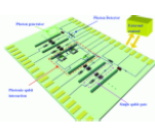
La simulation quantique ouvre la voie à des applications en physique des matériaux, en chimie quantique, en médecine, en astrophysique, etc. mais aussi pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire, qui apparaissent dans de très nombreux domaines. Les simulateurs sont des systèmes quantiques simples, réglables et faciles à contrôler et à observer, qui peuvent simuler et donc révéler le comportement inconnu et incalculable de systèmes quantiques réels à grand nombre de particules. La simulation quantique nécessite diverses technologies : les atomes ultra-froids, les ions piégés, les circuits supraconducteurs ou les fluides quantiques de lumière.

Les simulateurs quantiques analogiques servent de simulateurs de phénomènes quantiques sans considérer les états des qubits. Ils fonctionnent de manière analogique et non numérique, à savoir que les paramètres reliant les qubits entre eux sont continus. Ce sont surtout des outils de laboratoire. La technique couramment utilisée est celle des atomes froids contrôlés par lasers. Elle peut servir à créer des ordinateurs quantiques analogiques ou des ordinateurs quantiques universels à base de qubits et de portes quantiques (*selon* [O. Ezratty](#), 2020)

Les simulateurs et les calculateurs NISQ (*Noisy Intermediate Scale Quantum ou quantique d'échelle intermédiaire bruitée*) mises au point sans correction d'erreur fiable, constituent, aujourd'hui, des outils d'apprentissage du calcul quantique, en attendant les LSQ (*Large Scale Quantum*) scalables c'est-à-dire capables de passer à l'échelle.

Les **algorithmes** permettent d'exploiter les potentialités de l'ordinateur quantique comprenant les qubits, les registres, les portes et ses éléments réfrigérants. Mais leur variété est aussi diverse que le type de machines sur lesquelles ils sont implantés. De façon générale, on peut classer les problèmes de calcul en *faciles* si le temps de résolution croît de façon polynomiale avec le nombre n de bits impliqués et *difficiles* si le temps augmente de façon exponentielle avec n. La logique quantique exploite les superpositions de qubits et leur intrication. Elle peut ainsi transformer certains problèmes classiquement difficiles en problèmes faciles en mode quantique.

Nombreux sont ceux qui affirment que le seuil de 50 qubits de haute qualité avec un faible taux d'erreurs et un long temps de décohérence, constitue une étape vers la suprématie quantique théorisée par le physicien John Preskill en 2012. Avec la puce Sycamore, Google a démontré qu'il était possible de manipuler 54 qubits supraconducteurs pour réaliser un calcul donné dans un temps terriblement plus court qu'un ordinateur classique. Cette tâche n'avait aucune utilité réelle. La suprématie quantique n'est plus à l'ordre du jour.

	atomes		électrons				photons	
								
puissance consommée	ions piégés	atomes froids	supra-conducteurs	silicium	NV centers	fermions de Majorana	photons	
cryogénie	2KW	N/A	16 KW	12 KW	16 KW	16 KW	3W	
pompe vide/ultra vide ¹	vide	ultra-vide 100W	vide	vide	vide	vide	vide	
contrôle des portes quantiques	2KW chauffage des ions, lasers, générateurs de micro-onde, électronique de lecture (CMOS)	5,8KW chauffage des atomes, laser, électronique de contrôle (SLM, etc) et de lecture (CMOS)	1 à 5 KW dépend des architectures selon que la génération des micro-ondes est dans le cryostat ou pas			N/A	N/A	300 W sources et détecteurs de photons, contrôle des portes quantiques
PCs et réseau	1 KW	1 KW	1 KW	1 KW	1 KW	1 KW	700 W	
# qubits de réf.	10-50	100-1000	53	50	N/A	N/A	20	
total	5 KW	7 KW (1)	25 KW (2)	21 KW	N/A	N/A	4 KW (3)	

¹ : coût énergétique fixe, pour le démarrage configuration type pour calculateur de Pasqal (1), Google (2), Quandela/Quix (3), estimation doit mouillé pour les autres cas

(cc) Olivier Eratty, septembre 2020

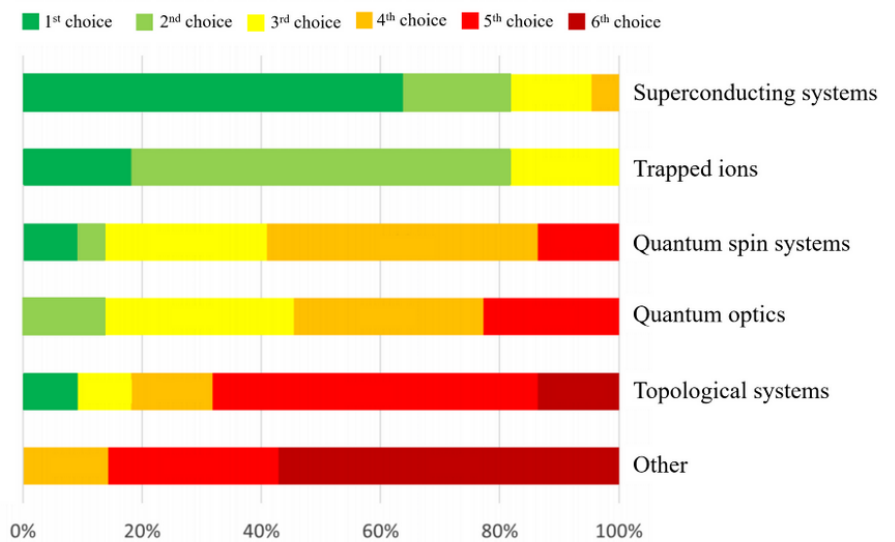
Consommations d'énergie d'un ordinateur quantique selon la nature physique des qubits

Classement des implémentations physiques dans le but spécifique de réaliser un ordinateur quantique numérique avec 100 qubits logiques (c'est-à-dire programmables avec peu ou pas d'erreurs physiques) dans les 15 prochaines années.

Les réponses obtenues traduisent la préférence des plates-formes à base de systèmes supraconducteurs et d'ions piégés, en corrélation avec les investissements réalisés à l'exception des ordinateurs quantiques linéaires-optiques où les investissements y semblent spéculatifs.

Selon une étude de [Michel Kurek](#)

Ranking of physical implementations in terms of potential for realizing a digital quantum computer with 100 logical qubits in the next 15 years



Ranking of opinions on the potential physical platforms for the specific purpose of realizing a quantum computer (Source: Global Risk Institute and evolutionQ Inc.)

La mesure des performances des calculateurs quantiques ne se fait pas de la même manière que celle des ordinateurs classiques ou même supercalculateurs. Elle ne se limite pas à un nombre d'opérations par seconde, à la capacité de sa mémoire vive, etc. La puissance de calcul vient surtout de l'intrication des qubits entre eux et des phénomènes d'interférences. Le seul critère de performance basé sur le nombre de qubits n'est pas assez fiable. Il faudrait lui adjoindre leur fidélité, leur connectivité, sans oublier la vitesse d'exécution des portes quantiques, des algorithmes, la consommation d'énergie, etc. De manière générale, les qubits sont volatiles et leurs caractéristiques varient suivant les différentes technologies quantiques (supraconducteurs, ions piégés, silicium, photonique, etc.).

Aussi diverses métriques de performance existent :

- En 2017, [IBM](#) a proposé le [volume quantique](#) : mesure obtenue à partir d'un *benchmark* (calcul servant de test). Le volume quantique mesure combien de qubits parviennent à enchaîner un certain nombre de calculs avec un taux d'erreur limité : un ordinateur de N qubits capable d'enchaîner X portes logiques, le volume quantique sera égal à N^X . [Honeywell](#) et [IonQ](#) ont adopté le volume quantique en 2020 ;
- Atos a lancé [Q-score](#), fin 2020. Q-score mesure les performances réelles des processeurs quantiques lors de la résolution de problèmes d'optimisation, représentatifs de la future ère NISQ. Il se base sur la résolution d'un problème d'optimisation combinatoire standard, le même pour toutes les évaluations, le [problème Max-Cut](#). Le score est basé sur le nombre maximum de variables qu'une technologie quantique peut optimiser : par exemple, 20 variables donc 23 Qs. La méthodologie de Q-score sera publique et auditable ;
- D'autres firmes considèrent le concept de suprématie quantique qui traduit le pouvoir de résoudre un calcul qu'aucun ordinateur ne pourrait accomplir.

Grâce aux capacités avancées de simulation numérique de qubits de l'[Atos Quantum Learning Machine](#) (Atos QLM), son puissant simulateur quantique, Atos est en mesure de calculer des estimations de Q-score pour plusieurs plateformes (en unités Qs). Ces estimations tiennent compte des caractéristiques publiquement partagées par les fabricants.

[Sources : O. Ezratty, [Comprendre l'informatique quantique](#), 3^{ème} éd. sept. 2020. [Comprendre l'informatique quantique - qubits](#) FrenchWeb ; [Informatique quantique. Comprendre le quantum computing pour se préparer à l'inattendu](#). Rapport CIGREF, février 2020]

Quelques infos :

- Avec le soutien de [GENCI](#) (Grand Equipement National de Calcul Intensif), du CEA, concepteur et exploitant du TGCC (Très Grand Centre de Calcul), la France hébergera la première infrastructure au monde d'ordinateurs quantiques hybrides, intégrant d'un point de vue logiciel et matériel des accélérateurs quantiques à un système de supercalculateurs classiques. Dès 2023, un ordinateur quantique hybride de 100 qubits devrait être hébergé au TGCC ;
- [PhoQus](#) (Photons for Quantum Simulation) est un projet du Quantum Flagship européen coordonné par Sorbonne Université (France), composé de 9 partenaires de 5 pays différents (France, Allemagne, Royaume-Uni, Portugal et Italie). Il développe une nouvelle plateforme logicielle de simulation reproduisant des capacités de calcul d'un ordinateur quantique.

4.6.4 LES COMMUNICATIONS QUANTIQUES

Les communications, terrestres ou satellitaires, occupent une place primordiale dans notre vie quotidienne professionnelle et privée. Elles ont été sécurisées au mieux afin de préserver les données échangées et de se prémunir des attaques. Mais le développement des recherches et des premières réalisations d'ordinateurs quantiques constitue une menace pour les données chiffrées avec ces méthodes, qu'ils pourraient décrypter en un temps record.

Dans notre économie numérique où les communications jouent un rôle essentiel, pour répondre à des enjeux stratégiques et de souveraineté, deux tendances se dessinent :

- La cryptographie post quantique, basée sur les nouveaux concepts mathématiques pour chiffrer les protocoles de communication. De tels algorithmes suivent les règles de la cryptographie classique et ne font pas appel à des phénomènes quantiques. Cela consiste à étudier de nouveaux problèmes mathématiques sous-jacents aux protocoles de chiffrement ;
- La cryptographie quantique utilisant les propriétés de la physique quantique pour sécuriser le transport de l'information. Elle modifie le support physique de l'information et utilise les nouvelles technologies quantiques.

Le Plan quantique a alloué 325 M€ dans la communication quantique qui s'appuie sur le phénomène d'intrication quantique et sur un réseau de câbles différent. Les technologies quantiques permettent de sécuriser les communications en fournissant des clés de chiffrement inviolables, basées sur les propriétés quantiques de la lumière, c'est-à-dire la propagation de photons dans des superpositions d'états ou de paires de photons intriqués. Cela a pour applications :

- La sécurisation des communications par cryptographie quantique ;

- L'interfaçage de systèmes quantiques distants devant partager un certain degré d'intrication ;
- Le transfert d'état quantique entre des systèmes physiques de nature différente.

Deux projets de réseaux du genre font l'objet de recherches en France, l'un en Ile-de-France, l'autre près de Nice.

Réseaux de communication quantiques hybrides basés sur des solutions fibre et satellite

[Quantum @UCA](#) met actuellement en place une plate-forme expérimentale unique dédiée au déploiement de technologies de communication quantique. Au sein d'un tel réseau quantique, les informations sont générées avec des débits de bit élevés, elles sont distribuées, manipulées, mesurées et distillées au niveau quantique, puis traitées, vérifiées et établies au niveau classique entre 3 sites distants (Nice-Valrose, Nice- Campus -La Plaine du Var- et SophiaTech). Grâce à de véritables protocoles de cryptographie quantique, un haut niveau de sécurité dans les échanges de données est atteint. Quantum @UCA bénéficie de l'implication de grandes entreprises comme Orange et Accenture.

... Sont également impliqués l'Observatoire de la Côte d'Azur, Sorbonne Université, l'Université Grenoble Alpes, Thales Alenia Space et le CNRS. Le partenaire principal est l'Institut de Physique de Nice (INPHYNI, Sébastien Tanzilli et son équipe).



Association des universités de recherche françaises UDICE. *Dossier thématique : [Quantique, le virage technologique que la France doit prendre](#), nov.2020*

Ainsi, Thales contribue au projet Européen ([EuroQCI](#)) initié avec la Commission européenne (CE) et l'Agence spatiale européenne (ESA), pour le développement et le déploiement dans les dix prochaines années d'une infrastructure de communication quantique sécurisée. Cette initiative permettra aux administrations publiques de transmettre et de stocker des informations et des données en toute sécurité, et de protéger les infrastructures critiques et le système de cryptage dans toute l'UE, en intégrant la cryptographie quantique, des systèmes quantiques innovants, etc.

Divers programmes ou projets existent au niveau européen, par exemple le projet [CiviQ](#) qui étudie les protocoles dits de « distribution quantique de clé » ou Quantum Key Distribution (QKD). L'échange de clef par QKD ne peut pas être enregistré pour être compromis ultérieurement. Il offre une sécurité éternelle quelle que soit la puissance de calcul de l'attaquant potentiel.

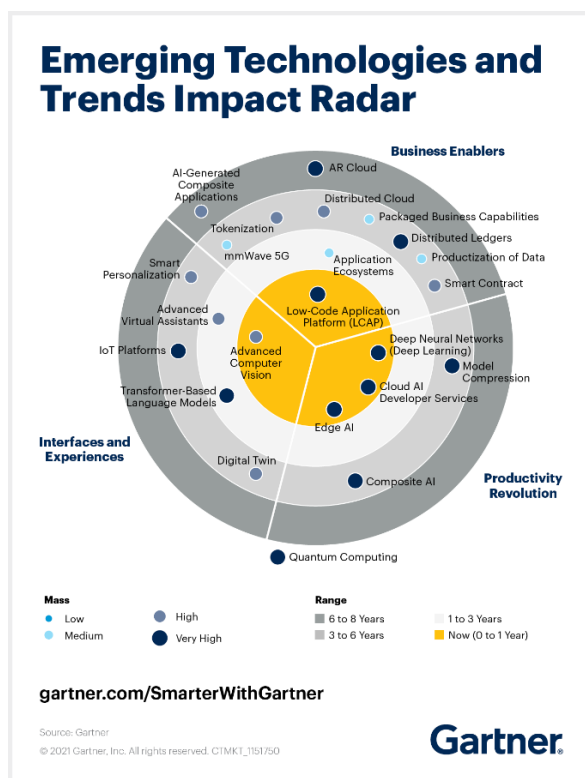
4.7 ELÉMENTS DE PROSPECTIVE

En analysant l'évolution de technologies émergentes depuis le primo adoptant (le premier client d'une technologie, la première entreprise ou institution de recherche à participer à son développement) jusqu'à la mise sur le marché, Gartner Inc. propose une représentation graphique tel un diagramme radar. Le nombre d'années nécessaire est traduit par des anneaux. La taille et la couleur de la technologie émergente donne une idée de l'importance de son impact ou de la tendance dans les marchés existants.

Le calcul quantique est situé dans la zone de mise sur marché d'ici 8 ans et plus alors que la réalité augmentée (*AR Cloud*) se situe dans l'anneau des 6-8 ans, par exemple.

Tous les détails sont donnés dans :

[Source : [Emerging Technologies and Trends Impact Radar: 2021](#), Tuong Huy Nguyen et al.]



Selon [Xavier Vasques](#), directeur mondial des centres technologiques d'IBM Systems, « *un ordinateur quantique ne va pas remplacer un ordinateur classique, donc la question de la suprématie quantique pour moi n'est pas très importante* ». Il considère que l'informatique quantique est un accélérateur en cas de surcharge de travail. « *Quand on développe un algorithme, il y a des calculs à faire comme la factorisation d'un nombre. Et bien ce sont ces calculs qui utilisent des accélérateurs quantiques* ». Il y aura cohabitation de plusieurs technologies et leurs usages dépendront des besoins en cas de surcharge de requêtes : le choix pourrait être effectué au sein de *cloud computing*. Le directeur est convaincu que [des puces neuromorphiques](#) viendront compléter le choix actuel des technologies.

[Thales](#), acteur majeur de l'écosystème de Saclay et premier laboratoire industriel en physique d'Europe, communique sur trois technologies quantiques. Elles concernent les capteurs quantiques, les communications quantiques et la cryptographie post-quantique, sans oublier les recherches sur les atomes froids, les défauts du diamant ou encore des dispositifs à base de supraconductivité. Cela est rendu possible par la collaboration avec le milieu académique, industriel et les start-up pour accélérer le développement des technologies quantiques souveraines.

Selon [Olivier Ezratty](#), consultant, auteur, conférencier spécialisé dans les nouvelles technologies, insiste sur l'importance de l'ingénierie intégrative nécessaire pour assurer le développement des technologies quantiques et notamment le calcul quantique. Cela est d'autant plus important que la création d'ordinateurs quantiques "scalables" (*capables d'accroître ses capacités de calcul sous une charge accrue quand des ressources généralement matérielles sont ajoutées*) constitue un défi scientifique et d'ingénierie. De nombreuses disciplines sont concernées comme la physique quantique, la thermodynamique, les matériaux, les supraconducteurs, la cryogénie, les lasers, la photonique, les théories de la complexité, les mathématiques, l'algorithmie, etc.

La mise au point de ce type d'ordinateurs est complexe au vu des contraintes physiques, électroniques, etc. L'écosystème entrepreneurial quantique comprend des start-up, créées souvent par des chercheurs, dont le niveau de maturité technologique devra évoluer pour se rehausser au niveau des *deeptechs* habituelles.

4.8 CONCLUSION

La physique quantique a offert de belles applications comme les lasers, les semi-conducteurs, etc. Aujourd'hui l'enjeu de la maîtrise des technologies quantiques et donc de la souveraineté est majeur. La compétition est internationale et nécessite des investissements très importants en même temps que des stratégies adaptées pour mener à bien les développements attendus. Les puissances de calcul quantique permettront de résoudre des problèmes telle la conception de systèmes de communications déclarés impénétrables ou la création de nouveaux médicaments pour lesquels les simulateurs quantiques pourront analyser et prévoir les interactions chimiques personnalisées.

Si les objectifs des plans quantiques européens et donc français étaient atteints, cela voudrait dire :

- que les jeunes chercheurs auraient été formés dans des filières spécialisées d'enseignement ;
- que les synergies public-privé auraient créé des innovations de rupture ;
- que les investisseurs auraient répondu présents et les sommes mises en jeu conséquentes ;
- que les écosystèmes quantiques auraient alors parfaitement fonctionné !

Cependant la réalité est autre à ce jour. Si l'informatique quantique est prometteuse, elle peut aussi inquiéter par sa puissance de calcul. Ce sera peut-être dans le domaine de la cybersécurité que les technologies quantiques auront un impact direct destructeur. Selon des experts, les ordinateurs quantiques seront opérationnels d'ici 5 à 20 ans. Dans le domaine de la défense par exemple, la programmation militaire se fait plusieurs années avant la réalisation effective des systèmes concernés et leur usage réel. Les machines quantiques pourront être utilisées pour gérer l'infrastructure des *smart cities*, élaborer des médicaments personnalisés ou avoir les moyens d'anticiper précisément les effets du changement climatique et d'en déduire des éléments de solutions. Ainsi une stratégie mal conçue peut avoir de graves conséquences. Les nations prépositionnées auraient alors un avantage certain et peut-être irrattrapable.

Aussi il est nécessaire que la France se prépare pour que les produits quantiques innovants issus des recherches puissent être diffusés et exploités au mieux, à destination du plus grand nombre. Cela engendre évidemment une stratégie novatrice depuis la création d'entreprises, les filières de production et de diffusion, les mises en place de partenariats, etc. Au vu des enjeux, elle devra tenir compte de l'éthique, des règles de droit et de l'ensemble des problématiques liées à l'usage de ces technologies au même titre que la recherche IA, la robotique, le *blockchain*, les neurosciences, etc.

4.9 RÉFÉRENCES

Sources récentes

- Ch. BERNHARDT, *Quantum Computing for Everyone*. MIT Press. 216 p. (2019). <https://mitpress.mit.edu/books/quantum-computing-everyone>
- J. BOBROFF, *La quantique autrement garanti sans équation !* Hors collection - Sciences, Flammarion. 256 p. (2020). <https://editions.flammarion.com/la-quantique-autrement/9782081518865>
- J. BOBROFF, *Mon grand mécano quantique*. Hors collection - Sciences, Flammarion. 160 p. (2019). <https://editions.flammarion.com/mon-grand-mecano-quantique/9782081447141>
- A. BRENAC, *Plan national quantique, La France se dote de ressources complémentaires pour accélérer la recherche sur les technologies quantiques*. REE n°1 (2021). https://www.see.asso.fr/revue-numero/368469_ree-2021-1
- J.-P. DAMIANO, *Les enjeux de la recherche et l'intelligence économique et stratégique*, Techniques de l'Ingénieur, Octobre (2019), <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02128070>
- P. DEGIOVANNI, N. PORTIER, C. CABART, A. FELLER, B. ROUSSEL, *Physique quantique, Information et Calcul : des concepts aux applications*. EDP Sciences (2020). https://www.researchgate.net/publication/337224478_Physique_quantique_Information_et_Calcul_des_concepts_aux_applications
- O. EZRATTY, *Les usages de l'intelligence artificielle* (éd. 2021). <https://www.oezratty.net/wordpress/wp-content/themes/Ezratty5/forcedownload.php?file=/Files/Publications/Usages%20intelligence%20artificielle%202021%20Olivier%20Ezratty.pdf>
- O. EZRATTY, *Comprendre l'informatique quantique*, 3^{ème} éd., sept. (2020). Ce document vous est fourni à titre gracieux et est sous licence « [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) » dans la variante « Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 2.0 France ». <https://www.oezratty.net/wordpress/2020/comprendre-informatique-quantique-edition-2020/>
- O. EZRATTY, *Comment la France peut réussir dans le quantique*, Telecom paris, revue 197, (28 juillet (2020). <https://www.telecom-paris-alumni.fr/article/comment-la-france-peut-reussir-dans-le-quantique-197/28/07/2020/3363>
- *Informatique quantique. Comprendre le quantum computing pour se préparer à l'inattendu*. Rapport CIGREF, février (2020). <https://www.cigref.fr/quantum-computing-comprendre-informatique-quantique>
- H. POUILLE, Conférence *Le quantique, c'est fantastique*, Web2day, 14 juin 2018, Nantes. [vidéo](#)
- B. PRIEUR, *Informatique quantique. De la physique quantique à la programmation quantique en Q#*. Editions ENI. 244 p. (2019), <https://www.editions-eni.fr/livre/informatique-quantique-de-la-physique-quantique-a-la-programmation-quantique-en-q-9782409017414>
- C. VILANI, *Les technologies quantiques*, OPECST, n°18, juillet (2019)
- Mission parlementaire du 15 avril 2019 au 3 octobre 2019, *Quantique : le virage technologique que la France ne ratera pas. 37 propositions pour une stratégie nationale ambitieuse*, 2019, P. FORTEZA, J.-P. HERTEMAN, I. KERENDIS. Rapport présenté le 9 janvier 2020. https://forteza.fr/wp-content/uploads/2020/01/A5_Rapport-quantique-public-BD.pdf
- M. LECONTE, *Fondements et étapes des technologies quantiques. Les technologies de l'ordinateur quantique et du chiffrement quantique*. Article invité. REE n°2 (2018). https://www.see.asso.fr/revue-numero/22856_ree-2018-2
- M. LEDUC, *Les technologies quantiques, un domaine en plein essor*. Editorial REE n°2 (2018). https://www.see.asso.fr/revue-numero/22856_ree-2018-2
- M. LEDUC, S. TANZILLI, *Les technologies quantiques, de la recherche fondamentale à l'innovation*. Photoniques, 91, (24) May (2018), DOI: 10.1051/photon/20189118. License CC BY 4.0
- S. LLOYD, *The Universe as Quantum Computer*, Chapter for A Computable Universe: Understanding and explore Nature as computation. H. Zenil éd., World Scientific, Singapour (2012). [arXiv: 1312.4455v1](https://arxiv.org/abs/1312.4455v1) [quant-ph]

Sources média

- *Blog sur les deep techs* (intelligence artificielle, informatique quantique, medtech, etc.) et sur l'innovation, O. EZRATTY. <https://www.oezratty.net/wordpress/>
- *Les Notes scientifiques de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST)*. <https://www.senat.fr/opecest/notes.html>
- Podcasts sur l'actualité quantique. [Quantum](#)
- F. MANENS, *3 questions sur le Plan quantique, l'investissement de la France dans l'informatique de demain*, Numerama, 22 janvier (2021). <https://www.numerama.com/tech/683908-plan-quantique-france.html>
- UDICE : Association des universités de recherche françaises. Dossier thématique : [Quantique, le virage technologique que la France doit prendre](#), nov. (2020)
- F. BOUTON, R. MENNEVEUX (Frenchweb) / Decode Media, Podcasts. [Decode Quantum](#) mars (2020)
- B. DELSOL, *Lorsque le monde de l'informatique quantique rencontre le monde des brevets !* HAUTIER IP, 25 août (2020). <https://www.hautier.fr/2020/08/25/lorsque-le-monde-de-linformatique-quantique-rencontre-le-monde-des-brevets/>
- E. HOLLEN, *Un circuit quantique exécute un calcul 100.000 milliards de fois plus vite qu'un superordinateur*, déc. (2020). <https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/ordinateur-quantique-circuit-quantique-execute-calcul-100000-milliards-fois-plus-vite-quun-superordinateur-84598/>
- [Un nouveau record se profile dans le financement par capital-risque des startups quantiques](#), M. KUREK, sept. (2020)
- *L'avantage quantique, enjeux industriels et formation*. Fondation Mines-Telecom (2019). <https://www.fondation-mines-telecom.org/news/notrepublication/>

- *Quantum Internet*, magazine édité par TU Delft (2019). https://issuu.com/tudelft-mediasolutions/docs/quantum_magazine_june_2019
- *Ordinateur : les promesses de l'aube quantique*, Le Journal CNRS (2019). <https://lejournal.cnrs.fr/articles/ordinateur-les-promesses-de-laube-quantique>
- PWC France, *L'Informatique Quantique : la 5^e révolution* (2019). <https://www.pwc.fr/fr/assets/files/pdf/2019/11/fr-france-pwc-point-of-view-quantum-computing-2019.pdf>
- G. BOUSQUET, *La physique quantique est partout dans notre quotidien*, Occitanie, Sciences et techniques, Rencontres d'Occitanie, invité S. Haroche, La Dépêche, 25 janvier (2017). <https://www.ladepeche.fr/article/2017/01/25/2504072-serge-haroche-prix-nobel-physique-2012-physique-quantique-est-partout.html>
- *Les promesses du monde quantique*. Magazine Dossier La physique quantique à portée de main. Pour La science n°93, octobre (2016). https://issuu.com/pourlascience/docs/dossier_93_extrait/4
- Challenges. <https://www.challenges.fr/>
- Ciel et Espace. <https://www.cieletespace.fr/>
- Decode Quantum (émission animée par Fanny Bouton, Olivier Ezratty et Richard Menneveux), *Enjeux et impacts du quantique sur la société*, depuis mars (2020). Decode Media, <https://www.spreker.com/show/decode-quantum>
- Fil d'intelligence technologique, Industrie & Technologies <https://www.industrie-techno.com/>
- FrenchWeb. <https://www.frenchweb.fr/>
- Futura Sciences. <https://www.futura-sciences.com/>
- Techniques de l'ingénieur. <https://www.techniques-ingenieur.fr/>
- Le Journal du Net. <https://www.journaldunet.com/>
- Les Echos. <https://www.lesechos.fr/>
- Industries & Technologies. <https://www.industrie-techno.com/>
- Micronora Informations. <https://www.micronora-informations.fr/>
- Pixees. <https://pixees.fr/>
- TrustMyScience. <https://trustmyscience.com/>
- Le Big Data. <https://www.lebigdata.fr/>
- L'Usine digitale. <https://www.usine-digitale.fr>
- Usine nouvelle. <https://www.usinenouvelle.com>
- Vie publique. <https://www.vie-publique.fr/>
- Wikipedia. <https://fr.wikipedia.org/>
- ZdNet. <https://www.zdnet.fr/>

Quelques organismes, associations, instituts, sociétés, etc.

- ANSSI (Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information) <https://www.ssi.gouv.fr/>
- Atos <https://atos.net/fr/>
- Base brevets, STN®, première source unique sur la recherche scientifique et technique divulguée au monde (InpadocDB, International Patent Documentation Data Base ©2021 FIZ Karlsruhe GmbH), née de la fusion et de la mise à jour des bases de l'office européen des brevets (*European Patent Office*) <https://www.stn-international.com/>
- Bpifrance (Banque publique d'investissement) <https://www.bpifrance.fr/>
- C2N (Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, CNRS/Université Paris-Saclay) <https://www.c2n.universite-paris-saclay.fr/fr/>
- CDL (Creative Destruction Lab) <https://www.creativedestructionlab.com/>
- CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique et aux énergies alternatives) <https://www.cea.fr>
- CEA IRIG (Institut de recherche interdisciplinaire de Grenoble) https://www.cea.fr/drf/IRIG/CEA_LIST
- CEA-Leti (Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information) <https://www.leti-cea.fr/cea-tech/leti>
- CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) <https://www.cnrs.fr>
- CNRS Institut Néel (Laboratoire de recherche fondamentale en physique de la matière condensée) <https://neel.cnrs.fr/>
- CNRS LIP6 (Unité Mixte de Recherche de Sorbonne Université et du CNRS) <https://www.lip6.fr/>
- Collège de France <https://www.college-de-france.fr/>
- Commission Européenne https://ec.europa.eu/info/index_fr
- Concours (i-PhD, i-Lab, i-Nov) / Etat, Bpifrance et l'ADEME, cadre du [Plan Deeptech](https://www.bpifrance.fr/A-la-une/Appels-a-projets-concours/) : <https://www.bpifrance.fr/A-la-une/Appels-a-projets-concours/>
- CQT (Center for Quantum Technologies) Singapour <https://www.quantumlah.org/>
- Cryoconcept <https://cryoconcept.com/>
- DGA (Délégation Générale de l'Armement) <https://www.defense.gouv.fr/dga/>
- EuroQCI (Quantum Communication Infrastructure) <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/future-quantum-eu-countries-plan-ultra-secure-communication-network>
- Fédération de recherche CNRS : Paris Centre for Quantum Computing (PCQC) <http://www.pcqc.fr/>
- Gartner Inc. <https://www.gartner.com/en>
- IBM <https://www.ibm.com/>
- IFRAF (Institut Francilien de Recherche sur les Atomes Froids) UCA <http://gdriqfa.unice.fr/>

- INAC (Institute for Nanosciences & Cryogenics) <http://inac.cea.fr/en/index.php/inac.cea.fr/>
- INRIA (Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique) <https://inria.fr>
- Institut Fourier (Laboratoire de mathématiques) <https://www-fourier.ujf-grenoble.fr/>
- Institut d'Optique <https://www.institutoptique.fr/>
- IQFA (CNRS GDR Ingénierie Quantique, des Aspects Fondamentaux aux Applications) <http://gdriqfa.unice.fr/>
- JFLI (Japanese-French Laboratory for Informatics, International Research Laboratory 3527) <https://jfli.cnrs.fr/>
- Lab Quantique <https://lelabquantique.com/>
- LIG (Grenoble Informatics Laboratory) <https://www.liglab.fr/en>
- LKB (Laboratoire Kastler Brossel - ENS - UPMC - CNRS) <https://www.lkb.upmc.fr>
- LPMC (Laboratoire de Physique et Modélisation des Milieux Condensés) <http://lpmmc.grenoble.cnrs.fr/>
- Microsoft <https://www.microsoft.com/fr-fr>
- NQCC (National Quantum Computing Centre) <https://www.nqcc.ac.uk/>
- PACTE (Laboratoire des sciences sociales) <http://www.pacte-grenoble.fr/>
- Programme QuEnG [Quantum Engineering Grenoble](#)
- Quantonation premier fonds d'investissement en Europe pour les technologies quantiques <https://www.quantonation.com/>
- Quantum Internet Association (European Quantum Internet Alliance) <https://quantum-internet.team/>
- Quantum technologies Flagship <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/quantum-technologies-flagship>
- QuantX <https://ax.polytechnique.org/group/quantx/227>
- QuTech <https://qutech.nl>
- SIRTEQ (Science et Ingénierie en région Île-de-France pour les technologies quantiques) <https://www.sirteq.org/comprendre-les-technologies-quantiques/>
- STN® (première source unique de recherche sur la recherche scientifique et technique FIZ Karlsruhe GmbH) <https://www.stn-international.com/>
- Wavestone (cabinet de conseil) www.wavestone.com
- HTGF (High-Tech Gründer fonds / investisseur) <https://www.htgf.de/en/>
- Thales <https://www.thalesgroup.com/>
- XAnge (investissements) <https://www.xange.fr/fr/>

Quelques Start-up

- France Digitale (première association de start-up en Europe) <https://francedigitale.org/>
- Frenchtech <https://lafrenchtech.com/fr/>
- Les start-up françaises parées pour la transition quantique CNRS Le Journal (2020) <https://lejournal.cnrs.fr/nos-blogs/de-la-decouverte-a-linnovation/les-start-francaises-parees-pour-la-transition-quantique>
- Agoranov (incubateur Sciences & Tech de Paris) <https://www.agoranov.com/>
- Alice&Bob <https://alice-bob.com/fr/>
- [C12 Quantum Electronics](#)
- Cryptonext Security (Inria, Sorbonne) <https://cryptonext-security.com/>
- KETS Quantum Security Ltd. <https://kets-quantum.com/>
- Muquans <https://www.muquans.com/>
- ParityQC <https://parityqc.com/>
- Pasqal <https://pasqal.io/about/>
- PsiQuantum <https://psiquantum.com/>
- Quandela <https://quandela.com/>
- Quantfi (Quantum Computing for Finance) <https://www.quantfi.com/>
- Qubit Pharmaceuticals <https://qubit-pharmaceuticals.com/>
- VeriQloud <https://veriqcloud.com/>

du même auteur dans le bulletin IESF-Côte d'Azur

- J.-P. DAMIANO, *De la 5G à la 6G : contexte et enjeux!* IESF Côte d'Azur, Bull. n°4, p.13-23 (2020).
- J.-P. DAMIANO, *Les végétaux doués d'intelligence ? Aspects historiques et philosophiques. Éléments de synthèse des capacités cognitives et des mécanismes. Nouvelles approches bio-robotiques.* IESF Côte d'Azur, Bull. n°3, p.10-25 (2020).
- J.-P. DAMIANO, *Biomimétisme, intelligence artificielle, robotique et applications de l'intelligence en essaim. Cybersécurité et questions d'éthique et de droit.* Part.2, IESF Côte d'Azur, Bull. n°2, p.7-25 (2020).
- J.-P. DAMIANO, *Biomimétisme, intelligence artificielle et robotique. Applications de l'intelligence en essaim et questions d'éthique et de droit.* Part.1, IESF Côte d'Azur, Bull. n°1, p.2-14 (2020).
- J.-P. DAMIANO, *La cobotique : quand les humains et les robots collaborent,* IESF Côte d'Azur, Bull. n°2, p.3-7 (2019).
- Th. TANZI, J.-P. DAMIANO. *De la Science à la Recherche : Aspects historiques.* Working Paper, 31 p. (2015)

5. JEUX MATHÉMATIQUES : SOLUTION DU BULLETIN N° 1 DE 2021

Les pizzas qui rendent fou

Difficile d'intégrer que tout n'est pas linéaire. Ainsi, l'aire d'un cercle n'est pas proportionnelle à son diamètre mais au carré de son diamètre... Et cela peut nous induire en erreur. Surtout lorsque l'on a faim.

L'histoire se passe aux États-Unis devant un camion à pizzas. Vous êtes affamé et on vous propose pour le même prix une pizza de diamètre 18 pouces ou deux de diamètres 12 pouces. Cruel dilemme !

Que choisissez-vous ?

Pour répondre à la question, ne cherchez pas la valeur du pouce, c'est 2,54 centimètres. Mais cette valeur n'a rien à voir à l'affaire. Ne cherchez pas la valeur du nombre π non plus, même si vous savez qu'il vaut 3,14 et des poussières. Alors, vous hésitez toujours ? Une grande ou deux petites ?

Réponse : la grande

L'important est de savoir que l'aire (en pouces au carré) d'un cercle de diamètre D , en pouces, est proportionnelle au carré de D , et que le coefficient de proportionnalité ne dépend pas de la taille de la pizza.

La grande pizza a donc une aire proportionnelle à 18^2 et la petite à 12^2 . Le problème est donc de comparer les deux nombres 18^2 et 2 fois 12^2 , soit en divisant par 6^2 , comparer 3^2 et 2^3 , soit 9 et 8. Si vous êtes affamé, choisissez la grande pizza et pas les deux petites car $9 > 8$.

Maintenant, si vous aimez la croûte, la question est à reconsidérer...



La division des pieuvres

Nous avons dix doigts. C'est sans doute pour cela que nous comptons en base dix. Les pieuvres, elles, ont huit tentacules.

Imaginons qu'elles comptent comme nous mais sur leurs huit tentacules. Cela donne 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, etc. Ainsi 123 en compte pieuvre signifie $8^2 + 2 \cdot 8 + 3$ pour nous, soit 83 en base dix.

Quels sont alors le quotient et le reste de la division de 7654321 par 1234567 chez les pieuvres ?

Réponse :

6 et 7. Bien entendu, on peut traduire ces deux nombres $A = 7654321$ et $B = 1234567$ en base dix mais c'est long et pas très joli (on trouve 2054353 et 342391 qu'il est facile de diviser). Il est plus simple de calculer comme le ferait une de ces pieuvres mythiques. En additionnant A et B , on remarque que $A + B = 11111110$ et, de même, $8A = 76543210$ donc $8A + B = 77777777$ donc $8A + B = 7(A + B + 1)$ d'où $A = 6B + 7$, ce qui signifie que le quotient de A par B est 6 et le reste 7.



Hervé Lehning Normalien et agrégé de mathématiques, il a enseigné sa discipline une bonne quarantaine d'années.

6. JEUX MATHÉMATIQUES

Controverse à la caisse

Faut-il être un as du calcul mental ou noter tous les prix pour contrôler une addition au supermarché ?

Maxime a acheté deux stylos, 1,20 € chacun, huit cahiers identiques et douze feuilles de papier à dessin également identiques. En passant à la caisse, l'hôtesse lui annonce : « ça fera 16,50 € ». Maxime ne se souvient pas du prix de chacun des cahiers et des feuilles à dessin mais répond : « ce n'est pas possible ! » Pourquoi ?

Il est parfois utile de savoir compter lors du passage en caisse du supermarché !



© FMFA, Pixabay, DP

Le mystère étonnant des nombres

Les nombres cachent des mystères étonnants... Nous allons le découvrir ci-dessous.

Les nombres cachent des mystères étonnants, ainsi le produit des quatre premiers nombres entiers augmenté de 1 est un carré puisque $1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 + 1 = 25 = 5^2$. Hasard, direz-vous ? On trouve le même résultat avec les quatre nombres suivants $2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 + 1 = 121 = 11^2$.

Encore un hasard ou le résultat est-il général ?



Le monde fascinant des nombres. © Geralt, Pixabay, DP

Hervé Lehning Normalien et agrégé de mathématiques, il a enseigné sa discipline une bonne quarantaine d'années.

7. SUDOKU

Complétez la grille avec les chiffres manquants, sachant que chaque colonne, chaque ligne et chacun des neuf carrés doit contenir **une seule fois tous les chiffres de 1 à 9**

La solution sera donnée dans le prochain bulletin

5		9	8					
			6	2				
						4	5	
	4		2			3		6
2	1			5	3			
	3		1			5		2
						1	9	
			4	8				
1		7	3					

Solution du Sudoku du dernier bulletin

7	2	9	4	6	5	1	8	3
5	1	6	3	8	2	7	9	4
8	3	4	9	7	1	5	2	6
2	4	7	5	1	9	3	6	8
6	9	1	2	3	8	4	7	5
3	8	5	6	4	7	9	1	2
4	7	3	1	2	6	8	5	9
9	6	8	7	5	3	2	4	1
1	5	2	8	9	4	6	3	7

8. SUR VOTRE AGENDA

<i>Dates</i>	<i>Sujets / événements</i>	<i>Lieux</i>	<i>Organisation</i>
En attente de la réouverture des restaurants	Déjeuner associatif annuel	Restaurant à définir Rendez-vous 12h 30	IESF CA
Reporté lorsqu'une réunion en présentiel sera possible	Conseil d'Administration IESF CA	A définir	IESF CA
Reporté lorsqu'une réunion en présentiel sera possible	Assemblée Générale Ordinaire	A définir	IESF CA

9. COTISATIONS 2021

ADHESION – COTISATIONS 2020 AUX IESF COTE D'AZUR

Cette cotisation vous permet de participer à la formation de notre jeunesse avec le projet « Promotion des Métiers de l'Ingénieur et du Scientifique » PMIS dans les collèges et les lycées, de recevoir notre bulletin trimestriel, d'accéder aux informations sur les activités, conférences et visites organisées par l'IESF Côte d'Azur.

Nous ne pouvons faire fonctionner notre association sans votre aide.

- Pour les membres individuels (actifs et retraités), elle s'élève à 65 €, avec une réduction d'impôt de 66%.
- Pour les groupes régionaux, elle s'élève à 5,40 € par membre cotisant.
- Payer par carte bancaire en cliquant sur le lien suivant : [Payer sa cotisation 2021 sur HelloAsso](#)
- Ou établir un chèque à l'ordre d'IESF Côte d'Azur
- Ou par virement interbancaire : IBAN FR76 1460 7003 3434 0190 9537 082

Merci.

Si vous ne l'avez déjà fait, il n'est pas trop tard pour devenir membre adhérent des Ingénieurs et Scientifiques de France de la Côte d'Azur (IESF-CA). Il vous suffit de retourner le bulletin ci-dessous accompagné de votre cotisation pour cette année, à l'adresse:

IESF-CA - Polytech'Nice-Sophia Site Templiers 930 route des Colles - BP 145

06903 - Sophia Antipolis Cedex

NOM: **Prénom:**.....

Ecole / Université: **Adresse:**

Code Postal **Ville:** **Courriel:**

Tous nos Bulletins sont disponibles sur le site d'IESF-CA : coteazur.iesf.fr

Conformément à la loi informatique et liberté du 06/01/1978 (art.27), vous disposez d'un droit d'accès et de rectification des données vous concernant. Si vous souhaitez modifier vos coordonnées ou si vous ne désirez plus recevoir de messages électroniques de cet annonceur, envoyez un mail aux IESF-CA : contact-coteazur@iesf.fr

Responsables des groupes régionaux, faites-nous part des manifestations que vous organisez. Nous les publierons sur le site IESF Côte d'Azur (IESF-CA) pour en informer tous nos adhérents et sympathisants.

Article 18 du Règlement Intérieur : L'Association n'est pas responsable des opinions de ses membres, même dans ses publications.

Siège : Espace Associations Nice Garibaldi - SIRET 810 124 982 000 10

Adresse Postale : IESF-CA Polytech'Nice-Sophia - Site Templiers

930 route des Colles BP 145 -- 06903 – Sophia Antipolis Cedex

Site : coteazur.iesf.fr (www.iesf-ca.fr) Compte Twitter : [@IESF CA](https://twitter.com/IESF_CA) - Email : contact-coteazur@iesf.fr

Page Facebook : facebook.com/iesfca/ Chaîne YouTube IESF CA : Youtube.com/channel IESF CA