



IESF

SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS ET SCIENTIFIQUES DE FRANCE

CÔTE D'AZUR

BULLETIN

2021 – N°4

SOMMAIRE

1. Editorial : Bilan et perspectives.....	2
2. L'Assemblée Générale Ordinaire du 7 octobre 2021.....	3
3. Congrès des régions IESF 14 - 17 octobre 2021 Clermont-Ferrand.....	4
4. Aperçu des apports des technologies quantiques à la sécurité et à la défense.....	5
4.1 Le contexte stratégique.....	5
4.2 Les domaines applicatifs.....	7
4.2.1 Le calcul quantique.....	7
4.2.2 La simulation quantique.....	8
4.2.3 Les capteurs quantiques.....	9
4.2.4 Les communications quantiques.....	11
4.3 Les investissements et les écosystèmes.....	17
4.4 Conclusion et perspectives.....	23
5. Fêtes de la Science.....	25
6. Visites à Grasse le 20 octobre 2021.....	27
7. Jeux mathématiques : Solution du bulletin N°3 de 2021.....	28
8. Jeux mathématiques :.....	28
9. Sudoku.....	29
10. Sur votre Agenda.....	29
11. Cotisations 2022.....	30

Editorial : Bilan et perspectives



Assemblée Générale



Congrès des régions



Aperçu des apports des technologies quantiques à la sécurité et à la défense



Jeux mathématiques
Sudoku



Fêtes de la Science



Visite à Grasse

Source : [Le quantique, c'est fantastique](#), 14 juin 2018 à Nantes, au Web2day par [Hélène Pouille](#)

1. EDITORIAL : BILAN ET PERSPECTIVES



Assemblée Générale Ordinaire



Repas amical



Bex en salle à Polytech



Congrès des régions IESF 2021



**Salon des sciences
et de l'innovation**



Congrès des régions IESF 2022 à Grasse

L'actualité de ce trimestre concerne principalement la tenue d'un Conseil d'Administration le 02 septembre 2021, qui a précédé la tenue de notre Assemblée Générale, le 7 octobre 2021, plusieurs fois repoussée, du fait de la pandémie. Temps fort de la vie associative, cette AG a permis de faire le point sur dix-huit mois d'activités. Car nous ne sommes pas restés inactifs, ce qui a permis de garder les liens étroits entre nos membres. Les réunions de bureau se sont tenues mensuellement, en distanciel le plus souvent, ou en présentiel quand l'état sanitaire le permettait. Les bulletins ont tous paru. Les outils de communication, site web, comptes twitter et Facebook ont été tenus à jour.

Le 13 août nous avons pu nous réunir de nouveau ensemble, autour d'un repas amical. Bref, nous espérons maintenant repartir d'un bon pied, avec la reprise de visites, de conférences, d'activités ciblées vers les entreprises, les pouvoirs publics, et, pendant la semaine de l'industrie, d'un Hackathon pour les étudiants du supérieur à Grasse, orienté autour de « l'éco-responsabilité comme vecteur d'innovation sociale : un défi pour l'industrie de demain ».

Nous continuons d'entretenir d'excellentes relations avec Polytech-Nice-Sofia, qui met à disposition des locaux lorsque nous en avons besoin, JNI par exemple. Nous pouvons échanger régulièrement, et nous allons expérimenter le système des « polypoints » lors de futures séances PMIS, pour nous faire accompagner par des élèves ingénieures.

Notre délégation au Congrès des régions 2021 à Clermont-Ferrand a été peu nombreuse car les mêmes jours d'octobre avaient lieu le salon des sciences et de l'innovation à Antibes, où nous avons eu un stand bien visité. J'ai pu participer au congrès, très bien organisé par IESF-Auvergne ; les échanges d'actualité, notamment sur l'avenir des doctorants, sur les relations avec les universités – thèmes qui nous touchent de près- ont été fructueux.

Les IESF-régions nous font confiance pour organiser en 2022 le congrès annuel IESF. Nous allons nous mobiliser pour qu'il soit un succès. Mon souhait serait d'apporter une touche nouvelle d'originalité, particulièrement au niveau des échanges mutualisés entre régions, un souhait quasi unanime de la part des délégations, mais encore peu pris en compte. N'hésitez pas à me transmettre des idées de thématiques fortes à débattre.

L'année 2020 a laissé des traces dans le paysage économique, social et humain de notre société. J'espère que l'année qui vient permettra de mieux faire entendre notre voix, porteuse d'une tradition humaniste, que nous devons communiquer à nos jeunes. C'est dans ce sens que nous avons poursuivi notre réflexion lors de séminaires, concrétisée dans un opuscule à usage interne, mais dont un abrégé de quelques pages sera disponible. Lequel aura pour seule ambition de mieux faire connaître notre communauté des ingénieurs et des scientifiques, auprès des entrepreneurs de notre région (voire au-delà), auprès des acteurs politiques locaux et auprès des médias pour que les quelques recommandations que nous émettons tentent de relever les défis d'une économie prospère et responsable. En ce sens, il supplémente, pour nos actions locales, le « livre blanc » IESF national.

Enfin, je souhaiterais que nous soyons beaucoup plus nombreux à partager nos idéaux et fait appel à toutes les bonnes volontés qui voudraient se manifester pour nos actions PMIS, JNI, relations avec les entreprises, etc... Contactez-nous !

Au plaisir de vous retrouver tous.

J.P. Rozelot

Président des IESF-CA

Président du Conseil de Développement de la CAPG

Astronome honoraire à l'Université de la Côte d'Azur (UCA)

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

2. L'ASSEMBLÉE GÉNÉRALE ORDINAIRE DU 7 OCTOBRE 2021



Assemblée Générale Ordinaire IESF CA le 07/10/2021

C'est au Novotel de Sophia Antipolis que s'est tenue notre assemblée générale ordinaire (AGO). Les 22 présents ou représentés ont donné quitus au Président et au Trésorier après exposition des bilans moral et financier. Le bilan prévisionnel, approuvé à l'unanimité, a reconduit les cotisations 2022 au niveau de celles de 2021.

A noter que le rapport moral a souligné la volonté de l'association de maintenir ses activités malgré le contexte pandémique :

- 11 réunions du bureau exécutif (en présentiel ou distanciel avec amélioration de la qualité de connexion), 4 bulletins d'information, des mises à jour des sites, la participation à la Journée Nationale de l'industrie avec une conférence phygitale (vidéo + présence du public) « quelles mobilités pour le futur », par Gabriel PLASSAT, la participation aux événements de l'IESF nationale (AGO, congrès des régions, comité patrimoine).
- Visite au Fablab de Sophia Antipolis chez SoFAB de Telecom Valley.
- Poursuite des relations avec Polytech Nice Sophia (Direction = membre permanent au Conseil d'Ecole / Amicale des Anciens / Bureau des Elèves), avec l'université de Nice, avec l'IUT et avec les associations :
 - IPF / CARA SE (IBM) / INSAZUR / Cercle des Sources / A&M
 - INSA Lyon (Membre du Conseil d'Administration / Comité d'Ethique de l'AIL)
- Promotion des Métiers de l'Ingénieur et du Scientifique (PMIS). C'est ce point, ainsi que le cycle de conférences (annulé), qui aura le plus souffert de la situation. Beaucoup d'interventions ont été annulées, les chefs d'établissements appliquant le principe de précaution.
- Partage d'un repas amical au Saint Paul avec un invité Marc Rumeau, président de l'IESF, qui présente son programme.

En 2022, nous espérons une situation sanitaire plus sereine afin de remettre en place les actions extérieures traditionnelles, si possible même, de les renforcer (PMIS, conférences, JNI, visites, etc.)

L'AGO a été suivie d'un apéritif et d'un repas amical animés avec respect des gestes barrières.

Dominique QUEAU

Secrétaire adjointe IESF Côte-d'Azur

3. CONGRÈS DES RÉGIONS IESF 14 - 17 OCTOBRE 2021 CLERMONT-FERRAND

« Des IESF Régionales tournées vers l'avenir : Résilience et Innovation »

A l'invitation de la délégation IESF-Auvergne (Jacques Berbey), et sous la houlette du Vice-président IESF (Michel Coureau, également président régions), le congrès des régions s'est tenu à Clermont-Ferrand du 14 au 17 octobre. Petite précision. L'Assemblée des régions a lieu en général à Paris au premier semestre, et fait le point de l'activité des délégations dans le contexte national global. Le Congrès d'automne a lieu dans une région d'accueil (Lyon en 2019 par exemple), et débat autour de thématiques d'actualité communes à l'ensemble des régions. Les deux visent à faciliter la communication et les échanges entre les régions.

IESF-Auvergne a su très bien nous accueillir. Nous devons nous en souvenir pour le congrès de 2022 qui a été unanimement approuvé pour se tenir à Grasse ! En marge du congrès, j'ai particulièrement apprécié la visite du Hall 32, bâti sur un ancien site Michelin, devenu Centre de promotion des métiers de l'industrie, qui met au service de tous, formateurs et apprenants, des outils innovants adaptés aux différents besoins des entreprises, voire du grand public.

Sans entrer dans tous les détails de ce congrès, de mon point de vue, les séances les plus satisfaisantes ont été celle tournée vers l'accueil des doctorants en entreprise et celle sur les établissements publics expérimentaux. Pour la première, il a été montré le retour très positif de l'Université Clermont Auvergne qui organise un module « docteurs en entreprise » en partenariat avec IESF-Auvergne. Pour la seconde, l'auditoire a été particulièrement attentif aux relations actuelles entre la CTI et le Hcéres. Si la rivalité n'est pas nouvelle, la proximité de l'élection présidentielle risque de faire déboucher une solution assez rapidement, dans la foulée de décrets pris en « fournée ». A suivre.

IESF s'est doté depuis 2001 d'une charte d'éthique pour l'ingénieur. Elle avait besoin d'un toilettage. Référence pour les ingénieurs, la nouvelle Charte se veut d'aider les élèves-ingénieurs à se préparer à l'exercice de leur métier, en permettant que les valeurs qui guident les ingénieurs soient mieux comprises de tous. Elle sera disponible à la fin de l'année 2021, la question qui se pose étant celle de sa distribution aux élèves ingénieurs arrivant en 1^{ère} année, et peut être de la leur faire signer.

Après Grasse 2022, les participants se sont déclarés en faveur de la tenue du congrès à Saint-Dié/Epinal (IESF Lorraine) pour 2023 et à Gif/Yvette (IESF IdF) pour 2024.

Au final, avec de bonnes conférences sur Blaise Pascal, sur l'innovation chez Michelin et sur l'Hydrogène, de bonnes agapes dans les restaurants du centre-ville, ce congrès fut bien réussi, laissant aussi de la place pour des échanges entre délégations, toutes présentes (sauf extra métropole).

J.P. Rozelot

Président des IESF CA



Yvon Soulier, DIR Sud-Est Debout : Marc Rumeau, Président IESF

Jacques Berbey (Auvergne)

(Photos Paul LPX-IESF)

4. APERÇU DES APPORTS DES TECHNOLOGIES QUANTIQUES À LA SÉCURITÉ ET À LA DÉFENSE

Overview of the contributions of quantum technologies to security and defense

RÉSUMÉ

Les technologies quantiques constituent un domaine d'intérêt majeur aux enjeux réels conduisant à de nouvelles applications disruptives. Leur maîtrise donnera un avantage certain à leurs concepteurs que ce soit dans les domaines des communications, de la santé, de la sécurité, de l'énergie, du spatial, de l'environnement, etc. Les États-Unis, la Chine, l'Europe, l'Inde et bien d'autres pays ouvrent des programmes de recherche et favorisent les investissements en vue d'acquiescer une souveraineté technologique certaine. Mon précédent article avait exposé brièvement les technologies quantiques. Dans ce nouveau papier, après un rappel du contexte stratégique, les domaines applicatifs du quantique, avec quelques exemples dans les secteurs de la défense et de la sécurité, sont exposés. Des éléments d'analyse des investissements et des écosystèmes existants sont présentés. Les images ou les figures de l'article sont la propriété de leurs auteurs cités. Les références sont données en fin de chaque chapitre.

MOTS-CLEFS

Capteurs, communication, cryptographie, cybersécurité, ingénierie quantique, réseaux, internet, informatique en nuage, photonique, quantique, simulation, supraconducteur, énergie, consommation électrique, sécurité, défense, militaire, investissements, écosystèmes, licornes.

ABSTRACT

Quantum technologies constitute a major area of interest with real issues leading to new disruptive applications. Their mastery will give their designers a definite advantage, whether in the fields of communications, health, security, energy, space, the environment, etc. The United States, China, Europe, India and many other countries are opening research programs and promote investments with a view to acquiring certain technological sovereignty. My previous paper briefly exposed quantum technologies. In this new paper, after a reminder of the strategic context, the application domains of quantum computing, with some examples in the defense and security sectors, are presented. Elements of analysis of existing investments and ecosystems are presented. The images or figures in the article are the property of their cited authors. References are given at the end of each chapter.

KEYWORDS

Sensors, communication, cryptography, cybersecurity, quantum engineering, networks, internet, cloud, photonics, quantum, simulation, superconductor, energy, power consumption, security, defense, military, investments, ecosystems, unicorns.

4.1 LE CONTEXTE STRATÉGIQUE

Compte-tenu des tensions économiques, des foyers d'instabilité politique, du rapprochement des menaces et des crises de tout ordre, la compétition internationale scientifique et technologique s'intensifie. La maîtrise de l'espace (devenu le quatrième milieu stratégique par rapport à l'air, la terre et la mer), l'économie maritime, les accès aux ressources vitales, les infrastructures de télécommunication, deviennent autant d'enjeux majeurs car cela remet en cause les accords internationaux ou la législation des pays - cas de l'export de cryostats en Chine, de la production de semi-conducteurs, du Silicium 28 et de l'Hélium 3 et 4, etc. S'ajoutent des menaces, des activités criminelles, des actes de cybercriminalité du fait d'États ou de groupes divers, la mise en œuvre par des puissances étrangères d'équipements et de systèmes d'armes intégrant des technologies quantiques. Aussi pour la France et plus encore pour l'Europe, la réponse à l'ensemble de ces enjeux passe principalement par une autonomie stratégique.

Les défis répondent aux enjeux concernant les technologies quantiques 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. Un système quantique est beaucoup plus sensible à toute perturbation extérieure (mécanique, électromagnétique, etc.), bien plus que ne peut l'être un système électronique classique. Aussi la mise au point d'un système quantique est complexe et nécessite une collaboration de nombreuses disciplines scientifiques et techniques.

Parmi les dispositifs ou systèmes connus issus de ces technologies, certains existent depuis plusieurs dizaines d'années : la diode, le transistor, les semi-conducteurs, la microélectronique, le laser, l'imagerie médicale (RMN, etc.), la navigation par satellite (GPS, Galileo, etc.) et bien d'autres. Les applications de la physique quantique sont variées - la communication, la cryptographie, le calcul, la simulation, les capteurs, la détection, les radars, etc. Les avantages stratégiques seront indéniables dans les domaines de la médecine moléculaire, des nouveaux matériaux, de la chimie, des mathématiques, de l'aéronautique, du spatial, de l'astrophysique, du stockage du dioxyde de carbone, etc. Tous les secteurs sont concernés : le civil et plus particulièrement la défense.

Le secteur de la défense exploite systématiquement les opportunités offertes par toutes les innovations, souvent issues du monde civil (universités, organismes de recherche, industries, entreprises, etc.). Par exemple, l'intérêt d'une navigation inertielle quantique, notamment à atomes froids, permet de se positionner dans l'espace sans l'aide des GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) pour la géolocalisation en temps réel de tout objet : la maturité opérationnelle est prévue dans un délai de 5 à 10 ans.

Les investissements accompagnent les défis technologiques. Des pays (États-Unis, Chine, Union européenne, etc.), des grandes entreprises technologiques, des industriels, des organismes privés et académiques de recherche engagent d'importants moyens dans la réalisation de projets de recherche fondamentale ou d'innovation de rupture.

Les principaux enjeux de souveraineté et de puissance concernent aussi l'ensemble des technologies habilitantes stratégiques comme la cryogénie extrême, les lasers et l'électronique bas bruit : il s'agira pour les industriels français de maîtriser ces technologies, d'avoir des approvisionnements sécurisés de matières premières. Cela implique, par exemple, que les ordinateurs NISQ (*Noisy Intermediate-Scale Quantum*) ou quantique d'échelle intermédiaire bruité) de plus de 200 qubits, soient classés comme biens à double usage (BDU), au niveau international.

Un autre enjeu concerne la normalisation et la standardisation qui doivent susciter de la vigilance afin de préserver une autonomie dans les domaines clés tout en maintenant l'interopérabilité avec les pays alliés. Il faut aussi considérer la consommation énergétique des calculateurs quantiques qui apparaît comme une contrainte dans le cas de mise à l'échelle - capacité à créer des machines quantiques à grand nombre de qubits le plus faiblement bruités tout en assurant la fiabilité des calculs. L'optimisation de cette consommation fait l'objet de recherches à la fois théorique et d'ingénierie.

De manière générale, les systèmes de défense, les équipements militaires intègrent des dispositifs issus des nouvelles technologies après une période de tests. Selon les contrats de recherche et les partenariats, la continuité de la politique d'ouverture des infrastructures d'essais et de validation aux acteurs civils aiderait ainsi à la connaissance, à l'expérimentation *in situ* et permettrait aux militaires de se familiariser avec ces technologies quantiques en vue d'une adoption dans les futurs programmes d'équipement. L'Union européenne, forte de ses laboratoires de classe internationale et de ses pépites industrielles, dans le cadre des nouvelles technologies - le quantique entre autres, doit se montrer audacieuse et agile dans ses choix et ses financements.

Sources :

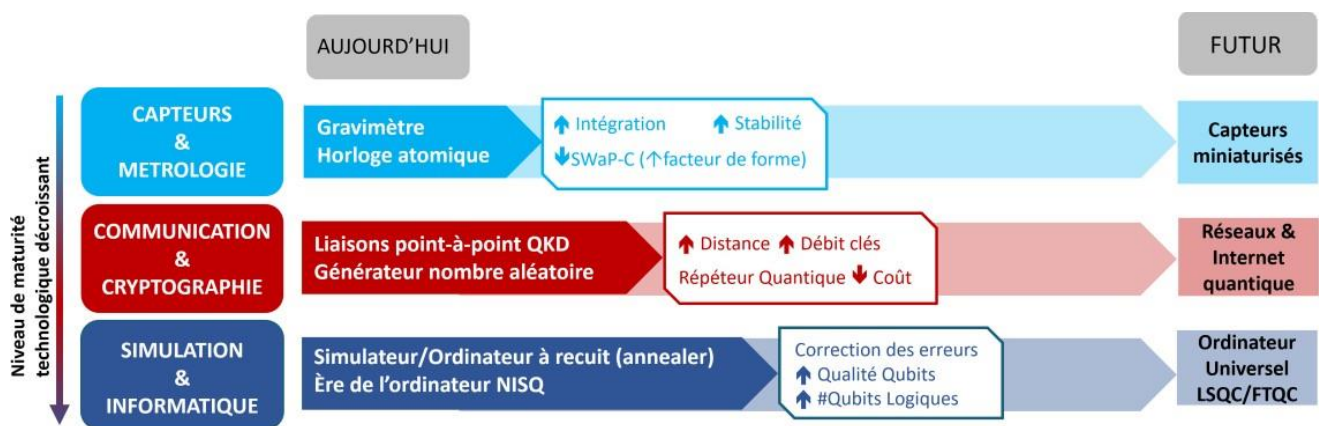
- ChoCs futurs, [Etude prospective à l'horizon 2030 : impacts des transformations et ruptures technologiques sur notre environnement stratégique et de sécurité](#), avril 2017
- [Revue stratégique de défense et de sécurité nationale](#), Délégation à l'information et à la communication de la Défense (DICOd), Bureau des Éditions, octobre 2017
- [La rupture stratégique](#), Étude de l'Institut de recherche stratégique de l'École militaire IRSEM, n°48, 2017
- [Révolutions quantiques](#), Clefs #66, Les voix de la recherche, juin 2018, Dossier CEA
- C. Villani, [Les technologies quantiques](#), OPECST, n°18, juillet 2019
- [Notes scientifiques de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques](#), OPECST, 2019
- J.-P. Damiano, [Les enjeux de la recherche et l'intelligence économique et stratégique](#), Tech. Ing. 2019
- O. Zajec, [Le paysage spatial militaire international : un bouleversement multipolaire entre ruptures technologiques et continuité de puissance](#), Les Cahiers de la RDN (*L'air et l'Espace enjeux de souveraineté et de liberté d'action de la France*), 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.
- [Faire de la France une économie de rupture technologique. Soutenir les marchés émergents à forts enjeux de compétitivité](#). Le collège d'experts. Rapport aux Ministre de l'Économie et des Finances et Ministre de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, 6 février 2020
- [Etude prospective à l'horizon 2030 : impacts des transformations et ruptures technologiques sur notre environnement stratégique et de sécurité](#), Institut d'Étude des Crises de l'Intelligence Économique et Stratégique (IEC-IES), 3 mai 2017, mise à jour 23 avril 2020
- O. Ezratty, [Comment la France peut réussir dans le quantique](#), Revue de l'association Telecom Paris Alumni #197, juillet 2020 ; [Comprendre l'informatique quantique](#), 3^{ème} éd. septembre 2020
- D. Desjardins, [Les enjeux de la physique quantique et les ruptures à anticiper](#), Centre des hautes études militaires (CHEM), 2020, p.219-234
- M. Le Bellac, [Peut-on parler de suprématie quantique ?](#) Reflets Phys. n°67, novembre 2020, p.4-8
- A. Auffèves, [Optimiser la consommation énergétique des calculateurs quantiques : un défi interdisciplinaire](#), Reflets de la Physique n° 69, février 2021, p.16-20
- J.-P. Damiano, [Les technologies quantiques. Contexte et enjeux, applications et perspectives](#), avril 2021
- [L'ambition japonaise d'une stratégie de sécurité économique : une voie à suivre](#), N. Regaud, IRSEM, Brève stratégique n°20, 15 avril 2021
- D. Dechaux, [La maîtrise du quantique, le Graal géopolitique mondial](#), Challenges, mai 2021
- [Technologies quantiques - défense et sécurité](#), OTAN, 3 juin 2021
- Ph. Lavigne, CEMAEE, [L'armée de l'Air et de l'Espace. Préserver un modèle adapté aux enjeux, développer l'agilité comme atout, valoriser et optimiser son emploi](#), in Vortex, Etudes sur la puissance aérienne et spatiale, n°1, juin 2021, p.9-24
- Loesekrug-Pietri (JEDI), R. Forestier (JEDI), [L'avenir de la vie privée ne doit pas se décider aux États-Unis](#), Tribune - Nouvel Obs, 14 juillet 2021
- [Esprit défense](#), n°2, Délégation à l'Information et à la Communication de la Défense (DICOd), nov. 2021
- [L'Europe, puissance technologique ? Les avancées dans le spatial et le quantique](#), conférence en mode hybride (présentiel et visioconférence), Institut français des relations internationales (IFRI), 18 novembre 2021

4.2 LES DOMAINES APPLICATIFS

Ces technologies mettent en œuvre la superposition quantique d'états d'un système physique, ou l'intrication quantique de plusieurs sous-parties de ce système. Elles permettent l'élaboration de :

- 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 ;
- Systèmes à atomes chauds ou froids ;
- Systèmes à ions piégés électromagnétiquement ;
- Systèmes impliquant des spins électroniques ou nucléaires ;
- Systèmes à base de circuits quantiques supraconducteurs ou d'oscillateurs mécaniques.

Elles sont devenues un enjeu de souveraineté. En effet le potentiel technologique et industriel du quantique explique la mobilisation de nombreux États, que ce soit pour les questions de détection, de la simulation quantique, de la cryptographie, des transports, de la santé, de l'énergie, etc.



Technologies quantiques vers la seconde révolution, M. Kürek, 2020

Selon [Michel Kürek](#), les finalités de ces différentes applications sont variées : miniaturisation, cybersécurité, internet quantique, ordinateur quantique universel ; leurs horizons de mise en œuvre s'étendent sur 10 ou 15 ans. Si la plupart des technologies sous-jacentes sont émergentes, c'est certainement dans le domaine des capteurs qu'apparaîtront assez rapidement les premières applications, suivies par les télécommunications, et en dernier lieu, les ordinateurs.

Pour mémoire :

Dans l'informatique quantique, on considère des qubits prenant 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. Ils sont des dispositifs matériels qui intègrent des particules élémentaires comme les ions piégés, les photons, 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.

4.2.1 LE CALCUL QUANTIQUE

Les technologies quantiques concernant le calcul quantique sont les plus ambitieuses et les plus complexes à mettre en œuvre.

Les enjeux sont la recherche de protocoles de calcul tolérant aux erreurs sur des processeurs impliquant plusieurs dizaines de qubits ainsi que la réalisation d'algorithmes de calcul prédisant une accélération quantique en regard de leurs équivalents classiques. Il s'agira de développer des ordinateurs quantiques capables de passer à l'échelle ou LSQ (*Large Scale Quantum*) en vue de calculs et modélisations d'une complexité supérieure de plusieurs ordres de grandeur à ce qui peut être traité avec les supercalculateurs traditionnels, même accélérés avec des qubits NISQ. L'usage de telles machines pourra stimuler efficacement l'innovation et la mise sur le marché de produits issus des secteurs industriels qui reposent sur de longues phases de validation.

Les secteurs ciblés sont la défense et la sécurité, les finances, la santé et la pharmacie, l'énergie, les technologies de l'information, les transports, la R&D, l'industrie 4.0, l'IA, etc.

Ainsi les défis sont la conception des qubits et leur manipulation (modification de leur état ou intrication) en vue de réaliser des portes quantiques regroupant plusieurs qubits à l'aide d'impulsions laser ou électromagnétiques. Leur nombre peut varier de quelques dizaines à quelques centaines. Très sensible à son environnement, le qubit doit être isolé du « bruit » extérieur (vibration, onde électromagnétique, etc.) pour conserver sa cohérence (fonctionnement proche de 0°K ou 273,15°C). En effet, un défaut d'isolation implique l'apparition de décohérences quantiques et donc

d'erreurs. Pour les corriger, il existe des redondances d'architecture ou bien l'utilisation de qubits ayant un temps de cohérence plus important (durée de la conservation de leurs propriétés quantiques plus grande).

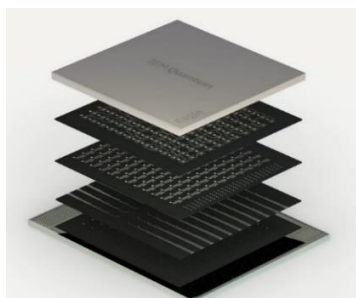
Sachant qu'un qubit ne peut être lu qu'une fois sous peine d'être détruit, cela signifie que la lecture du résultat doit se faire à la fin du calcul avec un algorithme quantique spécifique. Il est nécessaire de développer des algorithmes de réduction d'erreurs en utilisant un code correcteur d'erreurs quantiques avec un encodage d'un qubit logique dans plusieurs qubits physiques.

A ce propos, les chercheurs du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) ont franchi une étape décisive pour la réalisation de bits quantiques silicium, composants élémentaires d'un processeur quantique, en série et aux standards de l'industrie microélectronique (CEA-Leti et Institut Nanosciences et cryogénie - Inac, CEA/UGA). Afin d'éviter les pertes de cohérence, des technologies sont mises en œuvre sur un silicium appauvri en ^{29}Si .



© Jayet/CEA, Source [CEA](#)

L'ordinateur quantique n'est pas toujours meilleur que les ordinateurs actuels, mais cela peut être le cas pour des applications spécifiques avec des algorithmes appropriés : on parle alors de suprématie quantique ou d'avantage quantique algorithmique. A ce sujet, Google affirme l'avoir atteint le premier en 2019, ce qu'IBM a contesté très rapidement. Encore faudrait-il connaître les conditions expérimentales, les environnements, les technologies mises en œuvre, le type de calcul, etc. Un groupe de l'Université de science et de technologie de Chine ([USTC](#)) a annoncé y être aussi parvenu. En France, les travaux d'une [équipe de chercheurs du CNRS \(LIP6\)](#), de l'université d'Édimbourg et de l'entreprise [QC Ware](#), publiés dans [Nature Communications](#) (8 février 2021), *apportent les moyens de vérifier un avantage quantique en calcul.*



Le processeur quantique Eagle d'IBM
Crédit IBM.

Outre les annonces de ses nouveaux futurs processeurs Osprey de 433 qubits prévu pour 2022, et du Condor de 1.121 qubits pour 2023, IBM a présenté [Eagle](#), un processeur quantique de 127 qubits, qui est aussi le premier à être trop complexe pour être simulé complètement sur un ordinateur classique.

Il exploite de nouvelles techniques d'architecture de conditionnement 3D implantant les composants de contrôle sur plusieurs niveaux physiques tout en gardant les qubits sur une seule couche. Ainsi les qubits peuvent fonctionner ensemble.

C'est aussi en 2023 que devraient être présentés le nouveau système [Quantum System Two](#), qui hébergera les futurs processeurs quantiques, et [Quantum Serverless](#), le nouveau modèle de programmation permettant de tirer parti des ressources quantiques et classiques.

Les [entreprises mondiales du secteur de l'énergie](#) mènent des recherches sur les technologies quantiques pour améliorer leur efficacité dans les opérations de transport. « *ExxonMobil et IBM étudient les solutions possibles à la résolution d'une tâche complexe : suivre des dizaines de milliers de navires marchands à travers le monde, ainsi que des millions de marchandises et de produits qu'ils transportent à chaque voyage. Le marché global est évalué à environ 14 000 milliards de dollars. BP et IBM travaillent afin de résoudre les défis commerciaux et techniques pour réduire les émissions de carbone.* »

4.2.2 LA SIMULATION QUANTIQUE

Elle concerne des systèmes ou simulateurs quantiques ne nécessitant pas un contrôle complet de chaque composant individuel et sont donc plus simples à élaborer. Elle s'applique aux problèmes complexes ne pouvant être résolus par les ordinateurs les plus puissants : l'origine de la supraconductivité à haute température, le magnétisme quantique, l'optimisation de l'apprentissage automatique, etc. Le nombre de qubits nécessaire peut être de l'ordre de quelques centaines. La simulation contribue à la compréhension du fonctionnement des systèmes quantiques, à la reproduction du comportement des matériaux à très basse température, etc. Ses technologies sont plus particulièrement les atomes ultra-froids, les ions piégés, les circuits supraconducteurs ou les fluides quantiques de lumière.

L'enjeu principal est la simulation de problèmes physiques dont la complexité est telle qu'ils ne peuvent être résolus par les ordinateurs les plus puissants. Le développement des machines NISQ exploitables commercialement produira des outils d'apprentissage efficaces du calcul quantique. Les écosystèmes devront rassembler les compétences nécessaires pour anticiper les ruptures.

Les secteurs ciblés sont la physique des matériaux, la physique des hautes énergies, la chimie quantique, la pharmacie (interactions de grosses molécules), l'agronomie, l'astrophysique, etc.

Par exemple, la société [Pasqal](#), *spin-off* de l'Institut d'Optique, 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. Leurs unités de traitement quantique ont la particularité d'être constituées de centaines de qubits atomiques en réseaux 2D et 3D¹. Elle est la première start-up française de *hardware* quantique et une des toutes premières en Europe. Elle développe un processeur quantique basé sur la technologie des atomes froids. Elle a réussi la simulation d'un matériau antiferromagnétique, impossible à réaliser avec un ordinateur conventionnel. Des entreprises utilisent cette machine, comme EDF qui optimise ainsi l'alimentation de ses bornes de recharge de véhicules électriques, Pasqal a un partenariat avec [Atos](#) pour développer un accélérateur quantique reposant sur la technologie des atomes neutres pour développer des systèmes hybrides quantique-HPC (*High Performance Computing*) exploitables à court terme. [Source : [Industries & Technologies](#), n°1043, juin 2021].

Pour mémoire, [Atos](#), connu pour expertise unique en Europe et ses technologies innovantes comme l'*Atos Quantum Learning Machine* ([Atos QLM](#)), le simulateur quantique le plus puissant au monde, collabore étroitement avec des acteurs comme le Grand Équipement National de Calcul ([GENCI](#)) et le [CEA](#), ou la start-up [Pasqal](#) comme nous venons de l'exposer. Atos propose le QAS (*Quantum Annealing Simulator*), ordinateur à recuit quantique simulé, compatible avec l'Atos QLM. Il est conçu pour apporter aux chercheurs et industriels les moyens de développement et de test des algorithmes pour l'ère NISQ dans les secteurs de l'énergie, de l'industrie, de la logistique, de la finance, de la chimie, de la pharmacologie, etc. [Source : [Les Echos](#), mai 2021].

¹Un [laboratoire Harvard-MIT](#) propose, avec la technologie des atomes froids, un simulateur de 256 qubits alors que Pasqal n'en comporte que 200 aujourd'hui. Les chercheurs américains exploitent un [dispositif nommé modulateur spatial de lumière](#), répartissant les atomes-qubits en 2D, sous forme de grille simple, de treillis triangulaires ou de nids d'abeilles pour moduler les interactions entre les particules.

Dans une interview parue dans [Usine Nouvelle](#), [Jean Dalibard](#), médaille d'or CNRS 2021, pour ses travaux pionniers en physique de la matière quantique ultra-froide, professeur au collège de France, explique : « Ces atomes passent d'une vallée à l'autre en interagissant avec leurs voisins. Avec une particularité : *Très lents, très froids, ils sont davantage une onde qu'une particule... C'est la matière quantique. Elle peut sembler extraordinaire, mais elle a énormément de similarités avec d'autres systèmes de la nature.* ». Il ajoute : « *Pourquoi un métal conduit-il de l'électricité ? Car des électrons – des particules très quantiques – se déplacent dans sa structure, son paysage* » ... « *Si vous remplacez les électrons par nos atomes et que vous reproduisez les vallées du matériau par celles de nos lasers... vous reproduisez son fonctionnement* ».

En ce qui concerne le [dimensionnement énergétique](#) des machines quantiques, il apparaît comme une contrainte fondamentale pour leur mise à l'échelle. Selon [A. Auffèves](#) de l'Institut Néel (CNRS) - Université Grenoble Alpes : « *la compréhension et l'optimisation de leur consommation tracent de nouvelles pistes d'exploration à l'interface entre recherche fondamentale et ingénierie* ». Dans sa publication, elle déclare que « *l'un des défis de la recherche sera de trouver dériver de nouvelles bornes fondamentales reliant quantitativement le taux de bruit à la consommation énergétique des calculateurs, en particulier dans le régime quantique. ... D'un point de vue thermodynamique, il s'agit typiquement de réaliser un processus hors-équilibre, à savoir préserver la cohérence et l'intrication quantiques alors même que le bruit tend à les détruire* ».

Source : A. Auffèves, [Optimiser la consommation énergétique des calculateurs quantiques : un défi interdisciplinaire](#), Reflets de la Physique n° 69, février 2021, p.16-20.

4.2.3 LES CAPTEURS QUANTIQUES

Par leurs applications duales, civiles et militaires, les capteurs quantiques offrent un fort potentiel de développement. Ils sont présents dans les voitures autonomes, les trains automatisés, le contrôle du trafic aérien, l'industrie 4.0, les dispositifs et services médicaux connectés, les systèmes de défense et de sécurité, etc. Ils exploitent la sensibilité des qubits à l'environnement. Grâce aux progrès constants de la qualité et du contrôle des matériaux, de la réduction des coûts et à la miniaturisation des composants tels que les lasers, la réalisation de dispositifs optimisés est possible. Par exemple, par un procédé basé sur des atomes refroidis par laser, des horloges atomiques sont opérationnelles et commercialisées.

L'adaptation des capteurs quantiques aux systèmes PNT (positionnement, navigation, datation) et aux radars est d'un intérêt réel pour les militaires. En effet, ils pourraient être intégrés aux systèmes de détection des sous-marins comme des avions furtifs. En cas de perte de signal GPS ou autre, de tels dispositifs de navigation inertielle seraient indispensables dans la poursuite d'une mission. De toutes les technologies quantiques actuellement en développement, celles des capteurs sont aujourd'hui parmi les plus abouties.

Les **enjeux** sont l'exploitation de la cohérence d'un bit quantique unique, l'élaboration de standards métrologiques, l'usage de l'intrication, etc. Ils devront prendre en compte la nécessité de favoriser l'incrémentation en maturité de ces technologies vers les applications et les marchés en vue d'une viabilité industrielle à long terme.

Les **secteurs ciblés** sont donc l'aérospatial, la défense et la sécurité, la navigation, l'interception, la détection, le diagnostic médical, la chimie, la biochimie, la science des matériaux, la géophysique, la métrologie industrielle, l'industrie 4.0, la gestion des ressources naturelles, etc.

Les capteurs quantiques offrent à la fois une sensibilité et une précision uniques. Ils offrent une rupture technologique dans la détection dans de nombreux domaines. Par exemple, les dispositifs à semi-conducteurs, tels que les centres de lacunes d'azote dans le diamant, se sont avérés utiles pour mesurer de très petits champs magnétiques (biocapteurs à l'imagerie par résonance magnétique, détection de défauts dans les métaux, etc.). *L'interception électromagnétique*

pourrait être plus performante en utilisant des capteurs à base d'impuretés dans le diamant pour des analyses spectrales des signaux électromagnétiques, de plusieurs ordres de grandeur, plus fines que les technologies actuelles.

Dans le domaine de l'infrarouge, une publication du [Journal du CNRS](#) (janvier 2021) a traité des innovations pour les capteurs quantiques. Il y est rapporté qu'une équipe de scientifiques issus de [l'université Paris Diderot](#), de [l'ETH de Zurich](#) et de [l'université de Leeds](#), a élaboré une nouvelle structure amplifiant les performances des détecteurs infrarouges. Pour cela, des concepts originaux ont été implémentés dans des structures quantiques, grâce à des procédés innovants de nano-fabrication. Ces nouveaux détecteurs présentent d'excellentes performances à température ambiante et une réponse très rapide.

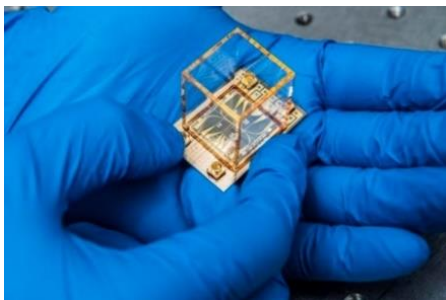
Selon une publication, parue en janvier 2021 dans la revue [Physical Review Applied](#), des chercheurs de l'*U.S. Army Research Laboratory* ont présenté une version beaucoup plus précise d'un capteur destiné à détecter l'ensemble du spectre radioélectrique jusqu'à 20 GHz, donc y compris le Wi-Fi, le Bluetooth, etc. utilisés en communication. La couverture de la plage de fréquences est très précise. Ce dispositif, en cours de développement, est ainsi capable de détecter des communications hostiles, de protéger les systèmes de communication contre les brouilleurs et interférences diverses, etc. Une fois les solutions de miniaturisation trouvées, et d'économie d'énergie, il sera en capacité d'être intégrable à un système de communication militaire.

- **Les dispositifs d'imagerie quantique** utilisent une lumière intriquée afin d'obtenir des images de plus haute résolution. Un principe analogue utilisant des photons intriqués permet d'envisager la détection d'objet à distance. Une source émet un photon vers une cible. Une fois atteinte, la modification de son état est observée à travers celui de son double. Des chercheurs de [l'université de Glasgow](#) ont réussi à créer un hologramme haute définition grâce à l'intrication quantique. Ils ont projeté un rayon de lumière au travers d'un cristal, le bêta-borate de baryum : il se divisa en deux ondes aux photons enchevêtrés : chaque photon de la première onde est intriqué avec un photon présent dans la deuxième onde. Cette technique permet une génération d'hologrammes beaucoup plus nets et précis, d'où son utilisation en imagerie médicale.

Le **LiDAR** (*Light detection and ranging*) est un système de télédétection et de télémétrie utilisant des impulsions de lumière infrarouge. Pour une cartographie 3D, le LiDAR, équipant un avion, une voiture ou un drone, transmet ses coordonnées (latitude, longitude, hauteur) par le système GNSS et son unité de mesure inertielle (IMU) qui en donne son orientation (tangage, roulis, lacet). La combinaison de ces données fournit une image 3D de ce qui est visé.

Le radar quantique est une technologie de télédétection émergente fondée sur l'illumination quantique. Il sera en capacité de repérer les avions furtifs, de filtrer les tentatives délibérées de brouillage, etc. Il émet très peu d'énergie et est donc difficile à détecter.

- **Les interféromètres** atomiques et moléculaires utilisent les états de la superposition pour mesurer très précisément l'accélération et la rotation (appareils de navigation inertielle, mesures d'infimes changements dans les champs gravitationnels, les champs magnétiques, le temps ou les constantes physiques fondamentales). Grâce à leur très grande stabilité, les accéléromètres et les gyromètres à atomes permettraient un guidage beaucoup plus rigoureux.



Thales a conçu un dispositif utilisant une technique novatrice : [les puces à atomes](#). Les atomes refroidis par laser, sont piégés magnétiquement sur une puce : ils y sont manipulés à l'aide d'ondes radio produites par des microfils électriques. *Société Thales TRT, membre du réseau d'excellence FIRST-TF porté par le CNRS. ©Hubert RAGUET / THALES TRT / FIRST-TF / CNRS Photothèque*

La mesure de la gravité par capteurs quantiques est d'une grande précision absolue et stable. Les applications de tels gravimètres quantiques absolus vont de la navigation en l'absence de signal GPS à la physique fondamentale, en passant par la prospection du sous-sol et la cartographie des fonds marins. La délégation générale de l'armement ([DGA](#)) a commandé des gravimètres à technologie quantique pour le service hydrographique et océanographique de la Marine nationale ([SHOM](#)) auprès de l'Office national d'études et de recherches aérospatiales ([ONERA](#)).



Campagne de mesure avec le bâtiment hydrographique et océanographique Beautemps-Beaupré (Malo Cadoret). Utilisation du Gravimètre Interférométrique de Recherche à Atomes Froids Embarquable (GIRAFE).

Source : [CNAM](#), février 2021

Cette année, **Muquans**, l'acteur industriel unique spécialisé sur les mesures quantiques de haute précision localisé à Talence (Gironde) a fusionné avec **iXblue**, le spécialiste de la navigation autonome. Muquans fournit des capteurs quantiques aux navires du SHOM alors que iXblue équipe 70 % des navires de la Marine nationale, de ses systèmes de navigation ainsi que de nombreuses marines et armées dans le monde (la fabrication de centrales inertielles de très haute performance est à Saint-Germain-en-Laye). Pour information, iXblue vient d'acquies **Kylia**, entreprise française, développant des composants et instruments optiques, produits innovants en fibre optique basés sur la technologie de l'espace libre pour les réseaux de télécommunications.

- **La métrologie quantique** utilise les caractéristiques de cohérence et les effets Josephson et Hall quantique pour mesurer très précisément le temps, la fréquence, la tension, le courant et la résistance dans les étalons quantiques. C'est grâce aux qualités de telles mesures que le **nouveau système international d'unités (SI)** a été défini, lors de la 26^{ème} Conférence générale des poids et mesure (**CGPM**), (13-18 nov. 2018). Le kilogramme, l'ampère, le kelvin et la mole ont une nouvelle définition. La seconde, le mètre et la candela, ont une nouvelle reformulation afin d'établir un nouveau système d'unités défini par sept constantes universelles fixées à des valeurs exactes.

Plusieurs laboratoires impliqués dans le domaine des technologies quantiques font partie du **réseau national de la métrologie française** piloté par le Laboratoire national de métrologie et d'essais (**LNE**). Il regroupe les laboratoires nationaux de métrologie (LNM) et les laboratoires associés au LNE (LA). Le réseau européen de métrologie dédié aux technologies quantiques (EMN-Q) issu de The European Association of National Metrology Institutes (**EURAMET**) pour répondre, de manière coordonnée à l'échelle de l'Europe, aux besoins de métrologie en lien avec le développement des technologies quantiques, qu'il s'agisse de recherche, d'infrastructures, de transfert de connaissances, de normalisation ou de services.



Les 7 unités de base du SI.

© BIPM - Bureau international des poids et mesures

Constante	Symbole	Valeur numérique exacte	Définition de l'unité du SI
Fréquence de transition entre les deux niveaux de l'état de caesium	$\Delta\nu_{Cs}$	9 192 631 770 Hz (avec Hz = s ⁻¹)	La seconde (s) est définie en fixant la valeur de $\Delta\nu_{Cs}$ exprimée en s ⁻¹ .
Vitesse de la lumière dans le vide	c	299 792 458 m/s	A partir de la seconde, le mètre (m) est défini en fixant la valeur de c exprimée en m s ⁻¹ .
Constante de Planck	h	6,626 070 15 × 10 ⁻³⁴ J s (avec J = m ² kg s ⁻²)	A partir de la seconde et du mètre, le kilogramme (kg) est défini en fixant la valeur de h exprimée en kg m ² s ⁻¹ .
Charge élémentaire	e	1,602 176 634 × 10 ⁻¹⁹ C	A partir de la seconde, l' ampère (A) est défini en fixant la valeur de e exprimée en A s.
Constante de Boltzmann	k	1,380 649 × 10 ⁻²³ J/K (avec J = m ² kg s ⁻²)	A partir de la seconde, du mètre et du kilogramme, le kelvin (K) est défini en fixant la valeur de k exprimée en K ⁻¹ kg m ² s ⁻² .
Constante d'Avogadro	N_A	6,022 140 76 × 10 ²³ mol ⁻¹	La mole (mol) est définie en fixant la valeur de N_A exprimée en mol ⁻¹ .
Rendement lumineux d'une radiation monochromatique de fréquence 540,10 ¹² Hz	K_{cd}	683 lm/W (avec lm = cd m ² m ⁻² = cd sr et W = m ² kg s ⁻³)	A partir de la seconde, du mètre et du kilogramme, la candela (cd) est définie en fixant la valeur de K_{cd} exprimée en cd sr kg ⁻¹ m ⁻² s ⁻³ .

Construction du nouveau Système international d'unités ou SI.

© Christophe Daussy

La normalisation et la standardisation des technologies quantiques, plus particulièrement celles liées aux capteurs, constituent un sujet d'importance et donc un point de vigilance fondamental. Aux États-Unis, c'est le NIST qui a en charge le pilotage et le contrôle de la définition des normes et de la standardisation des applications quantiques. Au vu de la puissance américaine et des moyens financiers que la Chine met en jeu, l'initiative et l'agilité européennes, comme entité de proposition et d'affirmation est une obligation pour espérer peser dans l'élaboration de ces référentiels techniques. Les technologies de cryptographie quantique comme les algorithmes indispensables aux ordinateurs quantiques contribueront ainsi à établir la norme dans le domaine de la communication et du calcul. Enfin la maîtrise des technologies habilitantes permettra également de façonner le standard des applications.

4.2.4 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 de machines quantiques constitue une menace pour les données chiffrées qui pourraient être décryptées en un temps record.

Les **enjeux** sont le développement et la certification des composants et architectures (sources, relais quantiques, mémoires quantiques, détecteurs), les protocoles de communications (distribution quantique de clés, etc.), les réseaux quantiques (internet quantique, etc.)

Les **secteurs ciblés** sont la défense et la sécurité, les échanges commerciaux, les transports, l'énergie, l'accès et la protection des données, l'authentification, la cryptographie, la distribution quantique de clés, etc. avec des applications comme l'interférométrie à longue distance, la référence de temps pour la synchronisation d'horloges atomiques, la mise en réseau d'ordinateurs quantiques, etc.

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

LES RÉSEAUX QUANTIQUES

Des réseaux de communication performants et sécurisés sont essentiels pour les échanges nationaux et internationaux, le développement des États, dans tous les secteurs civils et militaires. L'arrivée des technologies quantiques faisant redouter des atteintes à l'intégrité des données, entre autres, aux conséquences dramatiques en période de crise

(énergie, approvisionnement, etc.), il est impératif de repenser les systèmes de sécurité et d'anticiper les solutions possibles pour les infrastructures et les systèmes associés, au vu des progrès théoriques et technologiques.

De nombreux projets européens existent, comme par exemple *The Quantum Internet Alliance* ou l'Alliance pour l'Internet quantique ([QIA](#)) lancé en octobre 2018 et s'achevant en septembre 2021. Il était l'un des 20 projets retenus dans le cadre du [Quantum Flagship](#) de l'UE (troisième initiative de recherche et d'innovation à grande échelle de ce type financée par la Commission européenne). Le projet QIA a pour objectif de développer un plan directeur pour un Internet quantique en Europe basé sur l'intrication, en développant, intégrant et démontrant tous les sous-systèmes matériels et logiciels fonctionnels, aboutissant à la première démonstration expérimentale d'une pile réseau entièrement intégrée fonctionnant sur un réseau quantique multi-nœuds. Neuf pays ont participé à ce projet - Allemagne, Autriche, Danemark, Espagne, France, Pays-Bas, Portugal, Suisse, Royaume-Uni. Pour la France, on compte le [CNRS](#), le [CEA](#), [VeriQloud](#), [Muquans](#), [My Cryo Firm](#) et [Sorbonne Université](#).

La Commission européenne a sélectionné [Airbus Defence and Space](#) pour piloter un consortium d'entreprises et d'instituts de recherche. Il est chargé de concevoir un réseau sécurisé de communication quantique couvrant l'ensemble de l'UE dans le cadre d'un projet de l'Euro QCI. Un premier démonstrateur devra être disponible en 2024, puis un service opérationnel en 2027. Ce consortium, dirigé par Airbus, est composé de [Leonardo](#) (second groupe industriel italien - secteur aéronautique et spatial, constructeur d'hélicoptères civils), [Orange](#), [PwC France et Maghreb](#), [Telespazio](#) (coentreprise détenue par Leonardo à 67% et par [Thales](#) 33%), le [Consiglio Nazionale delle Ricerche \(CNR\)](#) et [l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica \(INRiM\)](#).

En juillet 2021, les 27 pays membres de la commission européenne (CE) et l'agence spatiale européenne (ESA) ont officialisé la création d'une infrastructure de communication quantique sécurisée de l'UE, l'[EuroQCI](#), initiée en 2019. Son rôle sera de protéger les données sensibles et les infrastructures critiques en intégrant des systèmes quantiques dans les dispositifs existants, fournissant ainsi une couche de sécurité supplémentaire basée sur la physique quantique. Il renforcera les capacités scientifiques et technologiques de l'Europe en matière de cybersécurité et de technologies quantiques.



[EuroQCI](#) (Quantum Communication Infrastructure)

LA CYBERSÉCURITÉ ET LA CRYPTOGRAPHIE

La cybersécurité est directement liée à la souveraineté numérique d'un pays. Elle est au cœur d'enjeux économiques, stratégiques et politiques. Elle a une approche globale. Elle concerne aussi bien les réseaux informatiques, les liaisons satellites, les clouds, les voitures autonomes, l'élaboration de médicaments, le matériel militaire, les données, les objets connectés, etc. Elle inclut aussi les risques juridiques sur le plan industriel ou politique. Les États, les entreprises, les infrastructures critiques, aujourd'hui largement interconnectés, sont vulnérables. En cas de cyberattaque réussie, les conséquences économiques et sociétales peuvent être considérables.



Tour d'horizon des structures innovantes à l'intersection de l'informatique quantique et de la cybersécurité

Source : Informatique Quantique et Cybersécurité, garants de l'autonomie technologique européenne,

Étude [France Digitale / Wavestone 2020](#)

Quelques rappels sur les critères de sécurité de l'information

- **L'intégrité*** : l'information est exacte et exhaustive. Elle ne peut être altérée ou détruite de manière non autorisée, volontairement ou non ;
- **La confidentialité*** : l'information n'est accessible qu'aux personnes ou processus autorisés. Tout accès indésirable doit être bloqué ;
- **L'authentification*** : c'est l'exactitude de l'identité d'une personne, ou d'une machine par exemple, pour maintenir la confiance dans les relations d'échange et de partage (action d'identification). C'est la vérification de la légitimité du droit d'accès d'un terminal à un système d'information ;
- **La non-répudiation*** : l'information ne peut faire l'objet d'un déni de la part de son auteur ;
- **Le contrôle d'accès*** : seules les personnes autorisées peuvent accéder à l'information ;
- **La disponibilité** : l'information est accessible et utilisable sans faille. L'accès aux services et ressources installés est garanti avec le temps de réponse prévu ;
- **La traçabilité** : c'est la garantie que les accès ou les tentatives d'accès sont recensés et que ces traces sont conservées et demeurent exploitables ;
- **L'imputation** : un tiers ne peut pas s'attribuer les actions d'un autre.

Les * désignent les objectifs de la cryptographie pour une sécurité optimale.

Afin d'assurer la sécurité des transactions de la vie quotidienne que ce soit dans le domaine de la vie privée (cartes bancaires, identités numériques, signatures numériques, dossiers médicaux, courriels, etc.) ou publique (État, administrations, entreprises, finances, défense, énergie, etc.), les données sont cryptées à l'aide de systèmes cryptographiques asymétrique et/ou symétrique, entre autres.

- La **cryptographie asymétrique** utilise une clé accessible au public pour permettre aux personnes de chiffrer des messages pour un destinataire, seul détenteur de la clé privée nécessaire pour les déchiffrer. Cette technique est basée sur la factorisation des nombres en produit de nombres premiers, pour les algorithmes RSA (chiffrement et signature numérique), sur les problèmes de logarithme discret pour le DSA (signature), Diffie-Hellman (échange de clés) et la cryptographie sur les courbes elliptiques (ECC) basée sur des fonctions mathématiques simples à calculer dans un sens, mais très difficiles à inverser. *Cependant, en informatique quantique, la découverte d'algorithmes en temps polynomial pour la factorisation des nombres entiers et les logarithmes discrets sont une réelle menace pour la sécurité de l'infrastructure à clé publique actuelle qui repose sur la difficulté aigüe de ces problèmes.*
- La **cryptographie symétrique** est caractérisée par le fait que l'expéditeur et le destinataire aient des clés numériques identiques pour chiffrer et déchiffrer les données. Son usage est efficace dans le cas où les données transitent par un canal chiffré par des algorithmes asymétriques. En effet il faut donc que les deux terminaux partagent une clé à l'avance. Un exemple connu est le chiffrement *Advanced Encryption Standard* (AES) très utilisé pour chiffrer des fichiers, des mots de passe, etc. dans les applications WhatsApp, Signal, VeraCrypt, etc.
- Parallèlement à ces deux techniques, il y a les **fonctions de hachage** qui assurent l'intégrité des fichiers ou des certificats numériques. Elles reposent sur le fait que chaque bit de sortie dépend de chaque bit d'entrée. Elles permettent d'associer à un message, à un fichier, une photo, etc. une empreinte unique calculable et vérifiable par tous. D'autres variantes existent.

Pour répondre à ces enjeux stratégiques, deux tendances de cryptographie prennent forme et se développent. Elles concernent les secteurs civil et militaire, les entreprises, les grands groupes industriels ou l'État :

- La première est la **cryptographie quantique** utilisant les propriétés de la physique quantique, particulièrement le principe de l'intrication, pour sécuriser le transport de l'information. Elle permet le partage de clés sur de longues distances avec les futurs répéteurs quantiques.

La distribution de clés quantique, *Quantum Key Distribution* (QKD), assure la confidentialité absolue des clés transmises car le niveau de sécurité est garanti par le principe physique. Elle est étudiée depuis de nombreuses années : ses performances et sa fiabilité sont croissantes. Elle est ainsi devenue une technologie à très haut niveau de maturité. C'est l'emploi de photons uniques qui garantit que leur détection et leur copie par un tiers malveillant, soient impossibles, au vu des lois de la physique quantique, sans que le destinataire ait connaissance de cette interception.

Mais pour que les industriels puissent intégrer cette technologie, il sera nécessaire qu'elle soit rentable et présente de véritables garanties de sécurité à long terme.

Depuis le 5 juillet 2021, l'équipe Quantum@UCA pilotée par Sébastien Tanzilli (INPHYNI) a officiellement activé le lien quantique, sur une distance totale de 50 km, entre les trois nœuds localisés à l'Institut de Physique de Nice (INPHYNI) (campus Valrose), au bâtiment Premium de la Métropole NCA (campus Plaine du Var) et à l'INRIA (campus SophiaTech). Ce lien permet de tester sur le terrain les protocoles de cryptographie quantique haut débit élaborés à l'INPHYNI. **C'est une première en France hors laboratoire.** [Source : [En partenariat avec Orange, Université Côte d'Azur \(UCA\) déploie un premier réseau quantique expérimental en France](#), UCA, 15 sept. 2021].

Pour assurer la sécurité des futures communications, l'Université Côte d'Azur engage la carte de la photonique quantique avec le projet Quantum@Université Côte d'Azur. Ce choix stratégique de l'UCA et son Initiative d'Excellence (Idex) UCA^{JEDI} est mené au travers de son partenariat avec Orange en matière d'enjeux opérationnels et de recherche.



Parmi les nombreux travaux d'expérience, ceux réalisés par des chercheurs de [Télécom Paris-LTCI](#) - Institut Polytechnique de Paris, du [Quantum Communications Hub](#) de l'Université d'York et de CAS Quantum Network Co. de Shanghai ont été récemment publiés dans [Nature Scientific Reports](#). Ils mettent en évidence l'intérêt de combiner des considérations théoriques de sécurité avec une évaluation expérimentale de la vulnérabilité de CV-QKD (distribution quantique de clé à variable continue) contre les attaques par saturation, pour deux stratégies d'attaque différentes. L'objectif est la conception et l'ingénierie de systèmes QKD pratiques vers les normes de sécurité les plus élevées possibles. [Source : [Telecom Paris](#), juillet 2021].

A ce stade des travaux de recherche, la QKD permettra d'obtenir des hauts niveaux de sécurité pour des applications ciblées, en complémentarité avec les outils de la cryptographie classique. Le déploiement récent de réseaux à base de QKD a eu lieu au Royaume-Uni, au Japon, en Corée et à grande échelle, en Chine. Cependant, la création de répéteurs quantiques sera indispensable pour chiffrer les réseaux de bout en bout, sur de grandes distances. Cela peut donner naissance à une première ébauche d'un internet quantique.

Si sur un plan théorique, les communications quantiques se révèlent invulnérables aux attaques sur la base des principes de la physique quantique, il sera indispensable d'identifier et de corriger les opportunités de vulnérabilité que les réalisations concrètes ne manqueront pas de présenter.

- La deuxième tendance est la [cryptographie post-quantique](#), basée sur les nouveaux concepts mathématiques pour chiffrer les protocoles de communication. Ces nouveaux algorithmes ne font pas appel à des phénomènes quantiques mais ils sont fondés sur des problèmes mathématiques parmi les plus difficiles à résoudre, même pour un ordinateur quantique. Ils sont développés pour contrer les attaques des ordinateurs quantiques et assurer ainsi la protection des données stockées civiles ou militaires. Par exemple, le protocole d'échange de clefs, *Supersingular Isogeny Diffie-Hellman (SIDH)* repose sur la difficulté de trouver des chemins dans de très grands graphes d'isogénies entre courbes elliptiques supersingulières.

KETS Quantum Security, basée à Bristol, et la start-up française *CryptoNext Security* (issue de l'Inria et de Sorbonne Université), basée à Paris, ont annoncé leur partenariat pour développer des solutions complètes intégrées de sécurité quantique, en combinant les dispositifs matériels photoniques intégrés de KETS et les solutions de cryptographie résistantes aux machines quantiques de CryptoNext Security.

La [cryptographie sur réseaux euclidiens ou sur des treillis](#), consiste à trouver les plus courts vecteurs entre deux points sur une grille dans un espace à plusieurs centaines de dimensions. Cette technique est opérationnelle aussi bien sur le chiffrement que sur les signatures. Elle pourra être appliquée à l'authentification anonyme et à la confidentialité dans le cas de vote électronique, par exemple. De tels algorithmes sont conçus pour cacher des données à l'intérieur même de problèmes mathématiques complexes. Les structures algébriques ainsi insérées seraient très difficiles à résoudre, même pour des ordinateurs quantiques puissants. *Par exemple, voir les travaux de [Mélissa Rossi](#) (2020).*

La [cryptographie multivariée](#) a un objectif particulier : la construction de primitives cryptographiques robustes reposant sur la difficulté de trouver une racine commune d'un ensemble de polynômes non-linéaires en plusieurs variables. Ce problème connu, NP-complet, appelé PoSSo, ne voit pas sa difficulté remise en cause, *a priori*, par la puissance des ordinateurs quantiques à venir. Le temps de calcul ne serait pas possible dans un temps estimé raisonnable.

La [cryptographie utilisant les codes correcteurs d'erreurs](#) permet d'attester, selon les erreurs détectées connues donc du seul expéditeur, que l'expéditeur d'un message est bien celui qu'il prétend être et que le message n'a pas été transformé en cours de route. C'est la **première signature à base de codes correcteurs d'erreurs capable de résister à l'ordinateur quantique**. *Par exemple, voir les travaux de [Thomas Debris-Alazard](#) (2019).*

Quelques mots sur le [chiffrement homomorphe](#) : il permet l'exécution de diverses opérations sur les données claires à partir des chiffrés. Par exemple, il est possible de faire des statistiques sur les données de dossiers médicaux tout en conservant la confidentialité des patients.

Une équipe de l'Inria travaillant sur la cryptographie symétrique post quantique, propose une solution moins gourmande en énergie, plus rapide et plus adaptable. Il s'agit de [l'algorithme Saturnin](#), conçu pour protéger des objets connectés (IoT) et des smartphones des attaques quantiques. Sa structure est proche de celle de l'AES et sa sécurité en tire largement parti.

[Thales](#) dispose de l'un des principaux laboratoires de cryptographie industrielle en France. L'un de ses algorithmes, [le Falcon](#), a été sélectionné par le *National Institute of Standards and Technology (NIST)* qui est l'organisme

américain de standardisation des technologies, en vue de définir les standards de la cryptographie de nouvelle génération. C'est en 2022 que le NIST fera son choix définitif entre le Falcon et un concurrent américain. Le Falcon supporte les dernières normes de l'Institut européen des normes de télécommunication ([ETSI](#)). Thales et son partenaire, la société australienne [Senetas](#), spécialisée dans la cybersécurité, sont en cours de commercialisation d'un boîtier de chiffrement conçu pour déjouer des attaques conventionnelles ou non, permettant l'échange de données à très haut débit (jusqu'à 100 Gbit/s).

La propagation du signal quantique sur de longues distances nécessite l'utilisation de mémoires capables de stocker l'information quantique portée par la lumière. L'utilisation de terres rares comme l'[europium](#) ou le [praséodyme](#), a été testée mais la vitesse des mémoires n'étaient pas assez élevées. Aussi des chercheurs de l'Université de Genève (UNIGE), en collaboration avec le CNRS/Chimie ParisTech, ont découvert un nouveau matériau dans lequel un élément, l'[ytterbium](#), était capable de stocker, de protéger l'information quantique, et de fonctionner à des fréquences élevées. Cela permet ainsi de réaliser rapidement les transitions d'un répéteur à l'autre, tout en gardant le photon le plus longtemps possible pour effectuer la synchronisation nécessaire.

Source : [L'ytterbium, la mémoire quantique de demain](#), posté par P. Thouverez, Tech. Ing. 20 août 2018 ; [communiqué](#) Université de Genève, 24 juillet 2018

LES CLOUDS QUANTIQUES

Étant donnée la complexité de la conception, de la construction, des coûts de fonctionnement d'un ordinateur quantique, ce sont les laboratoires de recherche qui hébergent principalement de telles machines, à ce jour. Afin de permettre aux utilisateurs (scientifiques, chercheurs, développeurs, commerciaux, etc.) d'avoir accès à de tels dispositifs pour expérimenter l'utilisation de la technologie quantique, élaborer de nouveaux algorithmes, développer leurs travaux de recherche, les grands fournisseurs de services publics d'informatique en cloud, comme les sociétés de développement de solutions quantiques initient des services commerciaux basés sur des simulateurs quantiques fonctionnant sur des ordinateurs classiques et de véritables ordinateurs quantiques. Les secteurs visés sont le *machine learning*, l'industrie pharmaceutique, la chimie, la finance, etc.

Pour rappel, IBM a été le premier à avoir proposé, en 2016, un service d'ordinateurs quantiques ([IBM Q Systems](#)) dans le cloud. Un ensemble structuré de logiciels, [Qiskit](#), accompagne le développement d'applications quantiques en fournissant l'ensemble des outils nécessaires au fonctionnement des systèmes et simulateurs quantiques. Il est ainsi possible de concevoir un circuit quantique, d'en visualiser le code associé, de tester des algorithmes quantiques, etc. Ainsi IBM a été le premier à proposer cette offre de *Quantum Computing-as-a-Service* (QCaaS).

C'est en partenariat avec l'Académie chinoise des sciences qu'[Alibaba Cloud](#) a été lancé dès mars 2018. L'environnement complet ([Quantum Computing Cloud Platform](#)) est disponible pour permettre aux utilisateurs de se familiariser avec la technologie quantique et son utilisation.

Fin 2019, [Amazon Web Services](#) (AWS) propose le service Amazon Braket d'environnement de développement (basé sur la plateforme SageMaker d'Amazon, spécialisé dans l'apprentissage automatique *Machine Learning*) 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 piégés ([IonQ](#)), machines à recuit quantiques ([D-Wave](#)), machines à qubit supraconducteur universel ([Rigetti](#)).

Microsoft a annoncé l'ouverture d'[Azure Quantum](#) défini comme le premier écosystème ouvert de cloud public complet au monde pour les solutions quantiques. Cette plateforme de QCaaS est issue de partenariats avec Honeywell et Toshiba, ainsi qu'avec les start-up spécialisées IonQ, QCI et 1QBit. Elle donne accès à divers logiciels, matériels et solutions quantiques s'exécutant sur des ressources de calcul classiques et accélérées (solutions d'optimisation), plus particulièrement dans les domaines de l'énergie, des services financiers, du transport et de la logistique.

En ce qui concerne Google, il ne propose pas d'offre de QCaaS bien qu'ayant déposé un brevet (n° US20170223094A1) sur ce thème en 2016. Il a développé Quantum Computing Playground (sous navigateur Chrome). Cet environnement de programmation permet de simuler efficacement des registres quantiques jusqu'à 22 qubits, d'exécuter les algorithmes de Grover et de Shor, avec des fonctions de débogage et de visualisation de l'état quantique en 3D.

L'externalisation (hébergement et traitement de données, échanges, etc.) dans des clouds, entraîne pour l'utilisateur, une maîtrise des opérations, limitée et essentiellement d'ordre contractuel. D'un point de vue technologique, les données sont délocalisées et relocalisables par l'hébergeur dans un souci d'optimisation et de rationalisation. Ce dernier a les compétences nécessaires pour mettre à niveau les infrastructures et les sécuriser dans les meilleures conditions (confidentialité, continuité, suivi de qualité de service, etc.). Les conséquences juridiques sont susceptibles d'être conséquentes : suivant les conditions contractuelles, l'utilisateur peut se trouver, par exemple, empêché d'effectuer la migration désirée de ses données vers un autre prestataire. Les conséquences économiques, financières et sociétales peuvent être réelles comme le risque de captation par des entités hostiles à cause de législations différentes des nôtres et de l'exigence de gouvernements pour obtenir un accès total aux données.

Ainsi le *Cloud Act* aux États-Unis a des dispositions permettant au gouvernement américain d'accéder aux données sur les serveurs, quelle que soit leur localisation.

De même, la Chine a déjà adopté de telles lois sur la protection des données, pour le secteur privé : il est interdit aux fournisseurs de services en ligne de collecter et vendre les informations personnelles des utilisateurs. Les entreprises doivent surveiller et sauvegarder leurs données localement et toute publication d'information via des applications de messagerie ou sur les réseaux sociaux, devrait, au préalable, faire une demande auprès des autorités.



Source : Ch. Gilguy, [Le Cloud, nouveau terrain d'une guerre internationale sans merci](#), tribune de M. Beaugier, [le Moci](#), 2021

Selon [X. Vasques](#), *IBM Technology 2021*, le centre de données de demain sera un centre de données composé de systèmes hétérogènes localisés au plus près des données. La conception de tels systèmes sera issue de l'informatique binaire, d'inspiration biologique et quantique. Les infrastructures d'un cloud hybride seront fonctionnelles avec une couche de sécurité et d'automatisation intelligente leur assurant une utilisation par divers publics pour le stockage, le traitement, les échanges.

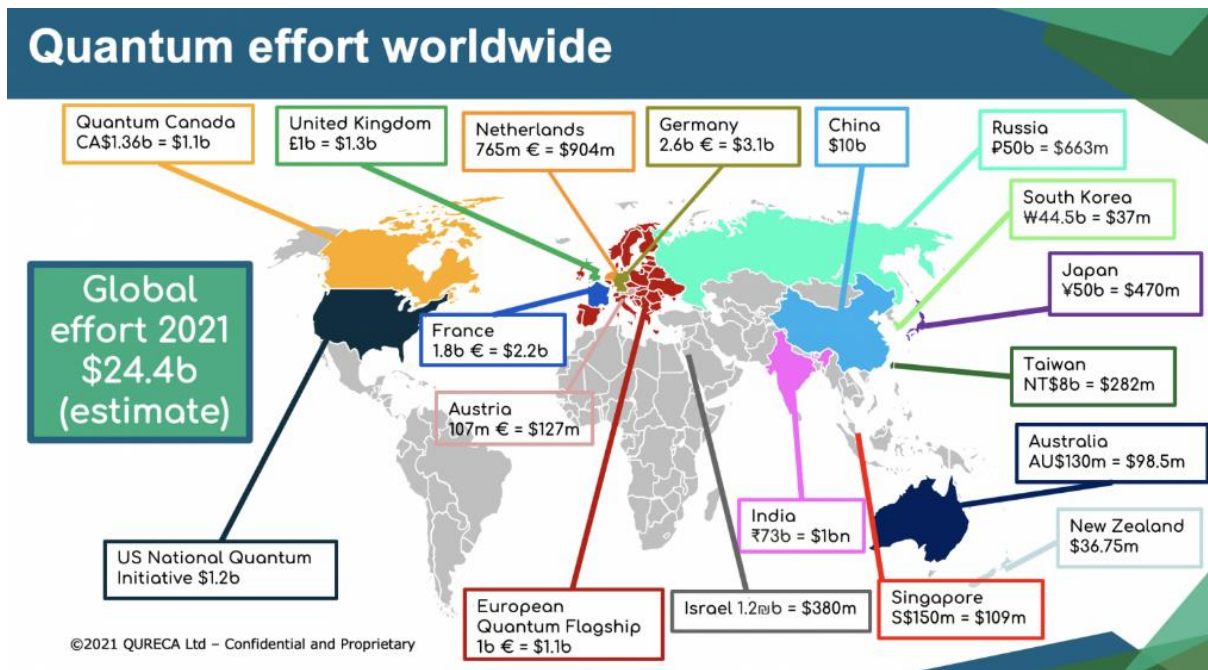
Sources :

- [Comprendre les grands principes de la cryptologie et du chiffrement](#), CNIL, 25 octobre 2016
- [Etude prospective à l'horizon 2030 : impacts des transformations et ruptures technologiques sur notre environnement stratégique et de sécurité](#), ChoCs futurs, avril 2017
- E. Diamanti, [Progrès et défis pour la cryptographie quantique](#), Dossier Technologies quantiques et dispositifs, Photoniques 91, p.33-37, mai 2018. License [CC BY 4.0](#)
- V. Mavroidis, K. Vishi, M. D. Zych, A. Jøsang, [The Impact of Quantum Computing on Present Cryptography](#), International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), vol.9, n°3, p.405-414, 2018
- S. Gavois, [Comment IBM voit l'avenir de l'informatique dans cinq ans](#), Think 2018, 22 mars 2018
- A. Ortu, A. Tiranov, S. Welinski, F. Fröwis, N. Gisin, A. Ferrier, Ph. Goldner, M. Afzelius. [Simultaneous coherence enhancement of optical and microwave transitions in solid-state electronic spins](#), *Nature Materials*, 23 juillet 2018.
- [Technologies quantiques](#), CCRRDT Région OCCITANIE, 28 mars 2019
- J.-P. Damiano, [Les enjeux de la recherche et l'intelligence économique et stratégique](#), Tech. Ing. 2019
- Th. Debris-Alazard, [Cryptographie fondée sur les codes : nouvelles approches pour construction et preuves ; contribution en cryptanalyse](#). Thèse de doctorat, Sorbonne Université, UPMC University of Paris 6, 17 décembre 2019
- [Faire de la France une économie de rupture technologique. Soutenir les marchés émergents à forts enjeux de compétitivité](#). Le collège d'experts. Rapport aux Ministre de l'Économie et des Finances et Ministre de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, 6 février 2020
- D. Desjardins, [Les enjeux de la physique quantique et les ruptures à anticiper](#), e-RDN 2020 : chocs stratégiques, Regards du Centre des hautes études militaires (CHEM), 69^{ème} session, 2020, p.219-234
- [Second Round of the NIST Post-Quantum Cryptography Standardization Process](#), NISTIR 8309, status report, CSRC, NIST, July 2020
- [Informatique quantique : pourquoi la cybersécurité doit s'y préparer dès aujourd'hui](#), LeMagIT, août 2020
- M. Kürek, [Technologies quantiques vers la seconde révolution](#), Project Quantum Ecosystem & Technologies, septembre 2020
- O. Ezratty, [Comment la France peut réussir dans le quantique](#), Revue de l'association Telecom Paris Alumni #197, juillet 2020 ; [Comprendre l'informatique quantique](#), 3^{ème} éd. septembre 2020
- M. Rossi. [Extended Security of Lattice-Based Cryptography](#). *Sécurité étendue de la cryptographie fondée sur les réseaux euclidiens*, Thèse de doctorat, Sciences Mathématiques de Paris Centre, 10 sept. 2020
- [Une réforme Post-Quantique](#), Binaire, Le Monde.fr, 16 octobre 2020
- R. Kumar, F. Mazzoncini, H. Qin, R. Alléaume, [Experimental vulnerability analysis of QKD based on attack ratings](#), *Nature Scientific Reports*, décembre 2020
- Ph., Richard, [Dans la course à l'informatique quantique, l'Europe risque de prendre trop de retard](#), Tech.Ing., Informatique et Numérique, 5 janvier 2021
- A. Schrottenloher, [Quantum Algorithms for Cryptanalysis and Quantum-safe Symmetric Cryptography](#), thèse de doctorat, Inria, École doctorale Informatique, télécommunications et électronique, Paris, 8 février 2021
- X. Biseul, [Comparatif des clouds quantiques : IBM le pionnier, Microsoft le pragmatique](#), ZdNet, 12 avril 2021
- [Zoom sur : la cryptographie post-quantique](#), INRIA, 14 avril 2021
- [Vers une cryptographie post-quantique](#), CNRS Le Journal, 19 avril 2021
- Ch. Gilguy, [Le Cloud, nouveau terrain d'une guerre internationale sans merci](#), tribune de Michel Beaugier, [le Moci](#), juillet 2021
- [Sécurité des données : une signature postquantique qui tient bon !](#) Inria, 2 mars - mis à jour 27 juillet 2021
- Rédaction Revue Télécom, [La cryptographie quantique expérimentale en ordre de bataille : déjouons d'abord les attaques les plus simples](#), Revue de l'association Telecom Paris Alumni #201, 2 août 2021
- D. Leprince-Ringuet, [Tout comprendre à l'informatique quantique](#), ZdNet, 24 sept. 2019, mis à jour 16 septembre 2021

4.3 LES INVESTISSEMENTS ET LES ÉCOSYSTÈMES

Les **investissements** accompagnent les défis technologiques, les enjeux économiques et stratégiques liés au développement des recherches et des réalisations quantiques. Des sommes importantes, d'un montant de quelques dizaines de millions à plusieurs milliards d'euros, sont engagées dans le cadre de programmes ou de plans (États-Unis, Canada, Union européenne, Russie, Inde, Chine, Corée du Sud, Japon, etc.) initiant des partenariats et des collaborations public-privé, avec de plus en plus de start-up. Bien évidemment, les géants du numérique comme les GAFAM (Google, Apple, Facebook, Amazon et Microsoft), Alibaba et bien d'autres y consacrent des budgets conséquents.

Les concepts de la physique quantique et ses applications concernent une communauté de chercheurs qui nécessite de véritables filières d'enseignement de physique quantique et des formations aux technologies quantiques (écoles d'ingénieurs, universités, collèges, lycées, etc.) : c'est une condition *sine qua non* de la réussite des projets nationaux et internationaux.



Investissements dans le Monde selon [QURECA Ltd](#), juillet 2021

Rappelons qu'un écosystème 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 l'enseignement, de la formation, des plateformes technologiques et du soutien à l'innovation. Dans un tel dispositif, les universités, les écoles d'ingénieur savent organiser la circulation des savoirs, des personnes, développer leurs compétences à travers les réseaux nationaux et internationaux de recherche et de métiers, publics et privés. Suivant leur taille et leur capacité financière, les entreprises seules n'ont pas toujours les ressources de recherche et de développement nécessaires pour innover. La mise en commun des compétences et du savoir-faire entre des entreprises concurrentes (coopétition) et le monde de la recherche au sein d'alliances, de partenariats ou de réseaux, apporte des solutions viables, comme cela est déjà le cas dans le domaine des véhicules autonomes avec le développement des connaissances et de la recherche en intelligence artificielle et en robotique.

En Chine

Pour devenir la première puissance du monde en 2049, la Chine a fait de la recherche quantique une priorité stratégique nationale et investit près de 10 milliards de dollars. Ce sont les domaines de la communication (distribution quantique de clés de chiffrement), de la détection (capteurs, radar quantique, etc.) et du calcul quantique (prototype d'ordinateur quantique constitué de composants exclusivement chinois) qui font l'objet d'expérimentations de grande ampleur sur Terre et dans l'espace. L'objectif en 2030 sera de disposer d'un réseau mondial de communication quantique à des fins civiles et militaires, posant ainsi les bases d'un internet quantique chinois.

Des chercheurs de l'Université chinoise USTC (*University of Science and Technology of China*), de l'Académie chinoise des sciences et du Centre de microsatellite de Shanghai ont conçu et lancé le 16 août 2016, le satellite Micius - QSS (*Quantum Science Satellite*) - dont les objectifs étaient l'expérimentation de la distribution quantique de clés à grande vitesse entre l'espace et le sol, et la faisabilité technique d'un réseau de communication à longue distance et la réalisation d'expériences sur l'intrication quantique et la téléportation quantique. Ce satellite a permis à un système de laser et de cristal d'envoyer six millions de paires de photons intriqués par seconde : une paire est parvenue au sol, un photon au récepteur de la ville de Delingha, l'autre à Lijiang, distants de 1203 km. Les grandes entreprises Baidu, Huawei Technologies et Alibaba participent massivement à ces travaux de recherche. Par exemple, en 2015, Alibaba s'est associé à l'Académie chinoise des sciences pour former le [Alibaba Quantum Computing Laboratory](#) pour mener

des recherches sur les meilleures techniques afin de réaliser des applications pratiques en informatique quantique. Plus récemment, Alibaba a mis en ligne des services de cloud quantique.

En ce qui concerne le calcul quantique, il est [rapporté](#) que les chercheurs de l'équipe dirigée par le physicien quantique chinois Pan Jianwei (*University of Science and Technology of China* - USTC) ont construit deux ordinateurs quantiques les plus rapides utilisant la supraconductivité pour Zuchongzhi 2 (machine programmable de 66 qubits) et la photonique pour le supercalculateur Jiuzhang 2. Cependant, ces deux ordinateurs évoluent dans des environnements fragiles pour des tâches très précises et font encore beaucoup d'erreurs. Dans la course à la suprématie quantique (avantage quantique), les grandes puissances États-Unis et Chine se concurrencent vivement.

Selon [Intelligence Online](#), la société Tianheng Quantum, dirigé par un ancien de l'Armée populaire de libération, cherche dans un premier temps à positionner ses offres civiles basées sur les technologies quantiques. Celles-ci ont néanmoins des applications militaires, dans la surveillance et la localisation entre autres : les produits qui en sont issus sont donc à double usage civil et militaire.

En Russie

Depuis cinq ans environ, la Russie a établi [ses priorités scientifiques](#) et investi en conséquence pour qu'elle devienne l'une des cinq plus grandes puissances scientifiques mondiales. Parallèlement au [laboratoire Gamaleya](#) qui est à l'origine du vaccin Spoutnik V, la Russie veut être leader dans d'autres domaines comme ceux du quantique, de l'IA ou de la voiture autonome.

Le [Skolkovo](#) Institute of Science and Technology ([Skoltech](#)) de Moscou regroupe des professeurs de renommée mondiale, alliant compétences scientifiques et entrepreneuriales, sur un campus unique. Par exemple, dans le domaine du calcul quantique, ils ont mis au point un algorithme *variational quantum eigensolver*, reposant sur les propriétés spécifiques des ordinateurs quantiques, en vue de créer une description quantique des positions de départ pour tous les objets / forces interagissant entre eux.

[Le bulletin de Science et technologie](#) (août 2018) mentionne que la Russie compterait quatre laboratoires quantiques de niveau international. Le laboratoire des systèmes quantiques artificiels (*The Moscow Institute of Physics and Technology* - [MIPT](#)) a annoncé avoir créé le premier circuit intégré basé sur cinq qubits supraconducteurs dont le développement permettra l'élaboration de simulateurs quantiques du comportement des systèmes naturels. Sont aussi cités le laboratoire des méta-matériaux supraconducteurs de l'Université nationale des sciences et technologies (*The National University of Science and Technology* - [MISIS](#)), le laboratoire du Centre quantique russe ([Russian Quantum Center](#), Skolkovo) et le laboratoire quantique de [l'Université technique d'Etat de Novossibirsk](#).

Au Canada

Le gouvernement a mis en place une [large consultation publique](#) pour définir et ajuster au mieux la stratégie nationale : coordonner et mobiliser les résultats de leur excellence scientifique. Tous les secteurs (universitaire, industrie et gouvernement) collaborent. À ce jour, l'investissement est de plus d'un milliard de dollars dans la recherche et le développement de l'informatique quantique. Notons que des provinces comme le Québec, l'Ontario, la Colombie-Britannique et l'Alberta ont fait des investissements précoces dans les organismes de recherche quantique pendant que la technologie progresse vers l'application.

Le gouvernement a investi dans le secteur des technologies quantiques au [Québec](#), sur une période de 7 ans (2019-2026). Ce sont plus de 60 compagnies qui y participent. Il y a environ 45 acteurs de soutien, institutions et investisseurs et 30 000 étudiants universitaires inscrits dans des programmes en lien avec les technologies quantiques. [L'Université de Sherbrooke](#), avec [l'Institut quantique](#) et les jeunes entreprises [SB Quantum](#) (magnétomètre quantique), [Nord Quantique](#), Qubic Inc. ont vu leurs projets retenus et obtenu un financement pour les aider dans leur développement.

A l'OTAN

Récemment l'Organisation du traité de l'Atlantique nord ([OTAN](#)) a lancé un accélérateur d'innovation nommé DIANA (*Defence Innovation Accelerator for the North Atlantic*), réseau de centres d'essais et d'accélérateurs technologiques concernant le secteur de la défense ainsi qu'un fonds à destination des start-up (au total un financement d'un milliard d'euros). [Les technologies émergentes et disruptives](#) concernent directement la défense et la sécurité - intelligence artificielle, systèmes d'armes autonomes, *big data*, biotechnologies, technologies quantiques. L'Alliance collabore avec des partenaires du secteur public, du secteur privé, du monde universitaire et de la société civile.

Étant données leurs incidences potentielles sur la défense et la sécurité, l'OTAN a placé les technologies quantiques sur sa liste de technologies émergentes et de technologies de rupture essentielles.

En Europe

En 2018, l'Union Européenne (UE) a lancé un [Quantum Technologies Flagship](#) (1 Md€) finançant déjà une vingtaine de projets. Il a pour objectif de :

- Consolider et étendre le leadership scientifique européen et l'excellence dans la recherche quantique, y compris la formation de compétences pertinentes ;
- Lancer une industrie européenne compétitive dans les technologies quantiques pour positionner l'Europe en tant que leader dans le futur paysage industriel mondial ;

- Faire de l'Europe une région dynamique et attractive pour la recherche, les affaires et les investissements innovants, accélérant ainsi leur développement et leur adoption par le marché.

Pour que l'Europe soit à la pointe de la recherche, de l'innovation et du développement des technologies quantiques, un Consortium européen de l'industrie quantique, The *European Quantum Industry Consortium* ([QuIC](#)), a tenu sa première assemblée générale en avril 2021 avec un rassemblement de 100 membres de tous les secteurs de l'industrie quantique ayant leur siège en Europe, représentant des PME, des grandes entreprises, des investisseurs, des organismes de recherche, des institutions universitaires et d'autres associations industrielles.

[QuantERA](#) est un programme de cofinancement du réseau européen de la recherche, *European Research Area Network* ([ERA-NET](#)). Il se définit comme un réseau interdépendant d'organismes de financement de la recherche sur 31 pays. Grâce à la coordination des programmes nationaux et régionaux de financement de la recherche, QuantERA évite le problème de la fragmentation des efforts nationaux, en encourageant les collaborations transnationales et en tirant parti de l'avantage concurrentiel de l'Europe.

En Allemagne

En janvier 2021, l'État de Bavière a lancé [Munich Quantum Valley](#) qui est un projet collectif regroupant plusieurs instituts de recherche bavarois : [Université technique de Munich \(TUM\)](#), [Université Ludwig-Maximilian de Munich](#), [Académie bavaroise des sciences](#), [Institut Fraunhofer](#), [Institut Max Planck](#). Ces travaux de recherche sont financés par l'État bavarois (300 millions d'euros). Un autre financement de 2 milliards d'euros, dans le cadre du plan stratégique [Zukunftspakets für das Innovationsland Deutschland](#), contribue à faire de Munich l'un des sites leaders en technologie quantique à l'échelle internationale, dans la décennie à venir.

Compte-tenu des sommes investies, particulièrement dans les secteurs des technologies quantiques et de l'espace, l'Allemagne, entre autres pays, a une approche plus coopérative. Elle est plus favorable à développer des collaborations et partenariats avec des pays non-UE comme la Suisse par exemple.

Aux Pays-Bas

En août 2021, la France et les Pays-Bas ont signé un [accord bilatéral](#) pour coopérer sur le développement des technologies quantiques en vue de la conception d'un ordinateur quantique universel. Selon l'[Usine digitale](#), les propos du Secrétaire d'État chargé de la Transition numérique et des Communications électroniques, Cédric O, sont ainsi rapportés : "le gouvernement français souhaite consolider une coopération bilatérale de longue date dans la recherche académique et accélérer les synergies privées qui permettront de poser les bases de licornes européennes du quantique, notamment dans l'ordinateur quantique universel". Il s'agira, entre autres objectifs, d'attirer les meilleurs talents internationaux, afin de contribuer activement à la transition énergétique, à la décarbonation de l'industrie chimique, à la conception de médicaments, à la cyber sécurité, etc.

En Suisse

La participation d'États tiers (Suisse, Royaume-Uni, Israël, etc.) à des secteurs stratégiques d'Horizon Europe, est remise en cause. Selon les propos relatés par [Le Temps](#) (8 juin 2021), cela concerne les subventions à allouer entre 2021 et 2027 sous forme de bourses scientifiques, d'importants crédits de recherche européens des *flagships* comme le [Quantum Flagship](#) dédié aux technologies quantiques dans lequel la Suisse est déjà très impliquée depuis 2018 : deux projets [QRange](#) (nouveaux générateurs quantiques de nombres aléatoires) et [macQsimal](#) (capteurs quantiques miniaturisés destinés à des applications industrielles) qui sont pilotés respectivement par l'[Université de Genève](#) et le Centre suisse d'électronique et de micro-technique ([CSEM](#)) à Neuchâtel.

Selon le média spécialisé en politique scientifique, [Science Business](#), Bruxelles pourrait finalement laisser la porte ouverte aux États tiers désirant participer aux projets relevant des domaines de l'aérospatiale ou des technologies quantiques.

En France

Forte 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. Elle compte [Dassault Systèmes](#), (du Groupe Dassault qui compte, entre autres entités, [Dassault Aviation](#)) entreprise européenne scientifique innovante, leader mondial des logiciels de conception par ordinateur, [Atos](#) fabricant reconnu de supercalculateurs et de fournisseurs quantiques, [STMicroelectronics](#), fabricant franco-italien de puces électroniques (l'un des cinq plus gros fournisseurs mondiaux en semi-conducteurs), [SOITEC](#), leader mondial des matériaux semi-conducteurs innovants, le [CEA-Leti](#) constituant une filière de premier plan mondial en microélectronique, [Thales](#), leader mondial des hautes technologies – le numérique, le big data, l'intelligence artificielle, la cybersécurité, le quantique, etc. avec un écosystème émergent compétent de start-up dont [Pasqal](#), [Quandela](#), [Alice&Bob](#), [Muquans](#), etc.

Au regard des enjeux stratégiques et pour relever le défi d'avoir les moyens de se positionner parmi les meilleurs, le [Plan quantique français](#) a été initié le 21 janvier 2021. Le plan reprend certaines propositions du rapport [Forteza](#). Il prévoit des actions en faveur de la recherche, de l'industrie et de la formation, financées par le programme d'investissements d'avenir (PIA) et le plan « France relance », à hauteur de 1,8 Md€ sur 5 ans :

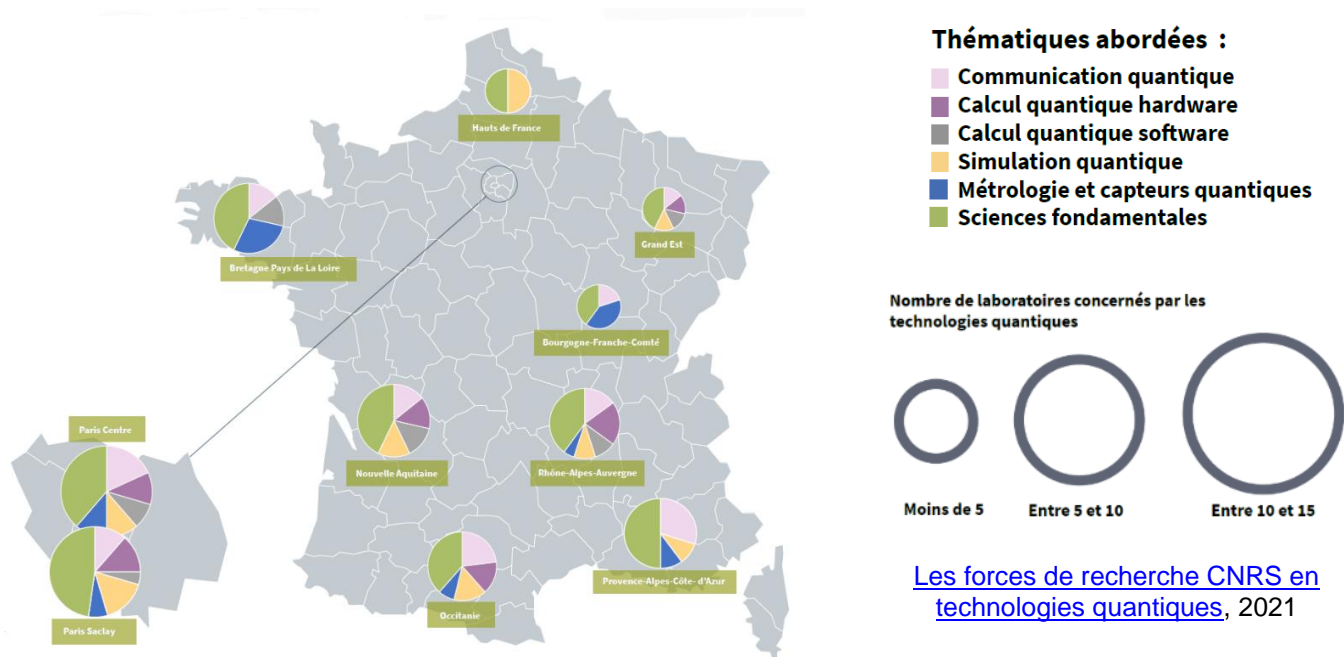
- Simulateurs et machines partiellement quantiques : 350 M€,
- Ordinateurs quantiques à part entière : 430 M€,

- Capteurs : 250 M€,
- Cryptographie post-quantique : 150 M€,
- Communications quantiques : 320 M€,
- Technologies annexes (cryogénie, etc.) : 300 M€.

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 (4^{ème} programme d'investissements, France Relance, France 2030, etc.), l'émergence d'un grand nombre de start-up adossées aux organismes de recherche et aux industriels sera un atout indéniable. Ainsi cette stratégie vise à enrichir et affirmer la position de la France sur le plan scientifique et technologique, mais aussi dans les chaînes de valeur industrielles et le développement du capital humain, afin de garantir et pérenniser notre indépendance dans ce domaine technologique qui façonnera le futur.

Selon la publication de *The Good Life* ([French Tech : pépites et licornes en ordre de marche](#), avril 2021), la France est dans le top 3 des pays en termes d'investissements dans ses start-up, derrière le Royaume-Uni et l'Allemagne. En 2020, elle a bénéficié de près de 5,2 milliards de dollars d'investissements contre 4,8 milliards en 2019. L'attractivité de la [French Tech](#) est réelle mais elle a un revers. Ces start-up sont financées ou rachetées, souvent par des acteurs américains, chinois ou coréens, entre autres. Le contexte inciterait à limiter ou à empêcher les rachats de start-up européennes par les géants du numérique.

[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, etc. Cela est rendu possible par la collaboration avec le milieu académique, industriel et les start-up.



Récemment, l'*European High Performance Computing Joint Undertaking* ([EuroHPC JU](#)), 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. Pasqal doit en livrer deux exemplaires d'ici 2023 au Grand équipement national de calcul intensif ([GENCI](#)) et au [centre de recherche allemand de Jülich](#) faisant partie du [Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren](#) (le plus grand organisme de recherche allemand). Et, le 8 juin, Pasqal vient de finaliser une levée de 25 millions d'euros, menée par le [Quantonation](#) et le nouveau Fonds Innovation Défense ([FID](#)) qui, lancé en décembre 2020 par l'Agence de l'Innovation de Défense ([AID](#)), est géré par Bpifrance. RunA Capital, Daphni et Eni Next ont également participé à ce tour de table, qui inclut un engagement du fonds de l'*European Innovation Council* ([EIC](#)).

Des grands pôles quantiques existent : Paris-Ile de France, Paris-Saclay, Grenoble (CEA, CNRS, INRIA), l'Institut quantique occitan, etc.

Le réseau francilien pour les Technologies Quantiques [SIRTEQ](#) (Sciences et Ingénierie en Région Île-de-France pour les TEchnologies Quantiques), labellisé Domaine d'intérêt majeur (DIM), est financé par la Région Île-de-France. Son objectif majeur est de promouvoir une recherche académique d'excellence prenant en compte les enjeux de société actuels et l'importance du transfert des savoirs et des technologies. Ainsi DIM SIRTEQ est constitué de 349 chercheurs et enseignants chercheurs, 270 doctorants, 109 post-doctorants, 106 équipes de recherche, 32 laboratoires, 5 communautés d'universités et établissements ([COMUE](#)) : [Paris Sciences et Lettres](#), [Sorbonne Université](#), [Université Paris Saclay](#), [Université Paris Seine](#), Université Sorbonne Paris Cité ([USPC](#)).

L'Université Paris-Saclay joue un rôle majeur dans tous les domaines stratégiques des technologies quantiques. Doté d'infrastructures de pointe et d'un savoir-faire unique en nanotechnologies et instrumentations ultimes, soutenu par le niveau d'excellence des chercheurs, le centre des sciences et technologies quantiques de l'Université Paris-Saclay, [Quantum](#), créé en 2019, rassemble plus de 80 équipes de recherche au sein de partenariat académie-industrie incluant des start-up très qualifiées. On peut y citer le [CNRS](#), le [CEA](#), l'[Inria](#), l'[ONERA](#), l'[Institut Polytechnique de Paris](#), l'[UVSQ](#), la [faculté des sciences d'Orsay](#), [Centrale Supélec](#), l'[école normale supérieure Paris-Saclay](#), l'[institut d'optique Graduate school](#). De grands groupes et industries, Thalès, Atos, EDF, Air Liquide, IBM, etc. affichent leur soutien. Quantum fait partie du réseau SIRTEQ.

La fédération de recherche CNRS, *Paris Centre for Quantum Computing* ([PCQC](#)), créée en 2014, évolue vers le hub quantique de Paris en agrégeant les savoir-faire des informaticiens, des physiciens théoriques et expérimentaux et des mathématiciens de Sorbonne Universités, de l'Université de Paris, du CNRS, de l'Inria et de l'[Université Paris Sciences et Lettres](#). Le PCQC travaille avec le *Quantum information center Sorbonne* ([QICS](#)) qui coordonne les efforts de recherche, d'enseignement et de sensibilisation au sein de l'Alliance Sorbonne Universités sur l'information quantique. De plus, le [Lab quantique](#), association parisienne promouvant les technologies quantiques avec des activités de formation et d'animation, est soutenue par le fonds français [Quantonation](#), [Bpifrance](#) et le programme [DeepTech Founders](#). Il devrait rejoindre la fédération de même que la Maison du quantique qui devrait héberger des industriels, des start-up et des scientifiques étrangers.

Début 2021, l'[Institut quantique occitan](#), a officiellement rejoint les pôles d'excellence dans les technologies quantiques, plus particulièrement les applications concernant les communications sécurisées, les capteurs et la métrologie, la simulation quantique. Il rassemble près de 200 chercheurs du CNRS, de l'Université de Montpellier, de l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, de l'INSA, et de l'ISAE-SUPAERO de Toulouse. Parmi ses objectifs, on peut citer la volonté d'établir des partenariats avec les grands industriels (*IBM à Montpellier ou Airbus, Thales et le CNES à Toulouse*) et la formation en ingénierie quantique.

Grenoble était déjà très connu pour le [GIANT](#) (*Grenoble Innovation for Advanced New Technologies*), **alliance de 8 partenaires** issus de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'industrie parmi lesquels 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](#)) sans oublier le [CEA](#) et le [CNRS](#). L'écosystème quantique grenoblois, [Quantum Engineering Grenoble](#), s'appuie sur un fort maillage industriel comprenant entre autres, Air Liquide qui amène ses compétences dans la cryogénie et STMicroelectronics dans la micro-électronique, avec l'[INRIA](#) et les laboratoires de recherche.

[Quantum@UCA](#) est une plate-forme expérimentale unique dédiée au déploiement de technologies de communication quantique, créée en 2019. Quantum @UCA bénéficie de l'implication de grandes entreprises comme Orange, Thales et Accenture. Sont également impliqués l'Observatoire de la Côte d'Azur, Sorbonne Université, l'Université Grenoble Alpes et le CNRS. Le partenaire principal est l'Institut de Physique de Nice, [Inphyni](#) (unité mixte de recherche sous tutelle de l'Université Côte d'Azur et du CNRS) qui expérimente une technologie de communication quantique cryptée permettant un niveau de sécurité inédit sur les échanges numériques.

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.

Selon une étude de marché publiée par [P&S Intelligence](#), le marché mondial de l'informatique quantique devrait atteindre 1,6 milliards d'euros de revenus d'ici 2030 avec un taux de croissance annuel composé (TCAC) d'environ 33% sur la période 2020 à 2030. Parmi les industriels qui comptent, on trouve notamment International Business Machines (IBM) Corporation, Telstra Corporation Limited, IonQ Inc., Silicon Quantum Computing, Huawei Investment & Holding Co. Ltd., Alphabet Inc., Rigetti & Co Inc., Microsoft Corporation, D-Wave Systems Inc., Zapata Computing Inc., Intel Corporation. Cette période 2020-2030 devrait voir émerger le [Quantum Cloud Computing](#) combinant les avantages des technologies quantiques et celles de l'intelligence artificielle (IA). Dans le même temps, celles relatives à l'apprentissage automatique pourraient être intégrées aux systèmes d'informatique quantique.

Les cabinets de conseil prestigieux [McKinsey](#), Boston Consulting Group ([BCG](#)) et [Bain & Company](#) (*Big Three*) ont élaboré plusieurs projections. Récemment, compte-tenu des retombées économiques de l'informatique quantique, le BCG a estimé une création de valeur allant jusqu'à 800 Mds \$ (environ 700 Mds €) dans les 15 à 30 prochaines années [Source : [UsineNouvelle](#), août 2021]. Le BCG conseille aux investisseurs de prendre le temps pour comprendre la technologie et connaître l'intégralité de l'écosystème, afin d'estimer au mieux les risques.

Les investissements sont souvent nécessaires pour atteindre les objectifs établis, cependant, il faut rester vigilants quant aux grands groupes IBM, Google, Microsoft entre autres. Sont-ils présents pour contribuer au développement du quantique en France ou pour favoriser l'adoption de leur technologie par les entreprises et les universités françaises ? [Source : [Décoder l'annonce de la stratégie quantique française](#), Opinions libres, O. Ezratty, 2021 ; [Les enjeux de la recherche et l'intelligence économique et stratégique](#), Tech. Ing., J.-P. Damiano, 2019].

Pour information, une **licorne** est une start-up non cotée en bourse valorisée à 1 milliard de dollars et plus. Dans le monde, il en existe environ 500 totalisant une valorisation de 1 000 milliards de dollars. Les licornes sont le plus souvent américaines (Uber, Airbnb, SpaceX, Juul Labs, etc.) et chinoises (Bytedance/TikTok, Didi Chuxing, Kuaisou, etc.). A ce jour il y a 16 licornes françaises dont BlablaCar (covoiturage), Ledger (cryptoactifs), OVHCloud, Sorare, Shift Technology (détection des fraudes à l'assurance grâce à l'IA), Voodoo.

Sophia Antipolis accueille une partie de la R&D de la licorne américaine Symphony (plateforme de collaboration sécurisée pour les marchés financiers).

[Réf. BusinessInsider](#)



Sources : en plus des liens présents dans le chapitre

- F. Le Roy, S. Yami S., G. Dagnino, [La coopération : une stratégie pour le XXI^{ème} siècle](#), in Yami S. et Le Roy F., (eds), Les stratégies de coopération : rivaliser et coopérer simultanément, De Boeck, Collection Méthodes et Recherches, Bruxelles 2010, p.17-28
- ChoCs futurs, [Etude prospective à l'horizon 2030 : impacts des transformations et ruptures technologiques sur notre environnement stratégique et de sécurité](#), avril 2017
- [Faire de la France une économie de rupture technologique. Soutenir les marchés émergents à forts enjeux de compétitivité](#). Le collège d'experts. Rapport aux Ministre de l'Économie et des Finances et Ministre de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, 6 février 2020
- [Informatique quantique](#), Cigref, février 2020
- D. Desjardins, [Les enjeux de la physique quantique et les ruptures à anticiper](#), Centre des hautes études militaires (CHEM), 2020, p.219-234
- O. Ezratty, [Comment la France peut réussir dans le quantique](#), Revue de l'association Telecom Paris Alumni #197, juillet 2020.
- [Un nouveau record se profile dans le financement par capital-risque des startups quantiques](#), M. Kürek, 8 septembre 2020
- M. Kürek, [Technologies quantiques vers la seconde révolution](#), Project Quantum Ecosystem & Technologies, septembre 2020
- [Comment fonctionne un ordinateur quantique ?](#) Inria, décembre 2020
- [Les acteurs de l'informatique quantique](#), Inria, décembre 2020
- [Les startups françaises parées pour la transition quantique](#), CNRS Le Journal, actualisée 12 janv. 2021
- [Stratégie nationale sur les technologies quantiques](#), Saclay 21 janvier 2021
- [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
- [Intelligence artificielle, blockchain et technologies quantiques au service de la finance de demain](#), Livre blanc, Finance Innovation, Pôle de compétitivité mondial, RB Edition, février 2021
- J.-P. Damiano, [Les technologies quantiques. Contexte et enjeux, applications et perspectives](#), avril 2021
- [Les entreprises fascinées par la révolution quantique](#), Le Monde.fr, 11 avril 2021
- [IDQ Quantum Computing Review](#) Q1 2021, 30 avril 2021
- [Le calcul et l'ordinateur quantiques](#), CEA, 18 mai 2021
- D. Dechaux, [La maîtrise du quantique, le Graal géopolitique mondial](#), Challenges, mai 2021
- [Fibre : Des chercheurs créent un réseau quantique "inviolable" sur des centaines de kilomètres](#), ZdNet, 11 juin 2021

4.4 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Devant l'instabilité de l'environnement géostratégique, les grandes puissances vont poursuivre le développement de technologies de défense et de sécurité dans lesquelles le quantique tient une place importante, en même temps que l'intelligence artificielle, la cryptographie, la blockchain, etc. dans les réseaux de communications, le déploiement de constellations de satellite, la robotisation du champ de bataille, etc. Dans cette compétition internationale, la maîtrise des technologies quantiques est donc perçue comme un enjeu majeur, pour leur souveraineté et une opportunité de développement économique et sociétal. Elles apportent de nouveaux moyens d'acquérir et de traiter l'information, la capacité de résoudre des problèmes de simulation complexes dans divers secteurs.

Les domaines stratégiques de l'industrie et de la recherche notamment devront faire l'objet d'une mobilisation de l'ensemble des services concernés de l'État. De même, le maintien d'une solide base industrielle et technologique de défense est une condition *sine qua non*.

Des États ont une avance certaine (États-Unis, Chine, etc.). Avec des investissements conséquents, ils mobilisent les organismes publics, les entreprises concernées en synergie avec les établissements d'enseignement supérieur et toutes les structures et réseaux s'y rattachant. D'autres États, des groupes organisés ou autres entités se donnent les capacités de récupérer toutes sortes de données supposées sensibles qu'ils seraient capables de déchiffrer dans le futur à l'aide de la puissance des ordinateurs quantiques. Les grands programmes de recherche, institutionnels, industriels, militaires s'élaborent de nombreuses années en amont de leur lancement. Il ne faut pas que ces données soient déchiffrées.

La décennie à venir verra la mise au point de machines quantiques dédiées à des tâches spécifiques. Elles ne remplaceront pas complètement les ordinateurs classiques. C'est une hybridation des deux types de machine qui devrait perdurer. Plus généralement, on peut penser que d'ici 10 ans, des systèmes hétérogènes comprenant de l'informatique d'origine diverse : binaire, d'inspiration biologique et quantique seront déployés par des clouds hybrides. Ces derniers seraient alors capables d'offrir de nombreux services sécurisés de stockage, de partage, d'échanges de systèmes et de données privés et publics en masquant la complexité des infrastructures et de leur fonctionnement.

D'un point de vue technologique, il s'agit aussi de pouvoir acquérir de nouvelles compétences en consolidant nos acquis scientifiques et techniques afin de se maintenir dans le peloton de tête des nations et d'obtenir des avantages concurrentiels dans les domaines applicatifs civils et militaires. Si des retards dans le déploiement devaient apparaître, ne pas maîtriser les technologies quantiques et celles habilitantes indissociables engendrerait à terme des risques insurmontables. Les solutions d'optimisation de la consommation énergétique des ordinateurs quantiques seront aussi un enjeu majeur et devront faire l'objet de recherches approfondies. La France doit poursuivre sa stratégie de cyberdéfense et de cybersécurité, continuer à soutenir l'innovation en y associant fortement les secteurs public et privé.

La recherche fondamentale et appliquée doit être poursuivie ainsi que le développement des écosystèmes. Cela dit, il est indispensable de consolider et/ou de créer de véritables filières d'enseignement de physique quantique et donc d'offrir aux étudiants des formations qualifiantes. Le manque de compétence serait un frein majeur pour le développement et la concrétisation des projets en cours nationaux et européens.

Selon l'entreprise américaine de conseil et de recherche [Gartner](#), des technologies sont à suivre : la NFT (*non-fungible token* ou certificat d'authenticité d'un objet numérique), la *machine learning* quantique (*technique IA pour apprendre à des machines à prendre des décisions efficaces via des algorithmes nourris par des exemples*), l'intelligence artificielle générative (*technologie IA permettant à l'industrie pharmaceutique de réduire les coûts et le temps de découverte des médicaments*), le chiffrement homomorphe et les applications et réseaux composables.

Sources :

- ChoCs futurs, [Etude prospective à l'horizon 2030 : impacts des transformations et ruptures technologiques sur notre environnement stratégique et de sécurité](#), avril 2017
- M. Kürek, [Technologies quantiques vers la seconde révolution](#), Project Quantum Ecosystem & Technologies, septembre 2020
- M. Le Bellac, [Peut-on parler de suprématie quantique ?](#) Reflets Phys. n°67, novembre 2020, p.4-8
- Ph., Richard, [Dans la course à l'informatique quantique, l'Europe risque de prendre trop de retard](#), Tech. Ing., Informatique et Numérique, 5 janvier 2021
- A. Auffèves, [Optimiser la consommation énergétique des calculateurs quantiques : un défi interdisciplinaire](#), Reflets de la Physique n° 69, février 2021, p.16-20

et aussi,

- [ANSSI](#) Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information
- [Atos](#)
- [CEA](#) Commissariat à l'Energie Atomique et aux énergies alternatives
- [CIGREF](#) Club informatique des grandes entreprises françaises
- [CNRS](#) Centre National de la Recherche Scientifique
- [Collège de France](#)
- [Commission Européenne](#)

- [DGA](#) Délégation Générale de l'Armement
- [ENS](#) École normale supérieure
- [EuroQCI](#) European Quantum Communication Infrastructure
- [Gartner Inc.](#)
- [HAL](#) (Archive ouverte pluridisciplinaire)
- [IBM](#)
- [Inria](#) Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique
- [NIST](#) National Institute of Standards and Technology
- [Quantonation](#) premier fonds d'investissement en Europe pour les technologies quantiques
- [Quantum technologies Flagship](#)
- [ResearchGate](#)
- [Techniques de l'ingénieur](#)
- [Thales](#)
- [Wikipedia](#)



Le thème « Inventer un avenir durable » valorise l'engagement des acteurs industriels et des partenaires de l'événement dans la transition écologique, numérique, l'économie circulaire et le *Fabriqué en France*.

C'est aussi l'occasion de :

- renforcer l'attractivité de l'industrie et de ses métiers ;
- sensibiliser les jeunes aux métiers de l'industrie et notamment à l'industrie du futur ;
- soutenir la mixité des métiers et la place des femmes dans l'industrie ;
- informer le grand public des besoins en recrutement de l'industrie ;
- promouvoir l'image d'une industrie moderne, innovante et écologique.

En soutien, [Techniques de l'Ingénieur](#) met en libre accès une sélection de ressources documentaires, durant cette semaine.

La [Semaine de l'industrie](#) est pilotée par le [ministère de l'Economie, des Finances et de la Relance](#) ([Direction générale des Entreprises](#)) et réseau des [DREETS](#)) avec l'appui de [France Industrie](#) et de ses fédérations.

Pour sa 4^{ème} édition, [l'Usine Extraordinaire](#) invite les jeunes à « une plongée inédite au cœur de l'industrie ! » à découvrir l'immense diversité des métiers. Cet événement digital est organisé par des industriels et des acteurs majeurs du monde de l'industrie.

La présidente d'Industries Méditerranée, Christine Baze : « *Notre objectif est de faire découvrir les métiers de l'entreprise pour donner envie aux jeunes et aux demandeurs d'emploi de se former ; de montrer que l'industrie innove, recrute, qu'elle est dynamique, numérique, inclusive et ouverte aussi bien aux filles qu'aux garçons.* »

Aujourd'hui les industries ont des forts besoins en compétences mais elles rencontrent des difficultés pour recruter : ce manque d'attractivité est lié à une méconnaissance des possibilités qu'offre le secteur.



L'événement prend cette année la forme d'une plateforme numérique 3D, accessible sur le site [uex2021.com](#). Elle modélise une « ville-usine extraordinaire ». Elle permet aux collégiens, lycéens et publics de vivre une expérience immersive de découverte (visites virtuelles, expériences, quiz, jeux en ligne, contenus intuitifs, etc.).



Cet ouvrage intitulé « [Face aux défis du XXI^e siècle](#) », produit par l'[IESF](#), synthétise les recommandations et propositions des ingénieurs et scientifiques de France. C'est le résultat d'une mobilisation forte avec plus d'une centaine de personnes ayant travaillé plusieurs mois sur les thèmes de l'éducation, de l'environnement, de l'ingénieur dans la cité, de l'industrie et la compétitivité, et de la formation des ingénieurs et scientifiques face aux nouveaux enjeux.

Autres publications du même auteur

- J.-P. Damiano, [Les technologies quantiques. Contexte et enjeux, applications et perspectives](#). IESF Côte d'Azur, Bull. n°2, p.8-29 (2021)
- 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. Eléments 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, [Les enjeux de la recherche et l'intelligence économique et stratégique](#), Tech. Ing., Oct. (2019)
- 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)

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

5. FÊTES DE LA SCIENCE



Pour la première fois, nous avons participé au « Village des Sciences » organisé à Villeneuve Loubet dans le cadre de la Fête Nationale de la Science. Cette manifestation s'est tenue au Pôle Culturel Auguste Escoffier, les 2 et 3 octobre derniers pour le grand public. La journée précédente était réservée aux visites des scolaires, écoles primaires et collèges.

IESF Côte d'Azur a tenu un stand pour présenter, sous forme de petite vidéo ludique, ce que pouvait être la diversité des métiers et des activités de l'ingénieur et du scientifique.

Nous y avons reçu près de 190 personnes, une quinzaine de petits groupes d'élèves encadrés par leurs professeurs, ainsi que des familles auxquelles nous apportons des informations adaptées.

Cette expérience est à renouveler l'année prochaine.



Cette sixième édition du Village des Sciences et de l'Innovation qui s'est tenue les samedi 16 et dimanche 17 octobre derniers au Palais des Congrès de Juan Les Pins, a une nouvelle fois été un succès avec près de 6000 visiteurs.

Cette découverte de la science, pour nos visiteurs de tous âges, se déclinait au travers de 40 stands et d'expériences ludiques, de causeries, de conférences, de films scientifiques avec débats, de présentations de grandes écoles, d'entreprises, de start-up, d'associations, ...

Pour cette sixième année, IESF Côte d'Azur tenait un stand tout en réalisant trois conférences sur les métiers de l'Ingénieur et du Scientifique, sur le thème « Ingénieur Demain ».

Près de 180 personnes (parents, ados, ...) ont été sensibilisées aux études d'ingénieurs et à la compréhension de la diversité des métiers de l'ingénieur et du scientifique.

Rendez-vous est pris pour le prochain Village des Sciences et de l'Innovation en octobre 2022 ...

Jean-Louis Droulin

Past président IESF Côte-d'Azur

6. VISITES À GRASSE LE 20 OCTOBRE 2021



Le 20 octobre 2021 notre association organisait 2 visites découvertes à Grasse. Nous nous sommes retrouvés 13 d'abord à l'Espace Jacques-Louis Lions, une ancienne usine de parfum réhabilitée et rénovée pour visiter la pépinière d'entreprise Innovagrasse. Nous avons été reçus par Mme Claire Belony qui nous a présenté la structure et tous les locaux.

Innovagrasse (<http://www.innovagrasse.fr/>). accueille, héberge et accompagne des start-up en phase de commercialisation ayant besoin d'accompagnement ; elles trouvent en pépinière le lieu idéal propice à leur développement : hébergement en bureaux privatifs, location de laboratoires et accompagnement personnalisé. InnovaGrasse porte un intérêt particulier (mais non exclusif) aux entreprises innovantes de la filière PASS (Parfums, Arômes, Senteurs, Saveurs) et activités connexes (Cosmétique, Bio technologies, Nutrition, Santé). Elle accompagne également tout type d'entreprise innovante (NTI, microélectronique, smartgrids...)

Puis nous avons repris nos voitures pour rejoindre le Parc d'activités ArômaGrasse où sont hébergées plus de 15 entreprises comme : Parfum Cosmetic World, TOMCOS, SelectArôme... en majorité de la filière PASS (Parfums, Arômes, Senteurs, Saveurs) et l'hôtel d'entreprise Grasse Biotech. Mr Frédéric SIMONNET le directeur de Grasse Biotech nous a expliqué la mission de cet hôtel d'entreprises et fait voir tous ses locaux (Salle de Réunion, Local de ventilation, local de stockage sécurisé, laboratoires, ...)

Grasse BIOTECH (<http://www.grassebiotech.fr/index.php/en>). est un Hôtel d'entreprises d'innovation et d'accompagnement de start-up de la filière des cosmétologies, des biotechnologies, de la santé, des sciences du vivant et des activités scientifiques de recherche et d'analyse du Pays de Grasse. Il bénéficie d'une valeur ajoutée liée à un environnement privilégié accélérateur de projets.

Dans un réseau déjà existant d'accompagnement à la création et à l'innovation, Innova Grasse et Grasse BIOTECH permettent ainsi de couvrir toute la chaîne de l'appui aux entreprises : de la création à leur implantation pérenne sur le territoire de la Communauté d'Agglomération du Pays de Grasse.

Merci aux directeurs, nous avons tous apprécié votre disponibilité, votre gentillesse, et les explications. La découverte de ces locaux a suscité un grand intérêt de notre part, comme en témoignent la richesse des échanges et les nombreuses questions qui ont été posées lors de ces visites.

Puis nous nous sommes tous retrouvés pour un repas amical au restaurant "La Closerie, au Golf de Saint Donat de Grasse".

Pierre QUIRIN

Secrétaire IESF Côte-d'Azur

7. JEUX MATHÉMATIQUES : SOLUTION DU BULLETIN N°3 DE 2021

Comment calculer la surface du petit carré rouge ?

La surface d'un carré de huit centimètres de côté est égale à $8^2 = 64$ en cm^2 . Élémentaire, n'est-ce pas ? Pourtant, on n'a même pas besoin de ce résultat pour résoudre certaines énigmes sur les surfaces de carrés !

Question :

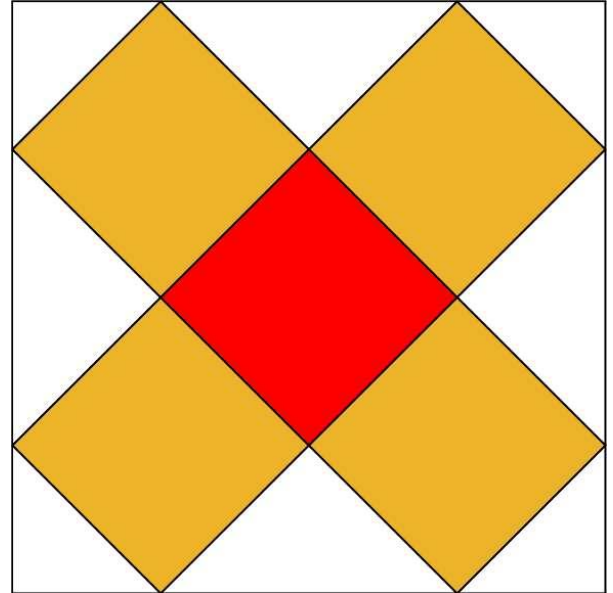
Le grand carré, ci-dessous, mesure 840 cm^2 . Quelle est la mesure du petit carré rouge au centre ?

Réponse :

105 cm^2

Chaque élément du dessin peut être construit avec la même brique de base : le triangle rectangle isocèle du coin en haut à gauche.

Il en faut deux pour les triangles au milieu des côtés et quatre pour les carrés. Les petits triangles aux coins représentent donc un carré et les grands triangles au milieu des côtés, deux carrés. En tout, le grand carré vaut huit petits carrés d'où le résultat.



Trouvez combien il y a d'habitants dans le village ?

Dans un village, le tiers des habitants travaille dans les champs, la moitié du reste travaille à la mine, et les 600 autres habitants travaillent en ville.

Calculez le nombre d'habitants qui habitent le village.



© RealWorkHard, Pixabay, Domaine Public

Réponse

1.800.

Un tiers sont aux champs, il reste deux tiers dont la moitié est un tiers. Les autres, ceux qui travaillent à la mine, sont donc un tiers également et sont au nombre de 600. Le nombre total d'habitants est donc égal à 1.800.

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

8. JEUX MATHÉMATIQUES :

La question d'âge qui rend fou

Quand on essaye de les résoudre à l'aide d'un raisonnement arithmétique, certaines questions d'âge sont à même de rendre fou. Tout simplement parce qu'on a du mal à suivre l'énoncé. Heureusement, l'algèbre simplifie tout... mais vous pouvez penser plus sportif de faire autrement.

Prenez le temps de lire l'énoncé...

Question :

Maxime a 32 ans. Il a deux fois l'âge qu'Albane avait quand il avait l'âge qu'Albane a maintenant. Quel est l'âge d'Albane ?



L'âge qui rend fou ! © Rawpixel, Pixabay, DP

Chaton mâle ou femelle, quelle probabilité ?

Quelle est la probabilité qu'un chaton pris au hasard soit un mâle ? Quelle est la probabilité que ce soit une femelle ?

Faute de résultats plus précis, on estime en général que les deux événements ont la même probabilité, c'est-à-dire $1/2$, même si la réalité peut être légèrement différente.

Question :

La chatte d'Albane attend des chatons. La vétérinaire l'examine et lui dit qu'elle en porte quatre. Béatrice et Caroline veulent chacune un mâle de la portée. Albane leur promet. Quelle est la probabilité qu'Albane puisse tenir sa promesse ?



Les chatons joueurs. © Yann Mallander, Pixabay, DP

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

9. 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

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

Solution du Sudoku du dernier bulletin

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

10. SUR VOTRE AGENDA

Dates	Sujets / événements	Lieux	Organisation
22 janvier 2022	Déjeuner associatif annuel	La Guinguette Gaudoise	IESF CA
3 mars 2022	Conseil d'Administration IESF CA	A déterminer	IESF CA
31 mars 2022	Assemblée Générale Ordinaire IESF CA	A déterminer	IESF CA

11. COTISATIONS 2022

ADHESION – COTISATIONS 2022 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 2022 sur HelloAsso](#)
- Payer par carte bancaire votre cotisation sur HelloAsso en scannant ce Qrcode



- 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/