

➤ Koovea : la surveillance de température connectée

La solution proposée par Koovea répond à la problématique d'une logistique de transport et de conservation des produits nécessitant une température constante, pour garantir leur qualité et leur efficacité.

Koovea, est une start-up montpelliéraine fondée en 2018 par Adrien Content, Yohann Caboni et John William Aldon ¹. La solution proposée par Koovea répond à la problématique d'une logistique de transport et de conservation des produits nécessitant une température constante pour garantir leur qualité (produits alimentaires), voire leur efficacité (vaccins). Les secteurs de santé et d'agroalimentaire sont les premiers à s'intéresser à cette technologie et Koovea accompagne déjà plusieurs acteurs de référence sur le marché.

Rupture de la chaîne du froid : un facteur de pertes significatif dans le domaine médical

Lutter contre le gaspillage des produits car leur température n'a pas été respectée, tel était l'objectif que le fondateur s'est fixé au moment du lancement de Koovea. En effet, les pertes annuelles liées à la rupture de la chaîne du froid dans le domaine médical sont estimées aujourd'hui à 35 milliards de dollars. L'entreprise propose sa technologie aux laboratoires, transporteurs, hôpitaux et pharmacies qui sont amenés à distribuer les vaccins, les matières thermosensibles telles que médicaments, prélèvements et dons d'organes.

L'activité de Koovea s'inscrit parfaitement dans la problématique de la logistique autour du vaccin Covid. L'entreprise collabore régulièrement avec des acteurs étrangers tels que l'ONG américaine The Mitchell Group et assure la logistique et le suivi de température des vaccins contre le virus Ebola en Afrique.

Koovea propose également ses solutions à des entreprises du secteur alimentaire pour le suivi de température lors du transport et du stockage de produits sensibles.

¹ Depuis sa création de l'entreprise, Koovea, qui comporte 25 collaborateurs, confirme sa bonne santé en multipliant par 10 son chiffre d'affaires chaque année. La société a réalisé une levée de fond de 2,5 millions d'euros en 2021.

Une technologie française qui assure le suivi de température

L'entreprise a mis au point une technologie composée de capteurs intelligents, d'un routeur connecté aux réseaux cellulaires et d'une plate-forme de suivi de température en temps réel permettant d'assurer le suivi de la chaîne du froid. Par rapport aux systèmes existants dans ce domaine qui requièrent soit des solutions spécifiques filaires soit des enregistreurs à lecture manuelle, la solution apporte une grande simplicité pour les utilisateurs.



Figure 1 : Dispositif de surveillance globale proposé par Koovea.

L'utilisation des réseaux cellulaires des opérateurs publics apporte une couverture internationale et le roaming nécessaire aux systèmes en déplacement. La qualité du service est assurée par la contractualisation avec des MVNO², qui offrent un service réseau global avec des engagements de résultats et de suivi.

Koovea a développé un protocole de communication spécifique sur les capteurs avec des connexions cycliques pour en optimiser l'énergie. Ces capteurs bénéficient d'une autonomie supérieure à deux semaines. L'alimentation des routeurs et capteurs peut être aussi assurée par les véhicules de transport et dans les entrepôts.

La connexion à un portail Web assure aux clients la mise en service et les mises à jour automatiques de tous les équipements. Des algorithmes de traitement de données spécifiques sur la plate-forme fournissent aux clients de nombreux services de suivi et d'alerte. Ceux-ci bénéficient d'un suivi personnalisé complet en fonction de leurs besoins, et de l'évolutivité de la solution.

² MVNO Mobile Virtual Network Operator, Opérateur de réseau mobile virtuel

Koovea fournit le *firmware* de ses équipements. A ce jour plus de 100 000 capteurs sont en service. Les capteurs et routeurs sont entièrement développés par Koovea, trois brevets sur la solution ont été déposés sur les points suivants :

- Fiabilisation de la mesure de température ;
- Sécurisation des communications ;
- Fiabilisation de l'étanchéité des capteurs.

Le modèle d'affaires

Le modèle d'affaire est équivalent à celui d'un opérateur de réseau :

- le service est basé sur un abonnement mensuel, fonction du nombre de capteurs à connecter ;
- une caution est demandée pour la fourniture des équipements capteurs et routeurs.

En termes d'évolutions, la société se prépare aux technologies IOT du LTE-M et NB-IOT. Elle envisage de proposer un service de tracking en couplant la triangularisation du cellulaire avec la localisation GPS. Les capteurs proposent déjà de nouvelles fonctions telles que la détection de choc ou la mesure de taux d'humidité et de CO₂. ■ SD

➤ Contribution de la 5G à l'exposition du public aux ondes électromagnétiques, l'ANFR publie une première série de résultats de mesures

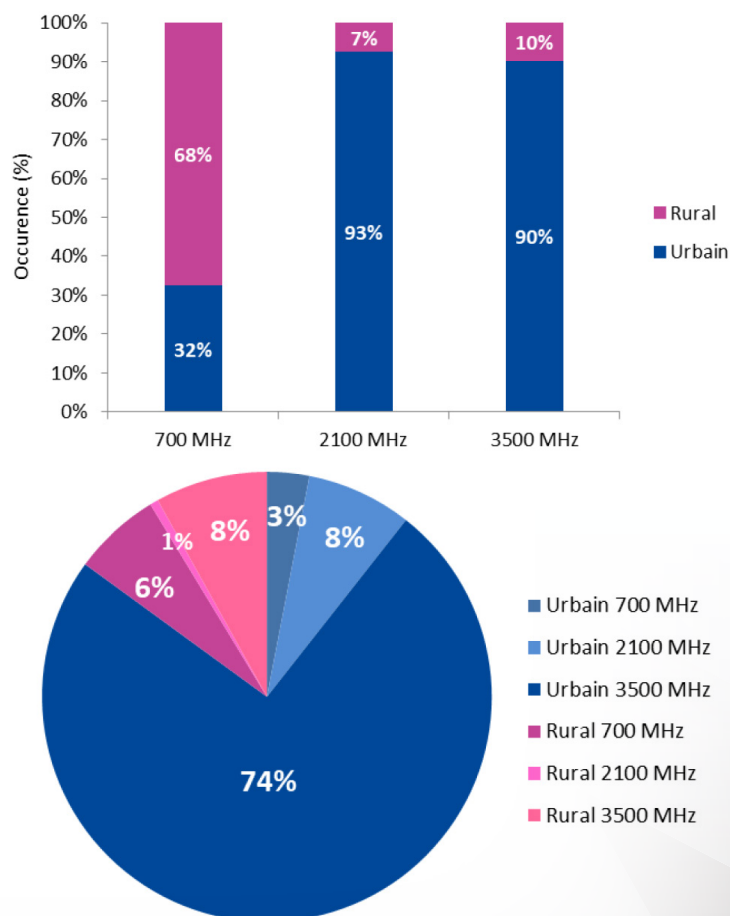
Avant le lancement commercial de la 5G, l'Agence nationale des fréquences (ANFR) a engagé un programme de mesure de l'exposition du public aux rayonnements électromagnétiques afin d'évaluer la mise en œuvre de la 5G sur celle-ci. Annoncés en octobre 2020 par le gouvernement, ces travaux viennent de faire l'objet d'une publication préliminaire en décembre 2021³.

Le principe retenu est de mesurer le champ électromagnétique, selon un protocole prédéfini, au voisinage de stations mobiles où l'installation d'émetteurs 5G a été planifiée : la mesure est effectuée avant la mise en service des émetteurs 5G et après celle-ci,

3 <https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/expacce/20211214-exposition-5G.pdf>

afin de déterminer comment la mise en service de la 5G contribue à l'évolution de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques. La 5G peut être déployée, en France, dans plusieurs bandes de fréquences : des bandes basses déjà utilisées en 3G et en 4G, 700 MHz, 2100 MHz et une nouvelle bande, 3500 MHz libérée par ses anciens utilisateurs. Les premières mesures, faites en 2020, ont porté sur les bandes basses dans lesquelles la 5G a d'abord été déployée. Les mesures dans la bande des 3500 MHz ont été effectuées en 2021. Ces opérations menées sur la base des prévisions de mise en service de la 5G ont dû être ajustées en fonction du calendrier de mise en service effective de la 5G sur les sites sélectionnés.

Le rapport préliminaire publié par l'ANFR analyse les résultats de 210 mesures menées en 2020 et 3000 mesures effectuées en 2021 ; 1500 mesures n'étaient pas achevées lors de sa rédaction. Leurs résultats seront intégrés ultérieurement dans l'analyse. Les mesures prises en compte dans le rapport portent sur 1649 sites dont la répartition par bandes de fréquences et par type d'environnement sont données par la figure 1.

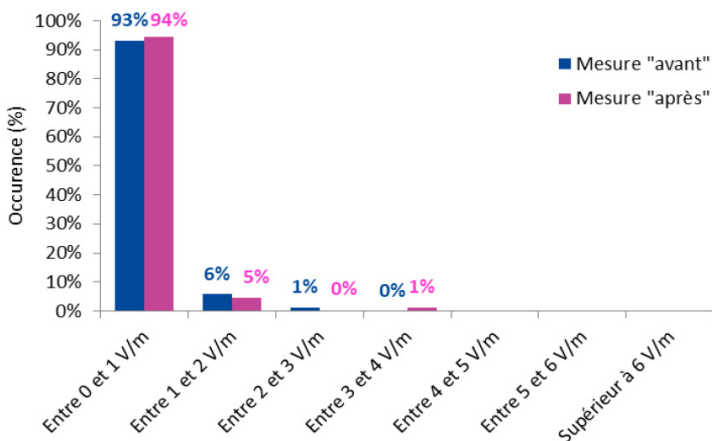


■ Figure 1 : Répartition des sites par bande de fréquences et par type d'environnement – Source : ANFR.

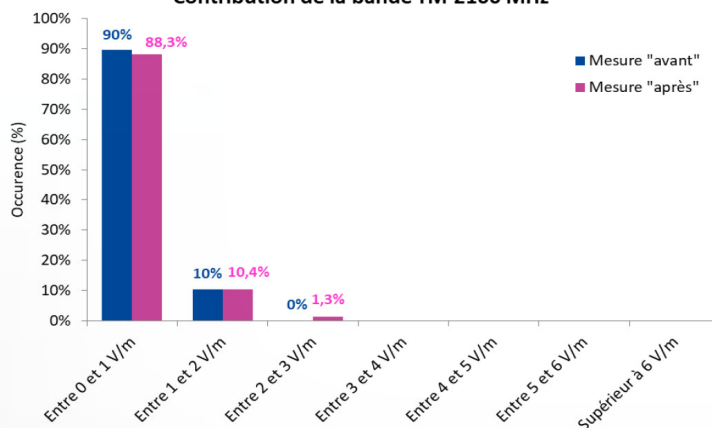
- Les mesures effectuées dans les bandes basses, à 700 MHz et 2100 MHz, montrent que la mise en service des antennes 5G n'a pas fait évoluer le niveau d'exposition du public aux champs électromagnétiques comme le montre la figure 2 qui présente les résultats des mesures effectuées sur les sites 5G mesurés et travaillant dans les deux bandes.

En ce qui concerne la bande à 3500 MHz, les mesures globales font apparaître, selon leur analyse par l'ANFR, une augmentation de l'exposition due à l'ouverture de la 5G évaluée à 0,11 V/m. Cette valeur est faible comparée à la limite imposée par la norme qui est de 61 V/m. Cependant ces mesures ont été effectuées en 2021, période où les terminaux 5G en service n'étaient pas nombreux : or, dans cette bande, les émetteurs 5G focalisent leur rayonnement vers les terminaux 5G actifs (*beamforming*). L'exposition mesurée ne représente donc pas celle qui sera observée quand de nombreux terminaux 5G seront opérationnels. En poursuivant sa campagne de mesures selon le protocole utilisé au fil de l'augmentation du parc de terminaux 5G, il devrait être possible à l'ANFR de connaître exactement la contribution de la 5G à l'exposition du public dans la bande des 3500 MHz.

Contribution de la bande TM 700 MHz



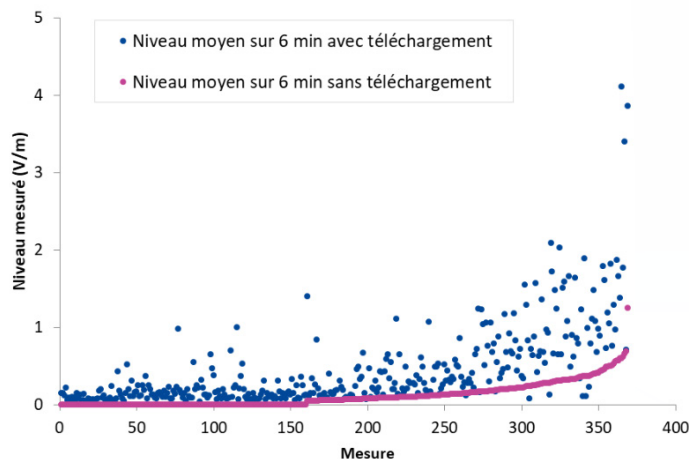
Contribution de la bande TM 2100 MHz



■ Figure 2 : Distribution des niveaux d'exposition avant et après l'activation de la 5G sur la bande 700 MHz sur 87 sites et sur la bande 2100 MHz sur 77 sites. Source : ANFR.

Sans attendre, les services de l'ANFR ont tenté une série de mesures, hors protocole, sur 370 sites 5G à 3500 MHz en présence d'un trafic simulé engendré par un terminal 5G téléchargeant un fichier de 1 gigaoctet de données. La croissance du niveau moyen de champ mesuré sur 6 minutes avec et sans téléchargement est illustrée par la figure 3.

Niveaux de champ avec et sans téléchargement sur la bande 3500 MHz



■ Figure 3 : Niveau de champ moyen sur 6 mn pendant le téléchargement d'un fichier de 1 Go comparé avec le champ moyen sur 6 mn sans téléchargement. Source : ANFR.

Selon l'ANFR, ces mesures font apparaître une augmentation du niveau de l'exposition de 16 % et suggèrent une augmentation à terme de 20 % de l'exposition globale dans les zones qui seront équipées avec la 5G dans la bande des 3500 Mhz. Les mesures ultérieures devraient permettre de conforter ou non ces estimations. ■ PC

➤ Vers des composants électroniques en diamant synthétique pour des applications en conversion d'énergie électrique à haute puissance

Les convertisseurs sont des dispositifs essentiels en génie électrique. Le silicium couramment utilisé comme substrat présente des inconvénients en termes de performances et son remplacement par des matériaux à grande bande interdite est à l'étude depuis plusieurs années. Une avancée marquante vient d'être effectuée en utilisant le diamant synthétique dans le cadre d'un projet européen.

De récents travaux sur des semi-conducteurs à base de diamant ont permis à Etienne Gheeraert, chercheur à l'Institut Néel (CNRS) et enseignant à Polytech Grenoble – INP,

UGA de recevoir le Prix Etoile de l'Europe [1] le 2 décembre 2021, pour le projet européen GreenDiamond (2015-2020). Ce projet H2020 regroupait 15 partenaires de 6 pays (Allemagne, Belgique, Espagne, France, Grande-Bretagne et Luxembourg), la France étant représentée par l'institut Néel, le laboratoire G2ELab, et le CEA List. Quels sont les avantages de ces nouveaux semi-conducteurs ?

Les objectifs de transition énergétique font de l'énergie électrique un vecteur clé tant pour l'exploitation des énergies renouvelables (solaire photovoltaïque et éolien) que l'électrification de la mobilité, ou la production d'hydrogène vert. Quel est le point commun de toutes ces applications ? Le besoin de concevoir des convertisseurs électroniques pour la transformation de l'énergie électrique, à savoir : ceux présents dans les éoliennes pour optimiser la conversion d'énergie éolienne ; les onduleurs pour les panneaux solaires ; les chargeurs pour les batteries des véhicules électriques et les convertisseurs pour les moteurs électriques de traction ; les convertisseurs pour les électrolyseurs, ... A ces exemples s'ajoutent les besoins pour le transport de l'électricité en courant continu (pour assurer la conversion de l'alternatif vers le continu, et vice-versa).

Des besoins pour une large gamme de puissance

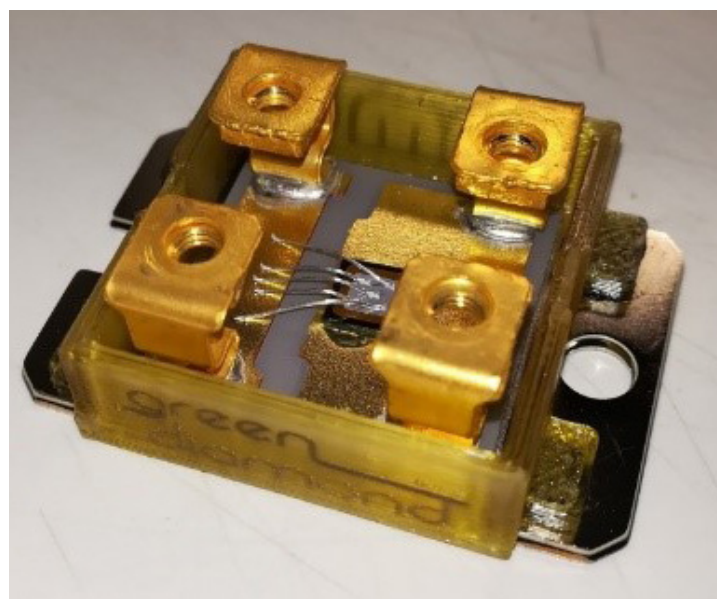
Au-delà des applications qui sont importantes, la gamme des puissances est large, de quelques kW à plusieurs centaines de MW, et quelques dizaines de volts à quelques centaines de kV :

- de 1 à 20 MW pour des éoliennes onshore ou offshore ;
- quelques kW à quelques MW pour des onduleurs photovoltaïques ;
- une centaine de kW pour des véhicules électriques ;
- quelques MW pour des électrolyseurs ;
- 1000 MW pour une liaison électrique à courant continu (liaisons France-Espagne, ou France-Angleterre) et plusieurs centaines de kV.

Tous ces convertisseurs électroniques reposent sur des composants électroniques (transistors, diodes, ...) qui se comportent comme des interrupteurs électroniques (état ON/OFF) et qui doivent pouvoir supporter des tensions importantes (en mode bloqué, OFF) et des courants importants (en mode passant, ON). Ces interrupteurs sont aussi soumis à des fréquences de commutation de plus en plus élevées et des environnements thermiques contraignants qui peuvent nuire à leur fiabilité dans le temps.

L'amélioration des performances : un enjeu important

Ces composants sont principalement fabriqués avec du silicium, et les performances limitées en tension, courant, fréquence, ou température conduisent à imaginer des structures de convertisseurs plus complexes pour répondre aux applications souhaitées. Un exemple est le convertisseur modulaire multiniveaux (MMC, *modular multilevel converter*) conçu pour le transport d'électricité en courant continu (1000 MW et 500 kV DC). Pour les convertisseurs électroniques, les enjeux concernent aussi la réduction des pertes, surtout pour les applications à fortes puissances : pour un convertisseur de 1000 MW, un gain de 1 % sur les pertes, c'est un gain de 10 MW, soit avec un coût de 100 €/MWh, un gain de 24 k€ par jour. Ces pertes impactent directement la montée en température des composants et donc leur fiabilité dans le temps. Il faut alors concevoir des systèmes de refroidissement coûteux et volumineux. Ces contraintes de masse et volume peuvent s'avérer très préjudiciables dans les systèmes embarqués (automobile ou aéronautique). Il y a donc un intérêt fort à disposer de composants plus performants.



La recherche de composants à grande bande interdite

Pour améliorer les performances des composants semi-conducteurs, les chercheurs développent des composants réalisés avec des matériaux à grande bande interdite (intervalle d'énergie entre la bande de valence et la bande de conduction). Ces composants permettent d'augmenter la tenue aux tensions en mode bloqué, une diminution de la résistance interne et globalement une meilleure efficacité, ce qui veut dire moins de pertes et donc des systèmes de refroidissement allégés.

- Il y a quelques années, des composants à base de carbure de silicium (SiC) ou de nitrure de gallium (GaN) sont apparus pour un premier incrément des performances par rapport au silicium. Le diamant (avec un dopage pour assurer un comportement semi-conducteur) est un peu le graal, mais il reste des verrous scientifiques et technologiques forts pour passer à une échelle de réalisation industrielle. En particulier, un comportement à température ambiante avec des performances encore faibles.

L'objectif consiste à contrôler la densité des porteurs de charge, c'est ce qui a été réussi dans le cadre du projet GreenDiamond [3] via un empilement Métal-Oxyde-Semiconducteur. Le dopage (remplacement d'un atome de carbone sur 10 000 par un atome de bore) est assuré par un procédé de dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma micro-ondes. La mise au point des étapes technologiques de fabrication a permis la maîtrise d'un certain dopage au bore et de la croissance du diamant, ainsi que le contrôle de l'interface entre l'oxyde et le diamant, qui joue un rôle clé dans les performances du transistor. *In fine*, le composant obtenu présente de meilleures performances que le SiC (x3 pour la tenue en tension) et bien meilleures que celles du silicium (x30 pour la tenue en tension), et une réduction des pertes de 75 %. Les résultats du projet sont nombreux [4], même si les travaux ne sont pas terminés car il reste à passer à l'étape du convertisseur de puissance (envisageable d'ici 4 ans), et à optimiser les structures en fonction des applications visées. Selon Etienne Gheeraert et contrairement aux idées reçues, « *la production de diamants n'est pas coûteuse ! Il est en fait assez facile à fabriquer à partir de méthane et d'hydrogène ou de graphite* ». Ce procédé donne une qualité cristalline bien meilleure que le diamant naturel.

Création d'une start-up pour le développement industriel

Les travaux réalisés dans ce projet ont permis en 2019 la création de la start-up Diamfab [4] qui vise à fournir aux industriels des plaques de diamant prêtes à être utilisées dans les salles blanches de la filière silicium. Cela permettra d'envisager des dispositifs électroniques gérant plus de puissance dans les réseaux électriques. Très légers et compacts, ils pourront également cibler des applications dans les véhicules électriques, le spatial ou le ferroviaire, mais aussi le quantique. Diamfab prévoyait de fabriquer – à horizon fin 2021 – « *des démonstrateurs sur substrats de 12,5 mm de diamètre afin de fournir des composants de manière semi-industrielle à des marchés de niche* ». ■ MP

[1] https://www.datapressepremium.com/rmdiff/2008834/Communique-prix-etoile-europe_Grenoble-INP.pdf

[2] <https://www.greendiamond-project.eu/>

[3] <https://cordis.europa.eu/project/id/640947/reporting/fr>

[4] <https://diamfab.com/le-diamant-tout-savoir/>

La course d'IBM aux qubits

La Société IBM continue d'affirmer ses prétentions dans le domaine de l'informatique quantique, face à Google ou Microsoft notamment, en dévoilant le premier processeur quantique à plus de 100 qubits supraconducteurs réalisé au monde.

Nous avons évoqué dans ces colonnes à de nombreuses reprises les travaux de la Société IBM dans le domaine de l'informatique quantique. IBM de manière logique s'est lancé dans la course de l'informatique quantique et a développé dans les années 2000 des processeurs quantiques à base de qubits supraconducteurs et a conservé depuis cette technologie. En 2017, IBM dévoilait un processeur de 50 qubits et lançait en parallèle sur le web une plate-forme type boîte à outils destinée au grand public appelé IBM Quantum Network. La firme historique de l'informatique essaye ainsi de se situer en tête des grands acteurs du domaine devant Microsoft ou Google. IBM a pourtant en 2019 été devancé par l'annonce de Google autour du concept de « suprématie quantique » et a réagi aussitôt en contestant en partie l'annonce et en manifestant ainsi sa détermination à faire la course en tête. A la fin de 2020, IBM montrait dans ses planifications les avancées prévues en termes de nombre de qubits dans les années 2020. Ainsi, lors de l'IBM Quantum Summit 2021, IBM a donné des indications sur ses nouveaux processeurs en dévoilant notamment le dernier dénommé Eagle à 127 qubits.

Le processeur Eagle

Eagle (figure 1) est le premier processeur quantique IBM développé et déployé qui comporte plus de 100 qubits opérationnels. L'année précédente c'était le processeur Hummingbird de 65 qubits et en 2019 le processeur Falcon de 27 qubits. La progression est donc spectaculaire et pour réaliser cette percée les chercheurs d'IBM se sont appuyés sur des innovations mises au point au sein des processeurs quantiques, notamment une conception de l'agencement des qubits visant à réduire les erreurs et une architecture permettant de limiter le nombre de composants nécessaires.

Les nouveautés technologiques mises au point dans le processeur Eagle permettent de répartir le multiplexage de contrôle sur plusieurs niveaux physiques au sein du processeur tout en conservant les qubits sur une seule couche ce qui permet une augmentation significative de leur nombre. C'est le premier processeur quantique dont l'échelle rend impossible toute simulation fiable par un ordinateur classique. En effet, le nombre de bits classiques qui serait nécessaire

pour représenter un état sur le processeur de 127 qubits dépasserait le nombre total d'atomes des plus de 7,5 milliards de personnes aujourd'hui sur Terre indique de façon imagée la communication d'IBM. Le premier processeur Eagle est disponible en tant que dispositif exploratoire sur le *cloud* d'IBM pour les membres de l'IBM Quantum Network.

Vers les 1000 qubits pour les développeurs

IBM ne veut pas s'arrêter là et développe une feuille de route visant à dépasser les 1000 qubits dans les deux ans, en deux étapes. La première étape sera la sortie du processeur Osprey, prévu l'année prochaine, avec une capacité de 433 qubits, lui-même suivi par le processeur Condor de 1121 qubits en 2023.

En parallèle IBM vise à fédérer une large communauté de développeurs autour de l'informatique quantique avec pour objectif de ne pas exiger des utilisateurs plus de spécialisation que dans l'informatique classique. IBM prévoit ainsi de fournir une couche de base de contrôle de l'ordinateur sous une forme proche des APIs dans l'informatique d'aujourd'hui. IBM va de plus en plus enrichir son interface de programmation Quiskit, boîte à outils conçue pour gérer la programmation de bas niveau de l'ordinateur quantique. L'objectif de Quiskit est de rapprocher les ordinateurs classiques et les ordinateurs quantiques par le *cloud* pour apporter un environnement complet aux ordinateurs quantiques. Selon IBM, la combinaison des deux environnements permettra d'accroître l'efficacité des systèmes quantiques et de réduire la latence. Il est prévu à cet effet de proposer à

terme des runs Times Quiskit préconfigurés en conjonction avec des bibliothèques d'intégration classiques. IBM annonce un nouveau design d'ordinateur quantique plus modulaire avec un système cryogénique plus dense qu'il a appelé *Quantum System Two*.

Le « clops » nouvelle unité de puissance des calculateurs quantiques

La traditionnelle mesure de puissance des ordinateurs classique s'exprime en flops ou megaflops pour les calculateurs les plus puissants. Pour les ordinateurs quantiques cette mesure s'effectue avec une estimation qui dépend du nombre de portes quantiques et est donc uniquement théorique. Mais ces mesures ne dépendaient pas jusqu'ici des processeurs, c'est pourquoi IBM a développé un *benchmark* de la vitesse de traitement avec une nouvelle unité de mesure, le « clops » qui mesure la rapidité avec laquelle un processeur quantique peut exécuter un circuit quantique. Le clops prend en compte à la fois le matériel et le logiciel, plus précisément le taux de répétition du processeur quantique, la vitesse d'exécution des portes quantiques, le temps de compilation, le temps nécessaire pour générer les instructions de contrôle sur l'environnement d'exécution classique et le taux de transfert des données entre toutes les unités.

Les objectifs d'IBM en matière d'informatique quantique, que nous avons détaillés dans la chronique quantique publiée dans REE 2021-2, sont donc remplis. Malgré la multiplication des plates-formes logicielles de la part des grands acteurs du domaine, celle d'IBM demeure toujours en avance par rapport à ses concurrents. ■ ML

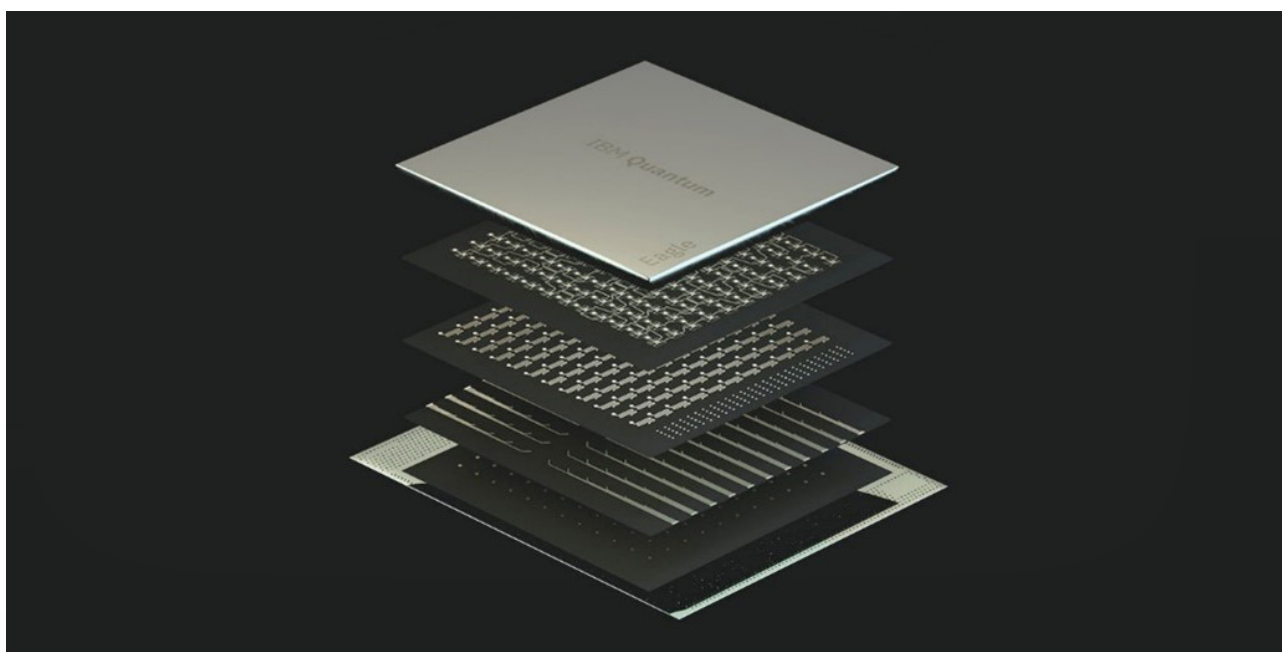


Figure 1 : Le nouveau processeur IBM Eagle. Source : IBM.