

Les minces et les dodus dans la ville de FET : naviguer dans le labyrinthe nanomesh pour un avenir plus vert.
© Mehrdad RAHIMI / MPQ / Université Paris Cité / CNRS Images

Physique pour les technologies quantiques et les technologies numériques

RÉSUMÉ

Le numérique est aujourd'hui omniprésent dans notre société. Son usage croissant s'accompagne d'importants défis (diminuer l'empreinte environnementale, s'émanciper de certains matériaux, composants et logiciels critiques), qui devront être relevés d'une part en adaptant les technologies existantes, et d'autre part grâce à de nouveaux paradigmes, comme par exemple les technologies quantiques. Ces défis posent de très nombreuses questions de physique fondamentale qui relèvent de CNRS Physique, mais aussi des autres instituts du CNRS, des autres organismes de recherche, et des industriels. À travers nos entretiens avec un grand nombre d'acteurs de la communauté, nous avons identifié des enjeux à l'horizon 2030, déclinés pour les technologies quantiques et pour les technologies numériques, selon trois axes : (i) capteurs, imagerie et métrologie, (ii) communications, et (iii) simulation et calcul.

	Technologies quantiques	Technologies numériques
Capteurs, imagerie, métrologie	<ul style="list-style-type: none"> - Démontrer un gain quantique sur des cas d'usage - Développer de nouveaux supports pour la mesure - Mettre les capteurs en réseaux et montrer leur avantage - Développer des architectures embarquées 	<ul style="list-style-type: none"> - Améliorer les sources MIR cohérentes - Développer l'imagerie THz - Intégrer les systèmes de détection - Assurer une opérabilité en environnement sévère
Communications	<ul style="list-style-type: none"> - Améliorer la technologie des composants élémentaires - Déployer des plateformes de test et des infrastructures - Consolider le lien entre des cryptographies quantique et post-quantique - Mettre en œuvre des protocoles pour réseaux quantiques 	<ul style="list-style-type: none"> - Monter en fréquence - Inventer de nouvelles architectures d'antennes intelligentes, reconfigurables, directionnelles... - Accroître l'intégration photonique - Développer la convergence électronique-optique
Simulation et calcul	<ul style="list-style-type: none"> - Explorer différents types de qubits - Monter en échelle - Développer les codes correcteurs - Démontrer la valeur ajoutée de la simulation quantique 	<ul style="list-style-type: none"> - Orienter l'électronique vers un développement plus durable - Transformer l'architecture technologique (neuromorphique...) et les composants (spintroniques, supraconducteurs, moléculaires...)

Des enjeux transverses de science fondamentale se font également jour : accroître la maîtrise dans l'élaboration des matériaux conventionnels et leur hybridation, promouvoir l'émergence de matériaux aux fonctionnalités nouvelles et innovantes, soutenir la recherche en technologie et nanofabrication, prendre en compte la convergence entre physique et intelligence artificielle.

Le numérique (métrologie, communication et calcul) façonne et détermine de nombreux segments de l'économie. À l'ère de l'informatique distribuée, de l'internet des objets et des systèmes autonomes, le développement du secteur fait face à plusieurs défis : l'ampleur de la croissance de l'usage des technologies numériques, leur empreinte environnementale appelant à des filières et usages plus sobres, mais aussi l'émancipation à l'égard de certains matériaux, composants et logiciels critiques et stratégiques. L'explosion des flux de données à traiter, les interactions croissantes homme-machine, les exigences accrues en matière de protection et de sécurité des données, requièrent de fait non seulement une adaptation des technologies existantes, mais aussi des changements de paradigme dans la conception, la fabrication (incluant l'élaboration des matériaux), l'architecture et l'usage des composants, protocoles et systèmes. Le développement récent des technologies quantiques offre certaines opportunités prometteuses de ce point de vue, mais leur concrétisation demande encore des efforts en

recherche aussi théoriques que pratiques. Ces objectifs bénéficieront de l'apport des sciences fondamentales, en amont des prochaines innovations et des futurs besoins du secteur. La physique est au cœur de cette recherche au temps long, explorant des concepts nouveaux ou de rupture pour la mesure, les communications et le calcul.

TECHNOLOGIES QUANTIQUES

Capteurs et métrologie, communication, simulation et calcul quantiques, sont des sujets qui mobilisent aujourd'hui un grand nombre d'acteurs de la recherche publique et industrielle. Ils sont au cœur du Programme et Équipements Prioritaires de Recherche (PEPR) « Technologies quantiques » de la stratégie nationale. Bien qu'orientées vers des enjeux applicatifs, les technologies quantiques relèvent encore très majoritairement de la recherche fondamentale. Les défis à relever sont importants avant d'envisager leur déploiement industriel. Ils sont ici déclinés par champs d'application.

CAPTEURS, IMAGERIE ET MÉTROLOGIE QUANTIQUES

La détection quantique fait usage d'un large éventail de matériaux, de phénomènes physiques et d'architectures de dispositifs. Elle permet de mesurer une grande variété de paramètres tels que les champs électriques et magné-

tiques, la température, le temps/fréquence, la pression et la contrainte, les forces inertielles, le déplacement et la phase. Les performances des capteurs et imageurs quantiques en termes de sensibilité, résolution, justesse, fidélité, largeur de bande ou gamme dynamique, leur permettent d'avoir un impact sur plusieurs domaines : navigation et maintien du temps, défense, géoscience, physique de la matière condensée et science des matériaux, imagerie biochimique et biomédicale, mais aussi science des interactions fondamentales (détection d'ondes gravitationnelles, test du principe d'équivalence, recherche de la matière noire, variation des constantes fondamentales). Si le développement des capteurs ou imageurs quantiques est encore en grande partie une question de recherche fondamentale, certains de ces dispositifs sont déjà sortis des laboratoires et font l'objet de développements par des entreprises. On peut ici indiquer par exemple les magnétomètres à centre NV, les horloges et gravimètres atomiques, les systèmes optomécaniques ou encore les amplificateurs micro-ondes supraconducteurs. Ceci fait probablement des capteurs quantiques l'axe le plus avancé des technologies quantiques en termes de maturité, avec un très bon positionnement des acteurs français académiques et industriels. Afin d'accélérer et d'amplifier le rôle de ces dispositifs, plusieurs défis doivent être relevés.

Faire progresser les performances des capteurs quantiques au-delà de leurs homologues classiques

L'enjeu n'est pas exclusivement un enjeu d'ingénierie. Par exemple, atteindre une sensibilité sous la limite quantique standard requiert le développement de méthodes nouvelles. Une voie possible repose sur la préparation et le contrôle avec une grande fidélité d'états corrélés tels que des états intriqués, protégés du bruit ambiant. Un autre enjeu porte sur le développement d'architectures et de méthodes offrant une plus grande polyvalence des capteurs et imageurs quantiques, en termes de conditions d'opération (température, pression, environnement bruyant...), d'encombrement et de modalités d'imagerie (imagerie multi-paramètres).

Développer et identifier de nouveaux supports quantiques pour la mesure

Les plateformes de capteurs ou imageurs quantiques recourent principalement aujourd'hui à des défauts à l'état solide (défauts de spin dans le diamant, spins moléculaires), des systèmes atomiques (atomes refroidis par laser et vapeurs atomiques), des systèmes supraconducteurs (interférences quantiques dans les SQUIDS, rupture de paires ou circuits quantiques pour le comptage de photons), des états photoniques non classiques (optiques, micro-ondes, ondes millimétriques) et des systèmes mécaniques dans le régime quantique (opto- ou électro-mécaniques). D'autres plateformes d'intérêt pourraient émerger, permettant des modalités d'imagerie nouvelles ou une meilleure compacité ou embarquabilité. On peut ici citer le développement de sources atomiques (sources continues, nouvelles espèces comme les alcalino-terreux)

ou bien les défauts optiquement actifs nouveaux dans le diamant (SiV, GeV, SnV) ou dans d'autres matériaux (SiC, matériaux 2D), ou encore le couplage entre magnons et centres NV ou photons de cavité. Une voie prometteuse repose sur l'hybridation de ces différentes plateformes, employant par exemple un résonateur mécanique couplé à une transition électronique (dans une boîte quantique, un centre NV, un ion de terre rare).

Développer des architectures compactes et embarquables, en lien avec les utilisateurs

Afin de combler l'écart entre les démonstrations en laboratoire et les plateformes déployables dans les applications, des schémas d'intégration des systèmes devront être mis en œuvre. Ceci requiert des progrès dans le contrôle des matériaux au cœur des plateformes, mais également dans l'intégration et la miniaturisation des composants associés (sondes, mais encore sources lasers, détecteurs). La compatibilité des technologies habilitantes (photonique, électronique, cryogénie) avec les applications finales sera cruciale pour valider le potentiel de valorisation des capteurs et imageurs quantiques. Un exemple est le développement et la maîtrise d'une cryogénie compacte et embarquable entre 0,5 et 80 K. L'adoption de ces dispositifs et l'identification de leurs cas d'usage ne pourront se faire sans un travail étroit avec les utilisateurs finaux, académiques ou industriels (géoscience, science des matériaux, spatial, défense).

Développer des architectures de capteurs en réseau

On s'attend à ce que les réseaux de capteurs interconnectés puissent améliorer leurs facteurs de mérite. Outre le développement de réseaux quantiques permettant de transférer l'information quantique entre capteurs distants, il conviendra d'identifier des cas d'usage dans lesquels la mesure d'observables reste inaccessible avec des capteurs individuels et/ou dans lesquels des tâches de détection distribuée pourraient bénéficier d'une architecture de réseau.

COMMUNICATIONS ET CRYPTOGRAPHIE QUANTIQUES

La communication quantique permet le transfert de l'information quantique sur des longues distances à travers des infrastructures réseau. Elle repose sur des systèmes photoniques, idéalement dans des longueurs d'onde des télécommunications, qui maximisent la portée des liens quantiques. Les états quantiques ne pouvant être amplifiés sans bruit, la nature des nœuds d'interconnexion dans des réseaux quantiques est cruciale et détermine les fonctionnalités pouvant être réalisées. Avec des nœuds de confiance, il est possible de partager des clés quantiques garantissant une sécurité inédite pour le transfert des messages secrets sans limitation de distance ; avec des nœuds de type répéteur quantique, des perspectives d'applications très riches et largement inexplorées s'ouvrent, à l'instar de l'internet au début de sa création. Malgré des avancées importantes ces dernières années

et l'existence des systèmes commerciaux de cryptographie quantique, de nombreux défis doivent être surmontés pour envisager le déploiement d'une infrastructure de communication quantique à large échelle offrant des cas d'usage convaincants à l'horizon 2030.

Pousser les technologies des composants critiques, ainsi que leur miniaturisation et leur intégration

Les systèmes et les réseaux de communication quantique nécessitent des composants tels que des sources de photons uniques et intriqués, des détecteurs de photons uniques et des détecteurs cohérents, des commutateurs quantiques et des mémoires quantiques. Des transducteurs optique-micro-ondes et des interfaces ion-photon ou spin-photon s'ajoutent également à l'éventail de technologies qui doivent monter en maturité et en performances dans les prochaines années en se basant sur des plateformes variées. Il sera de plus important d'appliquer des méthodes d'intégration photonique et plus généralement de rendre les plateformes compactes et miniaturisées afin que ces composants soient compatibles avec une utilisation à grande échelle.

Déploiement de *testbeds* et d'infrastructures au niveau national

Le test et l'analyse comparative des technologies de communication quantique développées, suivant des critères bien définis et dans des conditions réelles d'utilisation, sont un élément clé dans le chemin vers leur maturité. Ceci inclut le test de l'interopérabilité des systèmes, des interfaces, de l'intégration réseau à la fois sur des liens terrestres et satellitaires, des diverses topologies et des protocoles de synchronisation. Ces efforts demandent une synergie étroite avec les industriels (télécommunications, spatial, défense) et doivent s'inscrire dans le cadre plus large de tels déploiements en cours en Europe et dans le monde.

Faire de la cryptographie quantique avec des boîtes noires

La question de la confiance aux utilisateurs, systèmes et nœuds d'un réseau quantique est au cœur de son utilisation pour une large gamme de cas d'usage. Un défi majeur dans ce contexte est de minimiser le plus possible les hypothèses nécessaires, permettant ainsi, dans ce modèle de type boîte noire, de certifier les processus même dans le cas de présence de parties malhonnêtes. Ce modèle permet de bénéficier au maximum de l'avantage intrinsèque en sécurité offerte par les technologies de la cryptographie quantique, mais impose de très fortes contraintes sur la performance. Il sera important d'explorer les compromis nécessaires et l'applicabilité des solutions envisagées, notamment pour la distribution quantique de clés.

Développer des protocoles avancés de réseaux quantiques

Dans la vision d'un développement progressif des réseaux quantiques, où l'intégration des technologies de plus en plus avancées (mémoires, répéteurs quantiques...) ouvre

la voie à des fonctionnalités de plus en plus complexes, la conception et la mise en œuvre des protocoles compatibles avec toutes les étapes de développement de ces réseaux sont nécessaires. L'intégration de la cryptographie quantique avec la cryptographie post-quantique doit se concrétiser. Les protocoles permettant l'accès à distance de façon privée et vérifiée à un processeur quantique, ou l'interconnexion de tels processeurs dans une configuration distribuée sont des exemples très prometteurs de services pratiques potentiels à développer à l'horizon 2030.

SIMULATION ET CALCUL QUANTIQUES

Depuis une vingtaine d'années, le contrôle des systèmes quantiques individuels a atteint un tel niveau de précision qu'il est envisageable de concevoir des processeurs utilisant les propriétés quantiques (superposition, intrication...) pour rendre possibles certains types de calcul. Les spectaculaires applications potentielles de ces processeurs ont conduit à un engouement sans précédent des acteurs privés et institutionnels pour mener à bien leur développement. Si les résultats obtenus sont très prometteurs, il semble très peu probable que des algorithmes de calcul quantique universel non simulables classiquement puissent être implémentés à l'horizon 2030. Il faudra encore répondre à un grand nombre de questions de physique fondamentale, notamment quant au développement de plateformes physiques adaptées à chaque application, et aux possibilités de développements technologiques permettant l'industrialisation réussie de ces processeurs.

Poursuivre l'exploration des systèmes physiques réalisant des bits quantiques (Tableau 1)

Différents types de systèmes physiques sont actuellement étudiés pour construire des processeurs quantiques. Plusieurs plateformes sont d'ores et déjà suffisamment matures en termes de fidélité et/ou de nombre de qubits pour être à la base de machines développées par des entreprises privées dans le monde entier : circuits supraconducteurs, ions piégés, atomes neutres, puces photoniques. De nouvelles approches, plus amont, sont par ailleurs explorées, comme les qubits de spin, les qubits à base de nanotubes de carbone, les hétérostructures hybrides supraconducteurs/ferromagnétiques ou supraconducteur/isolant topologique, les anyons dans l'effet Hall quantique fractionnaire, les skyrmions, ou les matériaux de van der Waals twistés. Il est important de soutenir la recherche académique sur ces plateformes au potentiel encore insoupçonné.

Relever les défis du passage à l'échelle

Les enjeux à l'horizon 2030 sont de nature différente suivant le degré de maturité des plateformes. Cependant, une difficulté commune à toutes les plateformes consiste à réussir le passage à l'échelle permettant de passer de quelques dizaines de qubits physiques (soumis à la décohérence) à des milliers, voire des millions de qubits logiques (préservés des erreurs). Un premier défi consiste

à assembler des centaines de qubits dans un processeur constitué d'un seul «cœur» (puce supraconductrice, semi-conductrice ou photonique, chambre à vide) avec des problèmes physiques de connectivité intra-cœur en limitant les *cross-talks*. Un second défi, sans aucun doute très important à l'horizon 2030, consiste à démontrer et à préserver en passant à une large échelle une fidélité de connexion suffisante inter-cœurs (interconnexion par fibre optique ou ligne de transmission micro-onde, ou entre différentes plateformes physiques suivant la fonction : mémoire, calcul, lecture...) pour que le processeur gagne en capacité de calcul par assemblage des cœurs.

Développer des codes correcteurs d'erreur quantiques

À la différence des processeurs classiques, la simple amélioration de la qualité des composants ne suffira pas à corriger toutes les erreurs pouvant affecter un calcul quantique universel. Les codes correcteurs d'erreur quantiques sont donc un champ de recherche crucial pour arriver à un processeur quantique. Il semble notamment important de travailler en synergie entre informatique et physique pour prendre en compte les limitations matérielles dans la création de codes correcteurs d'erreur avec une connectivité adaptée et bénéficiant des atouts des différentes plateformes physiques pour améliorer la fidélité des portes élémentaires. Différentes approches existent. Par exemple, les codes bosoniques sont une approche actuellement suivie avec succès dans les circuits supraconducteurs et les enjeux à l'horizon 2030 seront d'explorer les avantages et limitations des différents types de codes (qubits de chat, code GKP, *dual rail encoding*...).

Démontrer la valeur ajoutée de la simulation quantique en regard des approches numériques classiques

Le domaine de la simulation quantique, initialement focalisé sur la réalisation de hamiltoniens de matière condensée (modèles de spins, de Fermi-Hubbard, etc.), devient peu à peu, du fait de la programmabilité accrue de ces systèmes, pertinent pour certains types d'applications potentielles, que ce soit en chimie, en science des matériaux, en optimisation combinatoire. Une approche mêlant informatique et physique est nécessaire pour identifier et développer des algorithmes utiles, digitaux ou analogiques, tirant parti des spécificités des différentes plateformes NISQ (*noisy intermediate scale quantum*). Les enjeux du domaine à l'horizon 2030 restent l'extension de la simulation quantique à des dynamiques plus longues, la démonstration de l'existence (ou non) de cas d'usage pour lesquels l'utilisation d'un tel simulateur quantique programmable permettrait de dépasser les performances d'un calcul numérique classique (que la métrique de performance soit exprimée en termes de temps de calcul, de consommation énergétique, ou tout autre critère pertinent), la certification des résultats qu'une machine classique ne peut simuler. Une conséquence des développements de ces recherches est d'ailleurs le développement de meilleurs algorithmes classiques. En particulier, la physique numérique connaît des développements fulgurants pour la simulation de systèmes à N -corps, en partie nourris par les outils de la physique quantique comme les réseaux de tenseurs et les algorithmes de Monte Carlo stochastique, mais aussi par les techniques d'apprentissage machine.

Plateforme	Circuits supra-conducteurs	Ions piégés/atomes neutres	Photons	Boîtes quantiques et qubits de spin
Amélioration des qubits physiques	Matériau (inductances cinétiques, faible pertes RF)	Nouvelles espèces atomiques, contrôle spatio-temporel des lasers	Ingénierie des matériaux et protocoles pour baisser les seuils de fidélité (génération, transmission, manipulation...)	Matériau (insensibilisation au bruit de charge et aux spins environnants)
Augmentation du nombre de qubits par cœur	<i>Cross-talk</i> micro-onde	<i>Cross-talk</i> par les lasers, qualité du vide	États clusters; post-sélection permettant le passage à l'échelle	<i>Cross-talk</i> de charge
Interconnexion entre cœurs	Composants micro-ondes sans perte, guides d'ondes couplés aux puces, post-sélection par détection de photon unique	Couplage entre ions/atomes et fibres optiques à grande efficacité et bande passante	Couplage entre guide d'onde et fibre optique pour calcul distribué entre processeurs de taille intermédiaire	<i>Cross-talk</i> entre lignes de couplage, possiblement non pertinent si passage à l'échelle sur un cœur
Technologies habilitantes	Amplification à la limite quantique, composants et électronique de contrôle à 10 mK, cryogénie	Sources lasers et micro-ondes (haute puissance et bas bruit), vide cryogénique	Matériaux non-linéaires à faible perte, photo détecteurs bas bruit, sources lasers intégrées, circuits photoniques reconfigurables, cryogénie	Électronique de contrôle à basse température

Tableau 1: Enjeux des principales plateformes à l'horizon 2030

TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES

L'accélération de la transformation digitale avec le déploiement de l'intelligence artificielle, de l'internet des objets, du *cloud computing*, se traduit par des besoins accrus en transmission et traitement des données. En plus d'enjeux de souveraineté et de sobriété énergétique, cette croissance du numérique fait face à des défis technologiques majeurs, appréhendés pour partie dans plusieurs programmes et équipements prioritaires de recherche de la stratégie nationale: PEPR Électronique, SPIN, 5G. La recherche fondamentale en physique peut ici y contribuer suivant plusieurs lignes de recherche déclinées par la suite.

CAPTEURS, IMAGERIE ET MÉTROLOGIE

Les capteurs et l'imagerie, et plus largement la perception numérique, sont devenus omniprésents dans un grand nombre de secteurs qui englobent la santé, l'environnement, l'agriculture, l'énergie, la défense, la sécurité civile, l'internet des objets, le contrôle non destructif, etc. Cette diversité des champs d'applications renvoie à une grande variété de dispositifs reposant sur des mesures optiques, électriques, magnétiques, acoustiques, etc. dont les performances ont évolué de manière spectaculaire au cours des dernières décennies. Aujourd'hui, face aux besoins croissants en détection et imagerie, en termes de performances, de gamme spectrale, et de conditions d'opération, une simple amélioration des composants existants et leur co-intégration suivant une architecture optimisée, ne suffiront pas. Plusieurs nouvelles voies, certaines en rupture, devront être explorées. Certaines sont ici évoquées.

Développer de nouvelles sources optiques cohérentes pour la spectroscopie dans le moyen-infrarouge

Plusieurs architectures sont aujourd'hui poursuivies: lasers à verrouillage de mode, conversion non linéaire de fréquence, générateurs de peignes de fréquences ou supercontinuum, dispositifs intégrés tels que les micro-résonateurs. Dans ce contexte, les circuits photoniques ou fibres optiques à base de verres de fluorures, tellurites ou chalcogénures semblent prometteurs, préfigurant la possible génération de supercontinuum et de peignes de fréquences dans des plages allant de 2 à 20 μm .

Déployer des dispositifs d'imagerie hyper-spectrale, multi-échelle et computationnelle, depuis l'infra-rouge jusqu'au THz

Un des enjeux est de pouvoir disposer d'architectures d'imagerie hyper-spectrale combinant éventuellement super-résolution et permettant d'accéder aux différents degrés de liberté des ondes (polarisation, phase, amplitude...) dans le domaine optique jusqu'au domaine THz. Les verrous se situent non seulement au niveau des composants individuels (notamment dans la gamme THz et sub-THz), mais aussi dans la conception jusqu'ici souvent disjointe des différents éléments de la chaîne de détection (signaux, sources, modulateurs, détec-

teurs, antennes THz et sub-THz, mise en forme spatiale et temporelle des faisceaux, schémas de modulation et formes d'ondes...). Afin de dépasser les limites d'une telle approche, une stratégie consiste à développer des approches de co-conception prenant conjointement en compte la nature du signal à mesurer, l'instrumentation employée et le traitement du signal utilisé en temps réel dans leur globalité, éventuellement couplées à des techniques d'apprentissage machine.

Développer des systèmes de détection, d'imagerie et de traitement du signal analogique intégrés

Afin de faire sortir du laboratoire les nouvelles architectures d'imagerie, l'intégration des composants est un prérequis. Il s'agit là d'intégrer non seulement les différents éléments de la chaîne de détection, mais aussi, à terme, des fonctions variées de traitement du signal, permettant d'exécuter sur puce certaines tâches à moindre coût énergétique, voire d'ouvrir la voie à la réalisation de tâches complexes de vision machine comme la reconnaissance de formes. Ces architectures pourraient tirer parti des interactions photons/phonons/magnons susceptibles d'apporter des capacités de traitement analogiques rapides, compactes et peu consommatrices, en s'appuyant sur des processus de conversions optique/acoustique/ondes de spin par exemple. Ces circuits, adaptés à une co-intégration avec des processeurs électroniques, pourraient d'autre part bénéficier des solutions d'architectures d'intelligence artificielle dans la couche physique.

Assurer une opérabilité en environnements sévères

Certaines applications, dans le domaine de l'énergie, de la défense, de la biologie et de la santé par exemple, imposent une opérabilité des capteurs dans des environnements sévères de température, de pression, parfois en milieu gazeux ou liquide. Ces conditions d'opération imposent des contraintes fortes, qui nécessiteront des développements matériaux et de nouveaux schémas d'interface et de transduction du signal. On peut ici citer par exemple les capteurs nano-(opto)mécaniques pour la détection en milieu biologique ou en atmosphère corrosive, ou encore l'imagerie optique adaptative en milieu turbide.

TÉLÉCOMMUNICATIONS

L'omniprésence et la transversalité croissantes du numérique se traduisent aujourd'hui par un doublement des flux de données tous les deux ans, préfigurant à terme des défis en matière de capacité, de débit, de fiabilité et de latence. Les enjeux industriels associés sont doubles: démultiplier nos capacités d'échanges de données (avec l'arrivée de nouveaux standards au-delà de la 5G par exemple), mais aussi permettre une évolution durable du secteur des communications numériques par une meilleure efficacité énergétique, une plus grande résilience et une meilleure prise en compte de l'impact environnemental. Les défis scientifiques sont déjà entrepris au sein de plusieurs programmes d'envergure de la stratégie nationale, tels que le PEPR 5G ou le PEPR Électronique.

Ils englobent l'électronique pour la conversion de fréquence, les interconnexions, l'intégration (circuits, mais aussi systèmes) et le *packaging*. Plusieurs ruptures seront aussi nécessaires dans le secteur des composants pour les télécommunications.

Vers une montée en fréquence

Un premier défi majeur est celui de la montée en fréquence des composants, à des fins d'augmentation de la fréquence porteuse et des débits dans les réseaux en espace libre. Si les liaisons sans fil sont actuellement dominées par les radiofréquences, les étendre dans le domaine du THz pourrait devenir un élément clé pour les réseaux terrestres à courte distance, mais aussi pour les communications entre satellites de mégaconstellations. Des progrès sont cependant encore nécessaires dans l'ingénierie des composants individuels (antennes, modulateurs, amplificateurs, récepteurs, sources...), non seulement en photonique micro-onde jusqu'à des fréquences de 100 GHz, mais aussi dans la gamme THz. Un autre enjeu est celui de l'intégration des composants individuels sur des plateformes optiques à faibles pertes et des plateformes électroniques de traitement du signal. Enfin, la montée en fréquences impose le développement de nouveaux systèmes mutualisés dédiés à la métrologie.

Vers des antennes actives et reconfigurables

La montée en fréquence des signaux s'accompagne, à surface de rayonnement équivalente, d'une plus grande focalisation. La reconfigurabilité des antennes devient alors nécessaire afin d'assurer la mise en forme et l'orientation du faisceau. Les surfaces intelligentes reconfigurables (ou RIS pour *reconfigurable intelligent surface*) que l'on retrouve également sous la sémantique réseaux transmetteurs (*transmitarrays*), sont de fait aujourd'hui considérées comme un composant clé pour les futures technologies sans fils, en permettant un contrôle dynamique des signaux radio entre un émetteur et un récepteur (pointage, focalisation, balayage, compensation atmosphérique...). Plusieurs architectures sont poursuivies : métasurfaces et métamatériaux activables, accordables et contrôlables, antennes à réseaux phasés, réseaux d'antennes sur puce à commandes actives (par exemple à base de commandes optiques intégrant circuits photoniques et NEMs, ou encore à base de composants électroniques intégrés). De même, l'idée émerge d'intégrer des antennes relais au sein de divers ouvrages (vitres, fenêtres, pare-brise...) en utilisant des matériaux conducteurs transparents. La montée en fréquence impose alors d'utiliser des matériaux nouveaux.

Vers une intégration photonique accrue et avancée

L'utilisation de l'électronique, pour traiter ou transmettre davantage de données, se confrontera à terme aux exigences d'une plus grande frugalité énergétique. La photonique trouve ici toute sa place, grâce au possible multiplexage spatial et en longueur d'onde; la photonique intégrée (sur semi-conducteurs III-V, silicium, nitrure de silicium ou par hybridation), offre en sus des possibilités de traitement de signal déporté sur puce

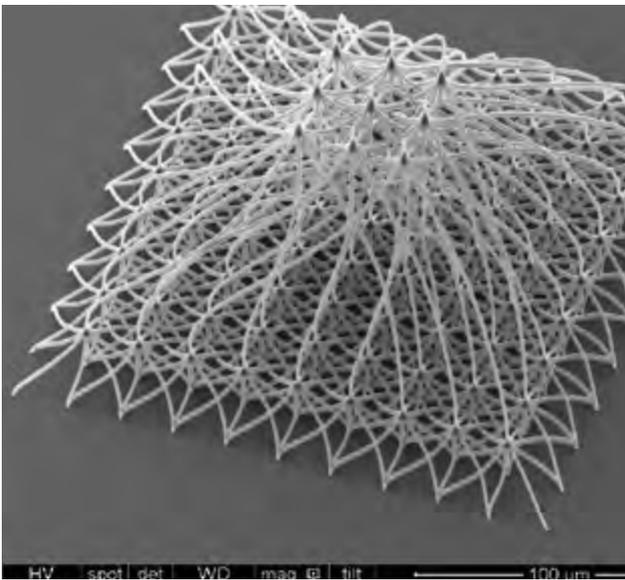
grâce à sa compacité, à la diversité des fonctionnalités intégrables et à sa plus faible consommation énergétique. Les circuits photoniques intégrés sont déjà utilisés dans les émetteurs-récepteurs optiques. À terme, les systèmes optiques intégrés pourraient permettre de réduire la quantité d'énergie nécessaire à la transmission des signaux et diminuer le temps de latence. Grâce à la complexité croissante et la reconfigurabilité des circuits intégrant amplificateurs, modulateurs, guides, convertisseurs, détecteurs et sources, une partie des opérations de traitement du signal, réalisée numériquement sur circuits électroniques, pourrait aussi être reléguée dans le domaine optique sur des circuits photoniques intégrés embarqués avant conversion analogique-numérique.

Vers des approches croisées entre optique et électronique

Un premier domaine à l'interface entre optique et électronique est celui de l'intégration hétérogène de circuits photoniques et électroniques, afin de réduire la longueur de l'interface optique-électronique et de fait les pertes et la latence, d'implémenter des interconnexions optiques sur puce électronique, et de diminuer la consommation d'énergie. Un autre domaine de convergence est celui de la photonique micro-onde et de la photonique THz, discutées plus haut, dont les enjeux se portent aujourd'hui vers l'amélioration des composants individuels (en particulier les sources) et leur co-intégration sur puce. Des enjeux stratégiques se posent ici en termes du maintien du savoir-faire en France, par exemple dans le domaine des diodes Gunn ou Schottky pour les composants THz. Un troisième domaine exploite la combinaison entre photonique et spintronique, avec notamment le développement des spin-LEDs ou spin-VCSELs. De façon plus prospective, la réalisation de neurones ou synapses suivant des architectures optiques ou spintroniques pose de premières briques vers des processeurs neuromorphiques qui pourraient bénéficier à terme d'une hybridation entre photonique et spintronique.

ÉLECTRONIQUE POUR LE CALCUL

Depuis plusieurs dizaines d'années, l'électronique pour le calcul a évolué autour d'une technologie ultra-dominante (la filière silicium et plus particulièrement le transistor CMOS associés à la fameuse loi de Moore) et d'un principe d'architecture de calcul lui aussi dominant, dit de von Neumann, dans lequel la mémoire où sont stockées les données est physiquement séparée du processeur où sont réalisés les calculs. Pour plusieurs raisons, nous vivons et allons vivre dans les dix prochaines années une transition importante autour de ces deux piliers cardinaux. D'une part, la miniaturisation des transistors CMOS est en train d'atteindre ses limites physiques avec des longueurs de grille de l'ordre du nanomètre. D'autre part, dans les calculateurs actuels, la part de consommation électrique ne servant qu'à transporter les données entre mémoire et calculateur peut représenter plus de 99,9%, ce qui conduit à repenser en profondeur les architectures. La croissance exponentielle du nombre de



Réseau de neurones artificiels. © Daniel BRUNNER

calculateurs, qui va encore s'accroître avec la montée en puissance de l'intelligence artificielle et de l'internet des objets, se traduit par un enjeu énergétique majeur, la part de l'électricité produite consommée par les calculateurs pouvant dépasser 20% à l'horizon 2030. Enfin, un dernier élément de contexte, en France et en Europe, est l'affaiblissement très important, ces trente dernières années, de l'industrie manufacturière de composants, la plupart des fonderies étant situées aujourd'hui en Asie et en Amérique du Nord. Cette situation est bien perçue par les pouvoirs publics et est au cœur des conditions énoncées pour réussir France 2030 que sont souveraineté et réindustrialisation. Les enjeux prospectifs pour la physique dans ces domaines peuvent être déclinés sous deux angles.

Accompagner les transformations de l'électronique dans les domaines des architectures de calcul et des composants associés

Compte tenu de la typologie et du coût des moyens de production de composants, ces transitions dans l'industrie ne se passeront pas de manière brutale, mais progressive, en conservant un rôle central au CMOS et au silicium. Le domaine le plus avancé est certainement celui des mémoires non volatiles avec de premières générations de composants (MRAM ou ferroélectrique) qui sont sur le marché ou très proches de l'être. Un premier enjeu consiste à accompagner le développement des générations futures à plus faible consommation comme les SOT-RAM, basées sur le couplage spin-orbite, et plus généralement travailler à développer des fonctions de lecture rapide ou d'écriture à très basse consommation. Un domaine plus émergent et donc plus ouvert est celui du développement de briques très basse consommation pour la logique, en associant, par exemple, les phénomènes de spin-orbitronique et magnétoélectrique (concept MESO proposé par Intel ou autre proposition originale). Plusieurs voies doivent être explorées pour proposer de nouvelles formes de logique (asynchrone, adiabatique, stochastique...). Les enjeux architecturaux seront centrés dans un premier temps sur des problèmes d'intégration hétérogène et le développement d'architectures hybrides et modulaires mêlant nouvelles tech-

nologies et composants CMOS. La montée en puissance de la photonique sur silicium pourrait s'avérer une option pertinente pour réaliser des connexions entre modules, voire même pour le calcul.

Un autre axe de travail consiste à s'assurer dès la conception de l'adaptabilité dans le temps des circuits afin d'augmenter leur durée de vie, en introduisant par exemple des fonctions d'auto-réparabilité ou des techniques de redondance ou de correction. À cette approche d'éco-conception s'ajoute la volonté d'optimiser les ressources matérielles et l'usage des matières premières rares.

Un niveau plus disruptif d'évolution architecturale consiste à envisager le calcul neuromorphique, inspiré du cerveau, en particulier pour l'intelligence artificielle. Plusieurs réalisations convaincantes de neurones ou synapses physiques ont été démontrées récemment, notamment à partir de technologies spintroniques ou photoniques. D'ici à 2030, un enjeu majeur sera de développer de premières réalisations fonctionnelles comprenant plusieurs dizaines à centaines de neurones, ce qui permettra de vérifier expérimentalement les gains importants attendus en termes de consommation. Un autre enjeu sera d'imaginer la meilleure manière de traduire la très forte densité d'interconnexions du cerveau dans un composant. Les voies traditionnelles s'avéreront certainement limitées et des propositions originales, comme celles basées sur la propagation des signaux en espace libre pourraient constituer des ruptures majeures.

D'une manière générale, il y a un fort intérêt à laisser s'interpénétrer les compétences et les efforts en physique et en conception de circuits, cœur de l'enjeu d'interdisciplinarité de ce domaine.

Promouvoir l'émergence de voies technologiques disruptives

Parmi elles, la spintronique est certainement le domaine qui a le plus pénétré les composants (mémoires) et architectures de calcul (neuromorphique) comme mentionné ci-dessus. La communauté française de recherche dans ce domaine est très structurée et a établi sa feuille de route qui est déclinée via le programme PEPR SPIN et pour partie au sein du programme PEPR Électronique, soutenus par France 2030. Plusieurs directions de recherche prioritaires dans ces programmes vont conduire au développement de dispositifs logiques, neuromorphiques et contribuer à l'étude d'architectures de calcul à très faible consommation. On retiendra entre autres l'exploitation de textures de spin topologiques, le développement de fonctions ultra-rapides jusqu'à la gamme du THz, ou encore la physique des ondes de spin pour la réalisation de circuits magnoniques. Enfin, les technologies spintroniques sont susceptibles d'établir des liens fonctionnels entre calculs classique et quantique.

L'électronique supraconductrice a déjà démontré la capacité de réaliser des fonctions très performantes

pour le calcul (logique ultra rapide de type *rapid single flux quantum* ou adiabatique de type *adiabatic quantum-flux-parametron*). Les applications attendues sont très spécifiques et ne visent pas les marchés de masse. Un enjeu technique central pour cette communauté, et au-delà celle des qubits supraconducteurs, serait de disposer d'une fonderie capable de réaliser des circuits reproductibles, qu'ils soient analogiques, numériques ou quantiques. La spécificité des matériaux supraconducteurs permettrait aussi d'envisager de développer une électronique basée sur la phase des signaux, ce qui serait susceptible d'ouvrir la voie vers plusieurs fonctionnalités innovantes. Il est sans doute nécessaire de travailler sur l'ingénierie des barrières tunnel afin d'accroître la maîtrise des performances des dispositifs Josephson. Enfin, il est regrettable qu'il n'y ait quasiment plus d'effort matériau visant à identifier des phases supraconductrices à des températures intermédiaires (40-50 K), ce qui permettrait de rester à des niveaux de bruit thermique faible tout en bénéficiant de solutions cryogéniques compactes et autonomes.

Une autre voie en émergence est l'électronique organique, possiblement flexible et extensible, de fabrication à bas coût. Plusieurs défis majeurs se posent cependant tels que le développement de matériaux sur mesure comme des élastomères électro-actifs ou bien des matériaux conducteurs pour la fabrication d'électrodes extensibles, ou encore de composants électroniques élémentaires (transistors à forte mobilité) ou de fonctions électroniques plus élaborées (mémoires, bascules, etc.) à base de matériaux biosourcés. L'électronique moléculaire représente quant à elle l'échelle ultime de la miniaturisation des composants. Cependant, l'accès à la molécule, les temps d'écriture ou encore les nombres de cycles possibles limitent les performances, qui in fine restent inférieures à celles du Si, qui bénéficie désormais de dimensions presque comparables aux molécules. Si l'avenir de l'électronique moléculaire est très incertain pour le calcul classique, les perspectives pourraient être plus ouvertes pour le calcul quantique. Le transport d'électrons polarisés en spin le long de la molécule, le greffage sur des nanoparticules métalliques ou encore le couplage avec des matériaux 2D présentent une physique riche, à défaut d'applications évidentes.

Au-delà de ces quelques voies, on voit émerger l'étude de systèmes hybrides associant, par exemple, supraconductivité et magnétisme ou matériaux 2D, spintronique et moléculaire ou organique, etc. Ce sont autant de voies dont l'exploration pourrait conduire à des fonctionnalités complexes et innovantes.

AXES TRANSVERSES

En plus de défis propres discutés précédemment, les technologies quantiques et les technologies numériques partagent plusieurs défis majeurs communs relevant de la recherche en physique, en particulier en sciences des matériaux et technologie. Elles tireront aussi profit d'évo-

lutions et de ruptures méthodologiques, en lien avec l'intelligence artificielle par exemple.

RECHERCHE EN MATÉRIAUX

Les matériaux sont la clé de voûte d'une majeure partie des composants précédemment discutés. Ils constituent l'élément limitant ou déclenchant pour un grand nombre d'applications. Relever les défis et les enjeux en physique pour les technologies quantiques et numériques exige un effort conséquent de recherche fondamentale en sciences des matériaux et procédés d'élaboration. Cet effort doit être entrepris suivant deux angles.

Accroître la maîtrise dans l'élaboration des matériaux conventionnels et dans leur hybridation

Malgré leur maturité, plusieurs défis restent à relever dans le domaine des matériaux conventionnels : Si, SiC, diamant, semi-conducteurs III-V, niobate de lithium, matériaux organiques, oxydes fonctionnels, matériaux magnétiques, matériaux supraconducteurs. Les objectifs de performance des composants optiques, électroniques et mécaniques, classiques ou quantiques, imposent un niveau de contrôle sans précédent sur la qualité des matériaux employés : contrôle du désordre et des impuretés, contrôle du dopage, contrôle des surfaces et interfaces, contrôle des contacts, et ce dans un contexte de réduction d'échelle spatiale des dispositifs. On peut ici mentionner en exemple le contrôle des défauts dits TLS (pour *two-level systems*) qui nuisent à la cohérence quantique des circuits supraconducteurs ou des résonateurs mécaniques. Outre une maîtrise accrue dans l'élaboration et la pureté des matériaux, un autre enjeu essentiel est l'intégration hybride, sous différentes formes (*on wafer*, monolithique, report localisé) de différents matériaux. Les raisons en sont d'une part la miniaturisation pour l'amélioration des performances (y compris énergétique), d'autre part l'extension des fonctionnalités offertes. Un exemple est l'intégration hybride de matériaux semi-conducteurs III-V avec des chalcogénures pour l'optique intégrée reconfigurable, ou avec des matériaux ferromagnétiques pour l'optospintronique, ou encore des matériaux piézoélectriques avec des supraconducteurs pour l'électromécanique quantique.

Promouvoir l'émergence de matériaux aux fonctionnalités nouvelles et innovantes

Plusieurs classes de matériaux émergents suscitent aujourd'hui un intérêt croissant et l'on pressent déjà pour certains un besoin significatif pour la conception et réalisation des composants à l'horizon 2030. Nous en donnerons ici trois exemples. Les matériaux multifonctionnels tels que les multiferroïques, ou bien les organiques, couplant propriétés mécaniques, acoustiques, électromagnétiques, optiques, thermiques, électriques ou magnétiques, constituent une voie prometteuse pour atteindre les objectifs de performances multiples de divers composants, notamment en électronique, pour les mémoires non volatiles de très haute densité ou bien pour les capteurs intelligents. Les matériaux à change-

ments de phase (citons NbO₂ qui s'inscrit dans la lignée de VO₂ déjà bien établi, ou encore les chalcogénures à base de Ge, Te, Se, S, Sb...) seront des éléments-clés pour la reconfigurabilité des composants optiques intégrés ou des antennes, particulièrement importante dans le cadre de la montée en fréquence des communications hertziennes. Les matériaux bidimensionnels ainsi que les hétérostructures de van der Waals (incluant toute la richesse des moirés) connaissent aujourd'hui un développement foisonnant. Les défis restent cependant encore multiples afin de confirmer l'intérêt de ces matériaux pour les applications. Ils englobent le passage aux grandes surfaces (incluant l'épitaxie des matériaux 2D et hétérostructures), le contrôle de l'empilement des couches et de leur angle, la compréhension fine de leurs propriétés aux surfaces et aux interfaces.

Cette recherche fondamentale en sciences et élaboration de matériaux se devra d'intégrer des contraintes responsables, notamment en termes d'impact environnemental (efficacité écologique, durabilité), mais aussi en termes de souveraineté et de capacité d'approvisionnement des matériaux. Dans cette direction, on peut citer les recherches vers de nouveaux substrats pour la croissance de couches pourtant déjà maîtrisées en homo épitaxie (cas des antimoniures par exemple).

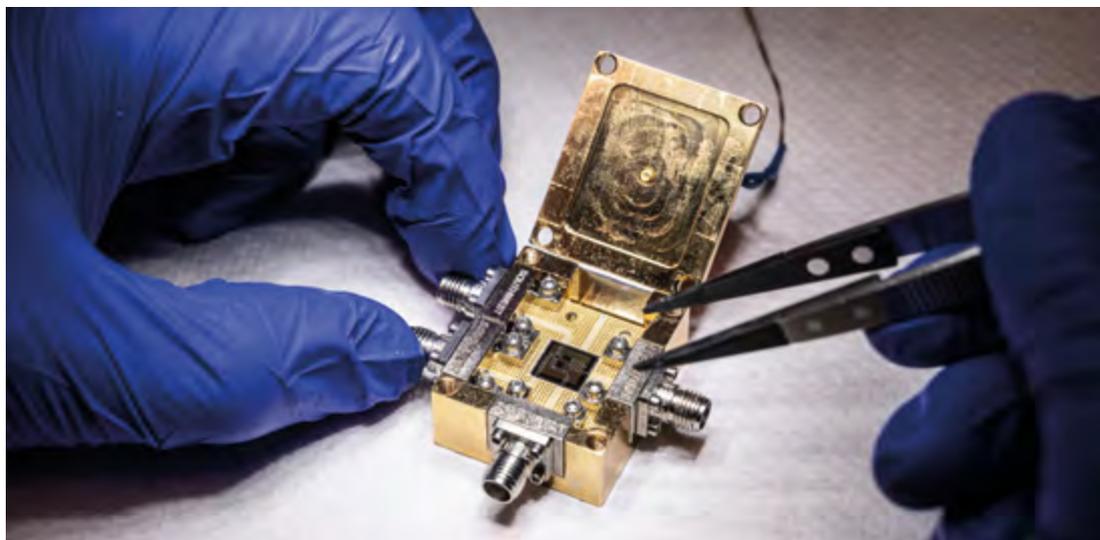
RECHERCHE EN TECHNOLOGIE

La recherche en technologie et nanofabrication est primordiale pour le développement de la plupart des technologies quantiques et numériques. Au-delà du contrôle et de la reproductibilité des procédés développés et employés, les évolutions dans ce domaine sont aujourd'hui dominées par l'intégration hétérogène de différents matériaux, mais aussi l'intégration hybride, éventuellement 3D, de plateformes jusqu'ici encore assez disjointes (optiques, électroniques, acoustiques...). Cette intégration hybride est essentielle afin de pouvoir tirer profit de l'actuelle convergence entre électronique, photonique, phononique, etc., et l'exploitation des processus de conver-

sion ondes/ondes en sus des conversions ondes/courant. Les enjeux se situent à la fois au niveau de la basse dimensionnalité (avec la miniaturisation des composants) et de la grande échelle (avec l'intégration de plusieurs fonctions sur une même puce). Dans ce contexte, de nouveaux paradigmes de connexion seront à trouver, à la fois *chip-to-chip* et *on-chip*, sur des plateformes intégrables dans les standards de fabrication industrielle et compatibles avec les marchés de masse pour les technologies numériques en particulier. En vue d'amener ces différents composants vers des produits, les aspects d'emballage et d'interfaçage seront essentiels. Les solutions d'impression 3D pour le packaging ou le dépôt de métaux sont des alternatives prometteuses.

CONVERGENCE PHYSIQUE ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Les récents progrès fulgurants en intelligence artificielle, comme l'apprentissage profond, symbolique ou neuro-inspiré, présagent de potentialités nouvelles, voire de ruptures technologiques à plusieurs niveaux dans le champ de la physique. Un premier niveau est celui de la modélisation et de la simulation aux performances accrues. L'introduction d'algorithmes d'intelligence artificielle dans les techniques conventionnelles de calcul numérique pourrait rendre possible le traitement de problèmes complexes jusqu'ici difficiles voire inaccessibles, par exemple dans le champ des matériaux quantiques ou en chimie quantique. Un deuxième niveau porte sur la conception optimale et globale des architectures système (de réseaux de communication, d'imagerie, de calcul) et l'optimisation des protocoles de mesure, par design inverse par exemple. Les algorithmes d'intelligence artificielle s'annoncent aussi d'intérêt fort pour l'analyse et le traitement des données; on peut ici citer la reconstruction d'image ou encore la reconnaissance de forme. Enfin, l'intelligence artificielle dans la couche physique pourrait ouvrir la voie à de nouvelles approches de calcul en rupture et plus sobres, avec l'émergence de circuits neuromorphiques sur puce optique, électronique ou hybride.



Installation d'une puce supraconductrice dans son porte échantillon (circuit imprimé) © Hubert RAGUET / Alice&Bob / LPENS / CNRS Images