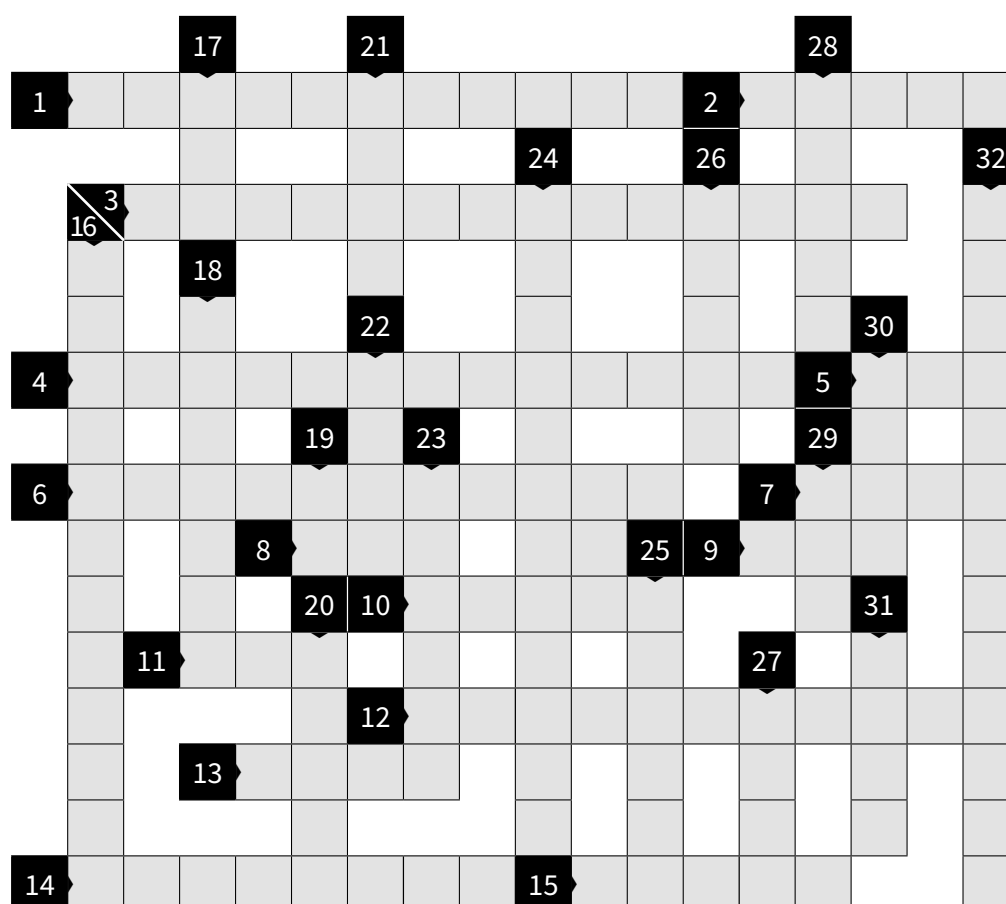


MOTS CROISÉS SUR LE THÈME DES COMMUNICATIONS QUANTIQUES

Par Philippe ADAM



SOLUTION SUR
PHOTONIQUES.COM



- | | | | |
|----|---|----|--|
| 1 | Enchevêtrement quantique | 16 | Responsables des transitions quantique-classique |
| 2 | Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information | 17 | Algorithme de Grover |
| 3 | Supports de réseau | 18 | Atomes permettant de concevoir des bits quantiques |
| 4 | Si quantique, assure l'inviolabilité des échanges | 19 | Intelligence artificielle |
| 5 | TeQ constitue un tel groupement | 20 | Auteur d'un algorithme de factorisation |
| 6 | Mélange des technologies classiques et quantiques | 21 | Ouvrent des portes quantiques ? |
| 7 | Quantum Secure Networks Partnership | 22 | Forme une dualité fondamentale avec le corpuscule |
| 8 | Standard de chiffrement avancé | 23 | Des inégalités lui ont valu le prix Nobel en 2022 |
| 9 | Laboratoire français, acteur majeur en physique quantique | 24 | Observable dans l'expérience d'Alain Aspect |
| 10 | Une caractéristique d'un état quantique à température nulle | 25 | Tour pour l'organisation de France Quantum Conference en 2022 |
| 11 | Pour l'heure, alternative à la boussole quantique | 26 | Unité de base de l'information quantique |
| 12 | Encodage | 27 | Ensemble Complet d'Observables qui Commutent |
| 13 | Animal préféré de Schrödinger | 28 | Plus efficace dans un réseau que dans le cerveau ! |
| 14 | Non-clonage et superposition sont ses deux piliers | 29 | Distribution de clés |
| 15 | Lewis Carroll n'avait pas imaginé ses aventures quantiques | 30 | Matériau dans la boîte |
| | | 31 | Physicien dans tous ses états |
| | | 32 | Transmission de signal classique et quantique dans la même fibre |



Entretien avec Rémi Carminati

Directeur général de l'Institut d'Optique, professeur à l'ESPCI Paris-PSL, chercheur à l'Institut Langevin en nanophotonique et en physique des ondes en milieux complexes.

<https://doi.org/10.1051/phys/202513012>

COMMENT AVEZ-VOUS DÉCOUVERT LES SCIENCES ?

J'ai toujours eu envie de faire de la science. Les professeurs de lycée jouent un rôle important sur les orientations et j'ai eu la chance d'avoir d'excellents profs de physique. En première à mon époque, il y avait beaucoup de physique des ondes. Un matin en cours, le professeur a apporté un laser avec une fente réglable et il a projeté sur le mur blanc au fond de la classe une figure de diffraction. Il avait projeté l'image de la fente, et puis, en diminuant la taille de la fente, on a vu apparaître au fond de la salle la figure de diffraction du laser. Je me souviens d'avoir été fasciné par ce phénomène et de m'être dit qu'un jour j'aimerais être capable de le comprendre en détail. Quand j'étais en prépa, j'attendais impatiemment qu'en maths spé nous abordions l'optique physique et les équations de Maxwell.

COMMENT AVEZ-VOUS CHOISI VOTRE SUJET DE THÈSE ?

Par la suite, c'est en 2^e année d'Ecole d'ingénieur à Centrale Paris que j'ai eu le déclic. J'avais eu la chance d'avoir Jean-Jacques Greffet comme professeur. Ses cours étaient fascinants et je savais alors que je souhaitais poursuivre en recherche. J'ai toujours été attiré par l'idée d'aller aux frontières des connaissances d'une discipline. En 3^e année, je suivais en parallèle un DEA (le Master 2 de l'époque), et quand j'ai décidé de chercher une thèse, je me suis assez vite tourné vers Jean-Jacques Greffet. J'ai effectué mon stage de DEA dans son équipe, encadré par Anne Sentenac qui était sa première doctorante. Je sentais qu'il menait des recherches intéressantes et il y avait un bon

feeling personnel. C'est ainsi que j'ai eu la chance de démarrer ma thèse en 1993 sous sa direction.

QUELS ONT ÉTÉ LES PRINCIPAUX RÉSULTATS DE VOTRE THÈSE ?

Cette époque correspond au tout début de ce qu'on appelait l'optique de champ proche, et qui est devenu aujourd'hui la nanophotonique. Pour donner une idée, la première conférence de microscopie optique en champ proche s'était déroulée en 1992. Jean-Jacques y avait participé et était revenu avec beaucoup d'idées. Les premières expériences en France étaient menées à Besançon, Dijon et Paris. Nous étions une poignée de thésards à commencer à travailler sur la théorie de l'optique de champ proche, avec notamment Lukas Novotny ou Olivier Martin. C'est dans ce contexte scientifique que j'ai commencé mes travaux. Un de nos apports a été d'introduire des outils théoriques pour l'interprétation des images en microscopie de champ proche. Un enjeu était de découpler l'interaction entre la pointe et l'objet afin d'obtenir une information pertinente sur l'objet. J'ai ensuite été le témoin de la transition, vers la fin des années 1990, entre une vision de la thématique très centrée sur la microscopie et une vision plus large de physique sub-longueur d'onde qui a ouvert le champ de la nanophotonique. L'idée était de faire de l'optique avec des pointes, avec des nanoparticules, des émetteurs uniques... Je me souviens d'exposés de Dieter Pohl qui expliquait qu'il fallait penser en termes d'interaction avec des antennes. Il a amené l'idée qu'on pouvait utiliser des pointes ou des nanoparticules comme des nano-antennes pour l'optique, et ce n'était pas une évidence à ce moment là.

COMMENT S'EST DÉROULÉ VOTRE POST-DOCTORAT ?

Je suis parti en 1996-97 en post-doc à Madrid dans le groupe de Manuel Nieto-Vesperinas qui travaillait sur la diffusion par des surfaces rugueuses et sur l'optique de champ proche. Mon post-doc concernait la nanophotonique théorique. Manuel commençait également à s'intéresser à l'imagerie en milieu diffusant. Il avait pris un doctorant sur ce sujet, et j'ai commencé à m'intéresser aux milieux diffusants en co-encadrant ce doctorant en parallèle de mes travaux en nanophotonique. C'est à partir de ce moment là que j'ai mené de front des activités de recherche sur ces deux thématiques.

C'EST À CE MOMENT QUE VOUS RENTREZ EN FRANCE

Fin 1997, je deviens Maître de Conférence à l'Ecole Centrale Paris et je rejoins le groupe de Jean-Jacques Greffet. Cette époque correspond au début des questionnements de Jean-Jacques sur la cohérence du rayonnement thermique suite à des expériences qu'il avait menées avec le CEA. Il réfléchissait à la question « pourquoi peut-il y avoir de la cohérence spatiale dans l'émission thermique ? ». Au retour de mon post doc, Jean-Jacques me lance sur le sujet et nous publions le premier article théorique en 99, démontrant le rôle des polaritons de surface dans la cohérence spatiale du champ proche thermique. Il y eut ensuite un autre article en 2022 avec la première preuve expérimentale de l'émission thermique cohérente en champ lointain. J'ai eu la chance de travailler sur ce sujet quelques années. Cette période était exaltante car nous avons ouvert un boulevard pour faire progresser notre compréhension de ce

phénomène fondamental. L'émission thermique cohérente est devenue depuis un sujet impliquant de nombreux groupes dans le monde.

QUELS ONT ÉTÉ VOS PREMIERS PROJETS DE RECHERCHE ?

Durant ces années à Centrale Paris, j'ai partagé mes activités entre la nanophotonique et l'optique des milieux diffusants. Mes travaux en nanophotonique portaient sur l'émission thermique cohérente, la plasmonique, et le contrôle de l'émission de fluorescence de molécules uniques par des antennes optiques. En optique des milieux diffusants, nous avons développé des outils théoriques et numériques pour traiter des sujets fondamentaux ou des applications en imagerie de fluorescence. J'ai eu la chance d'avoir d'excellentes doctorantes et doctorants, dont Romain Pierrat qui a rejoint plus tard l'équipe montée à l'ESPCI et qui est aujourd'hui toujours un collègue très proche.

QUELLES SONT LES RAISONS QUI VOUS ONT CONDUIT À REJOINDRE L'ESPCI ?

Au fil des années, en m'investissant progressivement dans l'optique des milieux complexes, je me suis retrouvé en connexion de plus en plus forte avec les collègues de l'ESPCI spécialistes de ces domaines, en particulier Mathias Fink et Claude Boccara. Ils m'ont parlé d'un projet de création d'un institut de recherche dédié à la physique des ondes, allant de l'acoustique à l'optique en passant par les micro-ondes. Ils cherchaient à renforcer l'aspect théorique et mon profil les intéressait. Je franchis le pas en 2007 en devenant professeur à l'ESPCI. Nous travaillons sur ce projet de création d'un nouveau laboratoire en 2008 et l'Institut Langevin est créé en 2009. Mathias Fink en est le directeur, Arnaud Tourin et moi en devenons les directeurs adjoints. C'était très intéressant car il s'agissait d'une aventure nouvelle en démarrant une équipe de recherche de zéro. Ce nouveau challenge a été très stimulant et m'a permis de construire quelque chose d'original avec une équipe de

théoriciens au milieu d'un institut rempli des meilleurs expérimentateurs. J'ai continué à mener en parallèle des recherches sur mes deux thématiques « historiques », mais au fil des années, l'optique des milieux complexes a pris le pas sur la nanophotonique. J'ai participé aux premières discussions sur l'aventure du contrôle du front d'onde en milieux complexes. Dès 2008 nous avons travaillé avec Sylvain Gigan, Claude Boccara, Geoffroy Lerosey et Mathias Fink sur ce projet de mesure de la matrice de transmission qui a été porté par Sylvain Gigan. Ce sujet a d'ailleurs pris beaucoup d'ampleur depuis. La communauté scientifique regardait ces résultats avec grand intérêt, car il était évident qu'il y avait un changement de paradigme.

COMMENT IDENTIFIEZ-VOUS VOS SUJETS DE RECHERCHE ?

En tant que théoricien, j'aime beaucoup travailler avec des expérimentateurs qui osent se lancer dans des projets risqués et qui croient en des idées nouvelles apportées par des théoriciens. J'aime également beaucoup aller découvrir des choses nouvelles dans des vieux sujets. L'émission thermique cohérente en est un exemple. Un autre exemple concerne nos travaux plus récents sur les corrélations d'intensité entre les speckles réfléchis et transmis, menés avec Arthur Goetschy et Romain Pierrat dans le cadre de la thèse de Nikos Fayard. Je me pose encore la question de savoir pourquoi ces corrélations restaient inconnues, alors que les propriétés statistiques des figures de speckle ont été très étudiées depuis les années 80.

VOUS VOUS ÊTES ÉGALEMENT BEAUCOUP IMPLIQUÉ DANS LA DIRECTION DE STRUCTURES DE RECHERCHE

Ma première véritable implication a été liée à l'aventure de l'Institut Langevin démarrée en 2008. Regrouper dans un même laboratoire des spécialistes de l'acoustique, de l'optique et des micro-ondes, et y associer des théoriciens représentait un projet très intéressant pour moi. Mais il fallait construire un

nouveau laboratoire et surmonter de nombreuses difficultés. Il était évident qu'autour de Mathias Fink et Claude Boccara il fallait une équipe resserrée, et Mickael Tanter, Arnaud Tourin et moi avons porté le projet avec eux. Plus tard, en 2014, lorsque Jean-François Joanny prit la direction de l'ESPCI, il m'a contacté afin que je prenne la direction de la recherche. Après avoir hésité (c'était un engagement fort), j'ai commencé comme conseiller dans son comité de direction, puis accepté la fonction de directeur de la recherche en 2015. J'ai toujours continué à mener, en parallèle des fonctions de direction, des activités de recherche et d'enseignement. Lorsqu'en 2019 le mandat de Jean-François Joanny s'achève, je décide d'arrêter la direction de la recherche, souhaitant souffler un peu et me concentrer sur mon travail d'enseignant-chercheur. A l'automne 2020, Alain Fuchs me demande de rejoindre l'équipe de l'Université Paris Sciences et Lettres (PSL) comme vice-président recherche. Tenté par ce nouveau défi je débute comme VP Recherche à PSL en janvier 2021. Ce fût une très belle expérience, et tout se passait très bien lorsque, sans que je m'y attende, le « search committee » de l'Institut d'Optique Graduate School (IOGS) me contacte fin 2021 et me convainc de me porter candidat au poste de directeur général. Il m'a semblé que cette fonction pouvait avoir beaucoup de sens pour moi, peut-être encore plus que le poste un peu « hors sol » de VP que j'occupais. J'ai donc postulé et j'ai été sélectionné par le conseil d'administration, pour prendre mes fonctions de directeur général de l'IOGS en juin 2022. Je mène depuis mes activités de professeur à l'ESPCI et de direction à l'Institut d'Optique avec beaucoup de plaisir et d'enthousiasme.

QUE RETENEZ-VOUS DES LIEUX OÙ VOUS ÊTES PASSÉ ?

J'ai toujours évolué dans des lieux (Centrale, ESPCI, Institut d'Optique) où la connexion entre la recherche et les applications est forte, où la connexion entre le monde académique et ●●●

le monde de l'entreprise est naturelle. Cette culture n'est pas présente dans tous les lieux de recherche, et je me rends compte de la chance que j'ai eue d'évoluer dans des environnements décloisonnés ; décloisonnés d'un point de vue thématique, entre les sciences de l'ingénieur et la physique, entre la physique, la chimie et la biologie par exemple. Cette vision décloisonnée est, il me semble, une vision moderne de la recherche. Je n'utilise que très peu la terminologie dissociant recherche fondamentale et appliquée, les deux aspects se nourrissant l'un et l'autre, de manière réciproque. Si la recherche fondamentale peut donner des applications, il faut garder à l'esprit que les applications peuvent inspirer des recherches très fondamentales. Cette vision décloisonnée est aussi ce qui m'a motivé à prendre la direction de l'Institut d'Optique, car l'IOGS est conçu sur un modèle hybride, pensé pour faciliter les décloisonnements. Les pères fondateurs, Charles Fabry en premier lieu, ont défini dès 1920 le modèle de l'Institut d'Optique comme le mélange d'une école d'ingénieur, d'un centre de recherche, et d'un centre de transfert vers l'industrie. Toutes ces composantes, qui forment l'ESRI d'aujourd'hui, sont dans les gènes d'institutions comme l'ESPCI ou l'Institut d'Optique. A l'Institut d'Optique mon objectif est de profiter de ce modèle très pertinent, et surtout agile car de taille raisonnable, pour former encore mieux et encore plus d'ingénieurs qui contribueront à répondre aux grands enjeux qui sont devant nous, et à transférer le plus efficacement possible le fruit de nos recherches vers la société.

COMMENT AVEZ-VOUS DÉVELOPPÉ VOS COLLABORATIONS INTERNATIONALES ?

Dans le parcours d'un chercheur, les rencontres sont déterminantes, au niveau national comme au niveau international, et une rencontre marquante fut celle avec Juan-José Sáenz (malheureusement décédé en 2020). Certains papiers que j'ai eu la chance de cosigner avec Juanjo font partie des plus

Cette culture n'est pas présente dans tous les lieux de recherche, et je me rends compte de la chance que j'ai eue d'évoluer dans des environnements décloisonnés ; décloisonnés d'un point de vue thématique, entre les sciences de l'ingénieur et la physique, entre la physique, la chimie et la biologie par exemple. Cette vision décloisonnée est, il me semble, une vision moderne de la recherche.

beaux papiers que j'ai pu écrire (ce qui ne veut pas dire qu'ils sont les plus cités). Ce qui m'a toujours plu dans notre collaboration, c'est que nous sommes parvenus à trouver un mode d'interaction où l'émulation était permanente et poussée à son paroxysme. Nous partageons un enthousiasme à la limite de l'explosif. Nous sommes allés à deux sur des sujets où nous nous ne serions jamais allés seuls. Il a très clairement influencé mes recherches, et même ma manière d'aborder les questions encore aujourd'hui. Je reste très connecté à la communauté photonique espagnole et c'est en grande partie son héritage.

Une autre rencontre importante a été celle avec John Schotland que j'ai rencontré en Chine lors d'un workshop de maths appliquées à Shanghai. Quelques années après, je l'ai invité à l'ESPCI pour un séjour de 2 mois. Il avait commencé à écrire quelques chapitres d'un potentiel livre sur l'optique diffuse. J'avais en tête de me lancer sur la rédaction d'un ouvrage sur une thématique similaire, peut-être avec un point de vue plus fondamental. Un jour, lors d'un déjeuner, il a émis l'idée de tenter de fusionner nos deux projets. Nous nous sommes donnés six mois pour converger vers une table des matières. Au bout de six mois, nous nous sommes lancés dans l'écriture, une aventure qui durera huit ans. Principles of Scattering and Transport of Light est paru en 2021, et les échos très positifs que nous recevons depuis sont une très grande satisfaction.

LA TRANSMISSION DU SAVOIR ET DES CONNAISSANCES TIENT UNE PLACE ESSENTIELLE DANS VOS ACTIVITÉS

J'aime beaucoup l'idée de transmission, mêlée à la remise en question par la

confrontation aux apprenants. J'ai toujours enseigné, même lorsque j'ai été très occupé par des fonctions de direction (bien sûr avec un volume d'heures réduit, mais jamais négligeable). Il y a des sujets que j'ai appris parce que je les ai enseignés. L'enseignement a été comme une formation continue pour moi. Dans mon activité de chercheur, je porte une très grande attention aux cours que je présente aux écoles thématiques d'hiver ou d'été. Je sais l'importance de ces écoles dans la formation des futurs ou jeunes chercheurs, et dans l'orientation de leurs recherches. Certaines écoles auxquelles j'ai participé comme jeune chercheur ont été déterminantes pour moi. Un moment marquant de ma carrière fût l'école de 15 jours aux Houches organisée en 1998 sur les ondes en milieux complexes. C'est l'école qui a soudé au niveau international la communauté sur ce sujet. D'autres ont suivi à Cargèse. Il y a des cours de cette école 1998 dont je me souviens encore aujourd'hui très bien, et plusieurs personnes que j'ai côtoyées aux Houches ont influencé la suite de ma carrière.

Je voudrais souligner également la chance que j'ai eue, dans mon métier d'enseignant-chercheur, d'avoir toujours interagi avec des élèves ingénieurs, des doctorants et des post-doctorants formidables. Enseigner, superviser des travaux de recherche, transmettre les ficelles du métier, cela nous pousse aussi en avant car les plus jeunes nous stimulent toujours pour évoluer et être en démarche permanente de progrès. Mon travail de chercheur n'aurait pas le même sens sans être accompagné de cette mission de formation, de transmission, qui au bout du compte est un partage. ●



TÉMOIGNAGE D'ENTREPRENEUR

Loïc Henriet, Pasqal

Spécialiste des systèmes quantiques en interaction, co-CEO de Pasqal, entreprise développant des processeurs quantiques à atome neutre.

<https://doi.org/10.1051/photon/202513015>

POUVEZ-VOUS DÉCRIRE VOTRE PARCOURS, VOS TRAVAUX DE THÈSE ET DE POSTDOCTORAT, AVANT D'INTÉGRER PASQAL ?

J'ai commencé par suivre un parcours d'ingénieur à l'École polytechnique. C'est là que j'ai découvert la physique quantique. Cette discipline m'a tellement intéressé que j'ai décidé de poursuivre dans cette voie en intégrant un master 2 à l'École normale supérieure, dans le programme "Concepts fondamentaux de la physique" à Paris. Par la suite, j'ai hésité entre une thèse théorique pure et une thèse liée à l'expérimentation. Finalement, j'ai choisi de retourner à l'École polytechnique pour réaliser ma thèse au Centre de physique théorique. Mon travail portait sur des méthodes théoriques permettant de décrire la dynamique des systèmes quantiques en interaction, notamment les systèmes de spin. L'objectif était de décrire la dynamique de systèmes composés de nombreux systèmes à deux niveaux en interaction, en utilisant des méthodes numériques et théoriques exactes. Ce travail était déjà en lien avec l'informatique quantique, un domaine en plein essor à cette époque, notamment pour la simulation de circuits quantiques. Ensuite, j'ai effectué un post-doctorat à l'Institut des sciences photoniques à Barcelone pendant trois ans. Cette expérience m'a permis de me rapprocher davantage de l'expérimentation. J'étudiais les effets collectifs dans des systèmes atomiques en interaction avec la lumière, à l'échelle du photon unique ou de quelques photons. L'objectif était de comprendre

comment une collection d'atomes couplés à la lumière pouvait générer des effets émergents cohérents. Ce travail m'a donné l'opportunité de collaborer avec le groupe de recherche d'Antoine Browaeys et de Thierry Lahaye à l'Institut d'Optique, les cofondateurs académiques de Pasqal. Leur équipe était à la pointe du développement de machines capables de manipuler des atomes individuels et de les disposer à des positions arbitraires. Ces systèmes étaient utilisés aussi bien pour la simulation quantique que pour l'étude des interactions lumière-matière dans des ensembles de nombreux atomes. Il se trouve que mon travail post-doctoral était en lien direct en lien avec ces thématiques. En 2019, après trois ans de post-doctorat, cette proximité thématique et mon intérêt scientifique m'ont naturellement conduit à rejoindre Pasqal, dès la création de l'entreprise, au printemps de cette année-là.

QU'EST-CE QUI VOUS A MOTIVÉ À INTÉGRER UNE ENTREPRISE SI JEUNE ?

À l'issue de mon post-doctorat, j'avais envisagé plusieurs options : rester dans le monde académique, ce qui n'est pas évident avec la pénurie de financements et de postes ; intégrer un grand groupe industriel en R&D ; ou rejoindre une start-up. J'ai toujours été attiré par l'idée de travailler dans une start-up, et Pasqal représentait une combinaison idéale entre mon domaine de recherche, que je connaissais très bien et qui me passionnait, et l'aventure entrepreneuriale. Ce choix a aussi été influencé par les personnes avec qui je travaillais. Je

connaissais bien Antoine et Thierry, et je m'entendais très bien avec Christophe, Georges, Adrien et Lucas les autres membres de l'équipe initiale de Pasqal.

QUELLES ONT ÉTÉ VOS PREMIÈRES MISSIONS AU SEIN DE PASQAL ?

Comme je n'avais pas d'expérience expérimentale sur la plateforme, j'ai d'abord contribué en tant qu'assistant sur certaines tâches pratiques, ce qui m'a permis de mieux comprendre le fonctionnement du système. Ensuite, j'ai principalement travaillé sur trois volets : comprendre et modéliser le fonctionnement de la machine, développer des couches logicielles bas niveau pour la piloter, et explorer les applications possibles de cette technologie.

POUVEZ-VOUS EXPLIQUER LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU PROCESSEUR QUANTIQUE DÉVELOPPÉ ?

Les processeurs quantiques à atomes neutres reposent sur une technologie développée à l'Institut d'Optique pendant les vingt dernières années, ainsi que dans d'autres laboratoires ayant adopté des approches similaires. Nous utilisons des atomes individuels que nous plaçons dans une enceinte à ultra-vide, avec une pression de l'ordre de 10^{-11} millibars. Nous utilisons des atomes de rubidium, que nous refroidissons et piégeons à l'aide de pinces optiques. Ces pinces sont des faisceaux laser très focalisés permettant de maintenir les atomes immobiles à des positions précises dans l'espace. Ainsi, nous pouvons ●●●

former des réseaux de dizaines, voire de centaines d'atomes.

ET COMMENT CRÉEZ-VOUS LES QUBITS AVEC CES ATOMES ?

Nous utilisons un système laser pour isoler deux niveaux électroniques particuliers des atomes de rubidium et générer des transitions entre ces niveaux. Un de ces niveaux représente l'état 0 du qubit et l'autre l'état 1. L'information quantique est ainsi encodée et manipulée.

COMMENT L'INTRICATION EST-ELLE CRÉÉE ENTRE CES QUBITS ?

Nous exploitons une interaction native entre les atomes lorsqu'ils sont excités dans un état de Rydberg, où leur électron est très éloigné du noyau. Cette interaction dipôle-dipôle de type Van der Waals permet d'engendrer une intrication entre les atomes. Pour la lecture, nous utilisons une technique de mesure par fluorescence. Un système d'imagerie collecte la lumière émise par les atomes sur une caméra CCD, ce qui permet d'obtenir les informations nécessaires sur leur état.

COMMENT FONCTIONNE L'INTERFACE ET SUR QUELS ALGORITHMES REPOSENT CES NOUVEAUX CALCULATEURS ?

Il y a deux sujets principaux ici : d'une part, l'accessibilité et la pile logicielle, et d'autre part, les algorithmes. Sur l'algorithme, la logique de l'algorithme quantique est fondamentalement différente de celle des algorithmes classiques. Elle est plus riche, ce qui implique le développement de nouveaux algorithmes et routines de calcul. Il existe donc des langages et des méthodes pour décrire ces algorithmes, qui ont émergé au cours des dernières années. En revanche, la pile logicielle reste assez standard. En général, les gens utilisent des bibliothèques Python, qui sont des points d'accès standards, utilisables par tous. Grâce à ces bibliothèques, il est possible de créer des algorithmes quantiques. Ces derniers, qui reposent sur cette nouvelle logique, sont ensuite envoyés *via*

le cloud, en utilisant des technologies de cloud computing standards. Ainsi, il y a deux aspects à considérer : l'aspect « accessibilité logiciel », qui reste classique dans son approche, et l'aspect « algorithmique », où les algorithmes quantiques ont des spécificités.

QUELLES ONT ÉTÉ LES PRINCIPALES ÉTAPES DE DÉVELOPPEMENT DE L'ENTREPRISE DEPUIS SA CRÉATION EN 2019 ?

La première étape a consisté à reproduire ce qui existait déjà dans les laboratoires académiques. Nous avons pris une machine existante en laboratoire et nous avons essayé de la reproduire dans un autre contexte. Nous n'avons rien changé au design, nous avons simplement cherché à le faire plus rapidement. La première machine a donc été une réplique de celle des laboratoires. Cela a permis de montrer que nous étions capables de faire cela dans un environnement autre que celui d'un laboratoire de recherche.

Ensuite, nous avons entamé une première phase d'industrialisation. Nous avons fiabilisé certains systèmes, réécrit le code de contrôle et mis cette machine sur le cloud. À ce moment-là, elle était encore chez nous, mais nous avons rationalisé certains éléments pour les rendre plus fiables et répliquables. En laboratoire, les bancs optiques sont souvent construits de manière ouverte, permettant de les modifier selon les besoins. Cela favorise l'expérimentation et la recherche. Nous, en revanche, savions exactement ce que nous voulions faire, ce qui nous a permis de limiter les degrés de liberté et d'aboutir à des éléments plus fiables.

Maintenant, nous sommes dans une phase où nous pouvons produire des machines en parallèle, y compris en pré-série. Ces machines sont fabriquées par des personnes qui n'ont pas de formation en physique quantique. Cela montre l'évolution de notre capacité d'industrialisation : nous ne dépendons plus de notre expertise pour construire ces machines et pouvons en produire plusieurs simultanément.

EN TERMES DE CROISSANCE ORGANIQUE, Y A-T-IL EU DES ÉTAPES PARTICULIÈRES ?

Tout à fait. En tant que start-up, notre objectif est de croître rapidement et de nous concentrer sur notre domaine. Nous avons rapidement passé le cap de quelques personnes à une équipe d'une vingtaine, voire une trentaine de personnes, principalement techniques. Cela nous a permis de réaliser les premières démonstrations avec des clients intéressés par nos machines, ce qui a facilité notre levée de fonds. En janvier 2023, nous avons levé 100 millions d'euros, ce qui a marqué une phase importante de croissance pour accélérer notre développement industriel et augmenter notre capacité à produire des machines et à travailler avec un nombre plus important de clients.

Aujourd'hui, nous sommes 320 personnes, réparties entre la région parisienne (à Palaiseau), une équipe à Amsterdam pour le développement des algorithmes, et une présence en Amérique du Nord, au Québec.

VOUS VOUS ÊTES INTERNATIONALISÉS EN QUELQUES ANNÉES, QUELLES SONT LES RAISONS DE CE CHOIX ?

Il y a eu plusieurs opportunités à l'international, et l'Amérique du Nord, notamment le Canada et le Québec, a été un point d'entrée naturel pour nous. Nous avons déjà des liens avec l'université de Sherbrooke dans le cadre de partenariats académiques, ce qui a facilité notre implantation là-bas pour y développer notre deuxième centre hardware.

L'équipe à Amsterdam a été mise en place après l'acquisition d'une entreprise spécialisée dans le développement d'algorithmes quantiques, juste avant notre levée de fonds. Cette acquisition nous permet d'avoir une solution complète allant du hardware à l'applicatif. Il est important pour nous de rester en contact direct avec les utilisateurs, et cela nécessite que nous développions des algorithmes

quantiques spécifiques à nos machines. Cela nous permet de mieux comprendre leurs besoins et d'accélérer notre développement. C'est pourquoi nous avons l'impératif de couvrir l'intégralité de la pile logicielle, du qubit à l'applicatif.

AVEZ-VOUS DES COLLABORATIONS AVEC LE MONDE ACADÉMIQUE ?

Oui, tout à fait. Avec le monde académique, nous avons des liens très forts, car c'est vraiment une approche complémentaire au développement de technologies dans l'informatique quantique. Nous avons vocation à construire et industrialiser des produits, tandis que le monde académique explore des pistes plus risquées, mais qui peuvent potentiellement aboutir à des ruptures technologiques plus fortes. Nous avons donc de nombreuses collaborations académiques, et les plus fortes sont en France, notamment avec l'Institut d'Optique. Nous sommes en phase de création d'un laboratoire commun entre l'Institut d'Optique, le CNRS, l'Université Paris-Saclay et Pasqal. Ce laboratoire est une entité qui rassemble des moyens et des personnes provenant de chaque côté : des personnes de chez Pasqal, du matériel provenant de chez Pasqal, et de l'autre côté des thésards, des post-docs et des chercheurs, tous travaillant dans une structure commune sur des projets qui sont à la convergence de nos intérêts et de ceux de l'Institut d'Optique et des groupes de recherche.

Nous bénéficions évidemment du travail fait dans ce laboratoire de recherche, mais dans l'autre sens, cela fonctionne aussi. Quand nous fiabilisons ou développons une nouvelle brique technologique et que celle-ci retourne dans le laboratoire, cela permet de bénéficier d'une plus grande puissance d'ingénierie pour explorer de nouveaux phénomènes. Nous constatons également un retour en termes de performance du côté du laboratoire académique. C'est donc une relation très fructueuse. Nous avons

d'autres collaborations académiques, notamment avec le LKB à Paris, ainsi que d'autres relations en France et en Europe avec des acteurs universitaires comme l'INRIA, le CEA, et des laboratoires CNRS.

COLLABOREZ-VOUS AVEC LES AUTRES ACTEURS INDUSTRIELS DE CETTE AVENTURE INDUSTRIELLE LIÉE AU QUANTIQUE ?

Oui, nous collaborons avec plusieurs entreprises, par exemple Qubit Pharmaceuticals, qui travaille sur la découverte de nouveaux médicaments à l'aide de l'informatique quantique, ainsi qu'avec WeLinq, qui développe une mémoire quantique à base de rubidium, pour voir comment nous pourrions interconnecter des processeurs quantiques sur le long terme. À l'international, nous collaborons avec d'autres start-ups et grands groupes, comme IBM. Ce dernier est une figure historique de l'informatique quantique, ayant été l'un des premiers à mettre un ordinateur quantique sur le cloud, avec une technologie de qubits supraconducteurs. Nous travaillons avec eux sur l'élaboration d'interfaces communes entre nos processeurs et leurs processeurs. De nombreux fournisseurs de matériel quantique développent leur propre méthode de programmation pour un processeur quantique. Nous pensons qu'il est contre-productif de multiplier ces différentes approches et qu'il serait plus efficace de simplifier l'accès pour les utilisateurs, afin que, lorsqu'un utilisateur utilise un processeur quantique IBM, il puisse choisir plus tard d'utiliser un processeur Pasqal sans que cela soit trop contraignant. Nous avons donc tout intérêt à fédérer l'écosystème en simplifiant les interfaces, et nous travaillons avec IBM pour élaborer un ensemble d'interfaces communes entre nos technologies et les leurs.

QUELLES SONT LES PERSPECTIVES EN TERMES DE PERFORMANCES DES CALCULATEURS ?

AVEZ-VOUS UN CALENDRIER DE DÉVELOPPEMENT À L'HORIZON DE 3 OU 10 ANS ?

Oui. En termes de performance, nos machines sont encore imparfaites, elles comportent des erreurs, mais nous pouvons travailler sur les métriques: le nombre de qubits, la qualité des opérations et le taux de répétition, afin d'améliorer ces machines pour les rendre plus performantes. Nous avons une roadmap assez agressive en termes de développement technologique, car il y a encore beaucoup de gains à engendrer. Par exemple, notre taux de répétition actuel est de l'ordre de 5 Hz, c'est-à-dire 5 opérations par seconde, mais avec quelques optimisations, nous pouvons atteindre le kHz. Il n'y a pas de barrière physique pour y parvenir. Nous avons des objectifs assez ambitieux en termes de performance, et nous travaillons pour les atteindre dans les 3 à 5 prochaines années. À terme, nous pourrions avoir des machines capables de réaliser des centaines de Hz avec une fidélité des opérations à 99,9%. Ce seraient des machines très performantes, mais elles ne seraient toujours pas capables d'implémenter les algorithmes de Shor ou de Grover, qui ont été développés dans les années 1990 et qui auront un impact économique majeur. Pour implémenter ces algorithmes, nous avons besoin de mettre en place des codes de correction d'erreurs. La correction d'erreurs quantiques est un défi majeur, car mesurer un système quantique le détruit et il est impossible de copier un système quantique (selon le théorème de No-Cloning). Cela rend la correction d'erreurs très difficile. Des solutions existent, mais elles nécessitent beaucoup de ressources, en termes de nombre de qubits et d'opérations. Nous avons donc une roadmap à plus long terme pour développer des ordinateurs quantiques tolérants aux fautes, capables de corriger activement les erreurs. Notre objectif à l'horizon 2031-2033 est d'avoir un ordinateur quantique tolérant aux fautes, capable d'implémenter ces algorithmes très impactants. ●