

➤ la résolution demanderait un temps considérablement plus long avec un ordinateur classique.»

C'est ce que revendique Google...

Alain Aspect : Oui, mais, d'une part, le problème qu'ils disent avoir résolu est sans utilité, et, d'autre part, ils n'ont pas préparé eux-mêmes ce problème. Schématiquement, ils ont connecté leurs circuits quantiques et observé un résultat sur une configuration déterminée plus par le système que par eux, et ont mis au défi des ordinateurs classiques de calculer ce résultat... Je reconnaitrai volontiers un avantage quantique le jour, sans doute pas très lointain, où le problème résolu d'une façon beaucoup plus efficace qu'avec un ordinateur classique aura un minimum d'utilité, comme celui du voyageur de commerce (trouver le chemin le plus court passant par plusieurs villes) et sera choisi par un tiers. Aujourd'hui, nous avons une magnifique expérience, mais qui n'a pas dépassé une étape intermédiaire.

Google la présente aussi comme un générateur de nombres aléatoires, mais il y a tellement plus simple pour obtenir un nombre aléatoire avec un système quantique ! Un photon envoyé sur une lame semi-réfléchissante va soit la traverser et être détecté dans la voie transmise, et vous notez le résultat 1, soit être réfléchi et détecté dans la deuxième voie, et vous avez un 0. En recommençant l'opération, vous obtenez un nombre aléatoire, sous forme binaire, aussi grand que vous le souhaitez ! Le comportement du photon est totalement imprévisible, car dans le cas contraire, des variables cachées existeraient dans le système quantique. Or plusieurs expériences, dont celles menées à l'Institut d'optique, montrent que ce n'est pas le cas.

Dans ce domaine, on distingue simulateur quantique et ordinateur quantique. Quelle est la différence ?

Alain Aspect : Elle se situe entre le réel imparfait et le théoriquement parfait. Le domaine du calcul quantique en général a été initié par Richard Feynman en 1982, quand il a réalisé que l'intrication est un phénomène révolutionnaire dont il avait jusque-là sous-estimé l'importance. Dès lors, il lance les premières idées sur le calcul quantique, qui sont d'abord celles d'un simulateur quantique : simuler sur un ensemble de particules quantiques faciles à observer et à manipuler un ensemble de particules intriquées difficiles à observer et à manipuler, et dont il est impossible de calculer le comportement,

comme des électrons dans un matériau. Un des meilleurs exemples de simulateur est un ensemble d'atomes ou d'ions ultra-froids que l'on sait aujourd'hui très bien contrôler et observer avec des lasers.

Les grands progrès qui ont suivi l'article initial de Feynman ont été la découverte de l'algorithme de Shor et d'autres, comme l'algorithme de Grover, qui permet de chercher rapidement un élément dans une base de données. Au milieu des années 1990, ces avancées se sont faites sur la base d'un ordinateur quantique parfait. Aura-t-on un jour un ordinateur quantique parfait et universel ? La réponse est évidemment non. Mais des théoriciens, là encore extrêmement créatifs, ont imaginé des codes correcteurs quantiques d'erreur, analogues à ceux qui existent dans nos ordinateurs classiques. Cette découverte fut une grande surprise puisque beaucoup de spécialistes pensaient que la décohérence empêcherait d'y parvenir.

Mais le coût à payer est très élevé ! Pour simuler un bit quantique parfait avec des bits quantiques réels, même avec les meilleurs disponibles aujourd'hui, il n'en faut pas deux ni même 10, mais 1000, voire 10000. Pour un ordinateur quantique à 100 qubits parfaits, prévoyez probablement un million, peut-être un peu plus, de qubits réels de très bonne qualité. Or, le record du monde est de l'ordre de 50 aujourd'hui.

L'ordinateur quantique universel est-il donc hors de portée ?

Alain Aspect : Ma position sur le sujet ressemble à celle que j'avais il y a quarante ans sur la détection des ondes gravitationnelles. Je regarde le problème en tant que physicien, et je constate qu'aucune loi physique fondamentale ne fait obstacle à sa résolution. C'est bien le cas de l'ordinateur quantique parfait. Rien ne l'interdit, mais quand on contemple les sauts technologiques à accomplir, on ne voit pas bien aujourd'hui à quelle échéance on y parviendra. J'ai l'intime conviction que c'est une affaire de décennies.

Je peux toutefois me tromper. Demain, un progrès inattendu, par exemple dans la compréhension des espaces de Hilbert dans lesquels sont décrites les particules intriquées, peut changer la donne. En attendant, on essaye d'utiliser au mieux les simulateurs quantiques qui fonctionnent avec des qubits imparfaits, et profiter d'une percée conceptuelle due notamment à John Preskill, lui aussi à l'Institut de technologie de Californie (et inventeur du terme de suprématie quantique) : on peut

faire des choses intéressantes avec une évolution des simulateurs quantiques qu'il nomme des *noisy intermediate scale quantum computers* (NISQ)*, c'est-à-dire des ordinateurs quantiques imparfaits de taille intermédiaire. On peut espérer résoudre un certain nombre de problèmes avec des ordinateurs de ce type. Et tout un essaim de start-up se crée sur cette idée.

Que proposent-elles ?

Alain Aspect : L'idée de ces start-up est de reprendre des montages complexes de laboratoire manipulés par plusieurs docteurs ès sciences et ingénieurs, de les rendre fiables et faciles d'utilisation par des non-spécialistes afin de résoudre des problèmes d'optimisation, comme celui du voyageur de commerce déjà évoqué et celui, que je trouve particulièrement intéressant, de la grille électrique. Dans une zone où la production d'électricité est décentralisée (centrales nucléaires, photovoltaïque, éolien, hydraulique...) et où la consommation varie selon l'endroit, le moment de la journée, les saisons, il s'agit d'optimiser la distribution pour satisfaire tout le monde.

C'est un problème majeur à l'heure du réchauffement climatique, dont le calcul avec un ordinateur classique est très gourmand en temps. Or la réponse doit être rapide, de l'ordre de la minute. On a des raisons de penser que l'on peut aborder ce genre de problèmes avec des NISQ. Pour ce faire, vous devez maîtriser quelques dizaines de qubits intriqués. C'est le cas, par exemple ici, à l'Institut d'optique d'Antoine Browaeys et son équipe, qui contrôlent une cinquantaine d'atomes de Rydberg intriqués. Une start-up va bientôt commercialiser un tel système pour le mettre à la disposition de clients. Les fournisseurs d'énergie sont intéressés.

D'autres exemples de calculateurs NISQ reposent sur des ions, des circuits supraconducteurs, des photons... et de plus en plus de chercheurs se lancent dans la création de start-up afin de rendre disponibles des machines permettant de résoudre des problèmes réels. Cette démarche est extrêmement intéressante.

D'ailleurs, puisque l'on parle de réchauffement climatique, on peut envisager l'avantage quantique sous un autre angle. Imaginez un ordinateur quantique qui en performance serait équivalent aux machines classiques, mais en consommant cinq fois moins d'énergie. Ce serait aussi un sérieux avantage.

Toutes ces idées sont dans l'air et en cours d'évaluation dans le monde entier, aux États-Unis, au Canada, en Chine, en

Allemagne, en Suède, en France... Et selon moi, d'ici cinq ans, nous saurons si elles ont des chances d'aboutir à des machines vraiment fiables, «presse-bouton», qui pourront se confronter à de vrais problèmes.

Justement, quelle est la situation en France ?

Alain Aspect : Dès que j'en ai l'occasion, je plaide auprès des responsables politiques qui veulent bien m'écouter en leur demandant d'accompagner le mouvement. S'il débouche vraiment sur des applications utiles, ce serait dommage que la France ait raté ce train alors qu'elle a des laboratoires et des chercheurs académiques au meilleur niveau et un certain nombre de start-up en train de démarrer. Pour l'instant, nous n'accusons pas un retard important. Et un grand programme quantique est attendu, suite au rapport «Quantique, le virage technologique que la France ne ratera pas», rédigé par l'ancien PDG de Safran – Jean-Paul Herteman, la députée Paula Forteza et le chercheur Ionadis Kerenidis. Toute une communauté espère une décision rapide.

L'Europe a déjà mis de l'argent sur la table, mais chaque pays développe en plus son propre programme et c'est ce que nous attendons du gouvernement: qu'il débloque rapidement un peu d'argent pour le monde académique et lui permette de rester dans la course, à côté des filières industrielles qui investissent des sommes importantes. Les programmes nationaux apportent une agilité indispensable face aux évolutions rapides du domaine. En six mois, une voie de recherche peut se boucher et une autre, inattendue, s'ouvrir: on doit pouvoir réagir très vite.

En France, il n'est pas nouveau que l'on soit bon sur le plan académique, mais aujourd'hui, la situation est vraiment favorable à l'émergence de start-up en lien étroit avec ces groupes académiques, ce qui se fait depuis toujours aux États-Unis mais qui est relativement inédit dans notre pays. On a vraiment changé d'atmosphère. Des liens entre l'entrepreneuriat et l'université se tissent, se renforcent... et je suis certain que les technologies quantiques vont rapidement avoir des applications concrètes dans plusieurs domaines.

Lequel par exemple ?

Alain Aspect : En métrologie quantique, on peut citer la mesure des accélérations, y compris celle de la pesanteur, par interférométrie atomique avec des atomes ultrafroids. À Bordeaux, Bruno Desruelle,

un de mes anciens étudiants, a fondé la start-up μ Quans avec Arnaud Landragin et Philippe Bouyer, deux chercheurs restés dans le domaine académique, pour développer des appareils capables de mesurer la gravitation. Avec un poids inférieur à 100 kilogrammes et quelques dizaines de centimètres de longueur, ces

La découverte des codes correcteurs quantiques d'erreur fut une surprise, la plupart des spécialistes pensant que la décohérence empêcherait d'y parvenir

dispositifs ont une précision égale à celle d'appareils traditionnels pesant une tonne et mesurant un mètre cube. Ils sont donc mobiles et transportables partout où l'on souhaite connaître la structure du sous-sol (géophysique, exploration minière, génie civil...) par le biais d'une mesure locale de la gravitation.

Une telle diversité d'applications était-elle envisageable au début de votre carrière ?

Alain Aspect : Absolument pas ! Dans les années 1970, c'est par pure curiosité intellectuelle que j'ai commencé à m'intéresser à l'optique quantique, c'est-à-dire l'étude des propriétés de la lumière dans lesquelles intervient la physique quantique. Cela m'a permis de développer au début des années 1980 une expérience montrant que l'intrication quantique est aussi extraordinaire que la théorie le prévoit. Tellement extraordinaire qu'Einstein lui-même avait du mal à l'admettre.

À mes débuts, c'était un pur problème conceptuel: peut-on observer les propriétés de l'intrication qui défient tellement l'intuition ? J'étais loin de pouvoir ne serait-ce qu'imaginer cette explosion d'idées d'applications autour de l'intrication. J'en suis aujourd'hui émerveillé !

PROPOS RECUEILLIS PAR LOÏC MANGIN

BIBLIOGRAPHIE

Deux MOOC (EN Anglais).
Quantum Optics 1: Single Photons: <http://bit.ly/3cGPfNH>
Quantum Optics 1: Two photons and more: <http://bit.ly/2VTq5p6>

Les intrigantes intrications DU monde quantique, podcast, *La Conversation scientifique*, France culture, 29 février 2020. <http://bit.ly/2vOIZTs>

Site d'Alain Aspect: <http://bit.ly/38w8S7F>