

SCIENCES

Alain Aspect

« J'aurais adoré dialoguer avec Einstein »





REPÈRES

1947 Naissance d'Alain Aspect à Agen (Lot-et-Garonne).

1992 Directeur de recherche au CNRS à l'Institut d'optique, où il sera directeur adjoint jusqu'en 1994.

1994 Professeur à l'École polytechnique.

2022 Prix Nobel de physique grâce à ses expériences clés, menées quarante ans plus tôt, qui ont confirmé l'existence de l'intrication quantique.

2024 Organise un symposium, « Quantum et climat », pour explorer le potentiel des technologies quantiques face aux défis du changement climatique.

Vertigineux. Alain Aspect, Prix Nobel de physique 2022 pour ses travaux sur l'intrication quantique, dans le hall des éditions Odile Jacob, le 19 décembre.

EXCLUSIF

Visionnaire. Le Prix Nobel de physique publie *Si Einstein avait su* (Odile Jacob). IA, recherche, climat, il décrypte les enjeux colossaux de la physique quantique.

PROPOS RECUEILLIS PAR GUILLAUME GRALLET
ET HELOÏSE PONS

Croire à ses intuitions envers et contre tous. Tel pourrait être le mantra d'Alain Aspect, un des plus grands experts mondiaux du quantique, cette science de l'infiniment petit en passe de révolutionner le monde. On s'en rend compte, en passant deux heures à ses côtés : de ses parents instituteurs dans le Lot-et-Garonne, l'homme, auteur de *Si Einstein avait su* (Odile Jacob), a gardé le goût de la transmission. L'envie de communiquer sa passion caractérise en effet le lauréat 2022 du prix Nobel de physique, qu'il a reçu avec l'Américain John F. Clauser et l'Autrichien Anton Zeilinger. Tous trois ont été récompensés pour leurs travaux sur l'intrication quantique, qui démontre que deux particules quantiques sont parfaitement corrélées, quelle que soit la distance qui les sépare.

Car le scientifique, par ailleurs grand amateur de foie gras – il le prépare lui-même –, n'est pas seulement un éminent physicien. Il n'a pas peur de se frotter au monde de l'entreprise. Ayant participé à la création de Pasqal, une start-up pionnière de l'ordinateur quantique, il en est convaincu : la physique doit quitter les labos pour atterrir dans nos vies. Ce chercheur contribue à façonner l'avenir d'une technologie qui pourrait faire exploser la puissance de calcul des machines. D'autres jeunes pousses, comme Quandela (*lire p. 82*) et Weling, bénéficient de ses conseils scientifiques.

Professeur à Polytechnique et à l'Institut d'optique, le résident du plateau de Saclay incarne ce rare équilibre entre science et entreprise. Un enjeu de souveraineté, alors que la course à la suprématie quantique est devenue un enjeu de puissance et que la Chine et les États-Unis se livrent une bataille sans merci pour l'atteindre. Car celui ...

KHAÏN RENAUD POUR « LE POINT »

... qui dominera le quantique dominera aussi le monde, tant les applications potentielles sont diverses et fascinantes, allant de la découverte de médicaments à la création de nouvelles batteries en passant par l'optimisation de flux et la gestion de problèmes industriels complexes. Écouter Alain Aspect, c'est comprendre comment la science d'aujourd'hui construit les révolutions de demain.

Le Point: Votre nouveau livre représente-t-il une somme de votre carrière ?

Alain Aspect: Ce livre est le fruit d'une réflexion de quinze ans. C'est un ouvrage de vulgarisation de bon niveau, accessible à condition de le lire avec attention. Il contient aussi ma vision personnelle de la science. Sans en faire un testament scientifique, j'y expose ma conception de la recherche.

Comment êtes-vous devenu physicien ?

Mon parcours est atypique. Originaire d'un petit village du Lot-et-Garonne, je n'ai pas suivi la voie classique des grands lycées parisiens. Je suis entré par une voie alternative, l'École normale supérieure de l'enseignement technique, alors considérée comme une école de second rang, ce qui n'est plus le cas aujourd'hui – elle est devenue l'ENS Paris-Saclay. Je me suis longtemps senti un statut d'outsider dont je suis plutôt fier. Un de mes professeurs de lycée, Maurice Hirsch, à Agen, a été déterminant dans mon déclic pour la physique, en me transmettant sa vision de la discipline. La physique, c'est l'art de décrire les phénomènes en les mathématisant suffisamment pour que la description soit quantitative

« Il n'y a pas de magie dans l'univers, chaque phénomène a une explication. »

et précise, mais avec des mathématiques suffisamment simples pour qu'on puisse résoudre les équations. Je suis convaincu qu'il n'y a pas de magie dans l'univers – chaque phénomène a une explication.

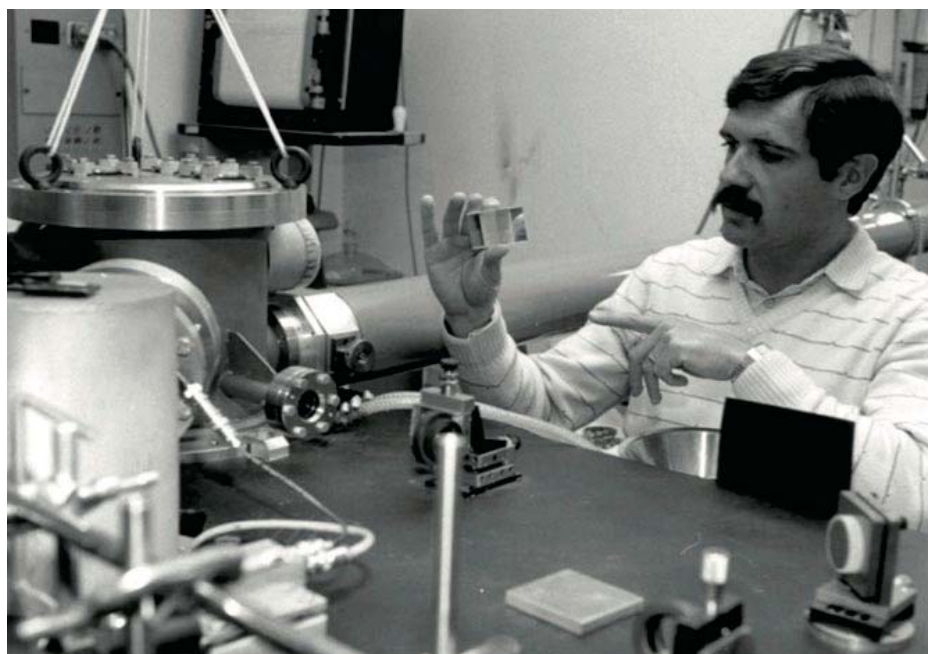
Donc, pas de place pour un Dieu créateur dans cette conception du monde ?

Je n'ai aucun doute, aucune interrogation personnelle là-dessus. Pour moi, le but de la physique, c'est d'arriver à donner une explication cohérente à des choses surprenantes. Je connais des physiciens complètement croyants, mais ils mettent une barrière étanche entre leur croyance et leur pratique de physicien.

Dans « Si Einstein avait su », vous voulez réhabiliter le rôle de ce scientifique dans la compréhension de la mécanique quantique...

Contrairement à l'idée reçue propagée par certains physiciens selon laquelle Einstein n'a jamais rien compris à la mécanique quantique, il en a été l'un des pionniers les plus lucides. Ses contributions ont été fondamentales. En 1900,

Max Planck avait introduit la notion de quanta d'énergie pour expliquer le spectre du rayonnement du corps noir, mais il était mal à l'aise avec ce concept. Et il n'était pas le seul : comme l'explique le remarquable livre de Douglas Stone *Einstein and the Quantum*, les autres physiciens rechignaient aussi à en parler, comme s'il s'était agi d'un secret de famille à taire lors des repas. Albert Einstein a été le premier à prendre cette notion de quantum vraiment au sérieux et à en saisir toute la portée. Il fut aussi le premier à parler de dualité onde-corpuscule, dès 1909. Et, en

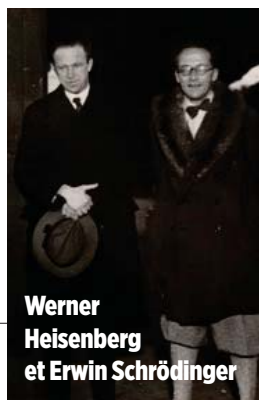


1916, il établit les équations décrivant les interactions entre lumière et matière, celles-là mêmes que j'enseigne à mes étudiants de Polytechnique pour décrire le laser. J'aurais adoré parler au Einstein jeune, car il avait une formidable audace intellectuelle! Ce qu'il théorise entre 1900 et 1925 est absolument éblouissant.

Et pourtant, Einstein a fait fausse route à un moment donné...

À partir de 1925, les physiciens ont disposé d'un formalisme mathématique censé décrire de façon quantique la matière et ses interactions. Mais, pour devenir opératoire—c'est-à-dire correctement utilisable—, cet édifice théorique exigeait aussi un travail d'interprétation, que les physiciens eurent les pires difficultés à mener à bien: comment re-

Labo. Alain Aspect mène une expérience avec un cube polariseur à l'Institut d'optique, en décembre 1981.



Werner Heisenberg et Erwin Schrödinger

lier les résultats des calculs aux mesures? Quels types de discours sur la réalité cette nouvelle physique autorise-t-elle? C'est autour de ces questions qu'Albert Einstein et Niels Bohr, le fondateur de l'école de Copenhague, se sont affrontés. Einstein louait l'efficacité opératoire de la physique quantique, mais il y avait un mais: à ses yeux, une théorie physique ne devait pas être jugée à la seule aune de son efficacité opératoire, elle devait dépeindre les structures intimes du réel tel qu'il existe indépendamment de nous, ce qu'il appelait la «vérité objective». Or, selon lui, la physique quantique ne faisait pas bien cela car elle ne prenait pas en compte certains éléments de réalité. Elle était «incomplète». Bohr réfutait l'existence d'une réalité objective, indépendante des appareils de mesure que nous utilisons pour la connaître. Selon lui, ce qu'une théorie physique peut prétendre décrire, ce sont seulement des phénomènes incluant dans leur définition le contexte expérimental qui les rend manifestes.

Ce désaccord était philosophique, il ne portait que sur la question de savoir ce qu'on est en droit d'attendre d'une théorie physique. Mais, en 1964, grâce à un travail extraordinaire mené par John Bell, un physicien théoricien irlandais, il devint possible d'envisager des situations expérimentales où la physique quantique donnerait des prédictions différentes d'une théorie prétendant la compléter, par exemple en introduisant des «variables cachées». C'est ce qu'on appelle les «inégalités de Bell», et la controverse entre Bohr et Einstein allait pouvoir être tranchée en laboratoire! Excité par cet enjeu, j'ai mené avec mon équipe (après les physiciens John Clauser et Stuart Freedman) une série d'expériences avec des photons qui montrèrent que les prédictions de ●●●



Apport: Première explication correcte de la struc-

damentale dans la nature et ouvre la voie à la

1982 Alain Aspect
Découverte • Démonstra-

SCIENCES

... la physique quantique – qui décrit des phénomènes étranges comme l'intrication, où deux particules semblent se comporter comme une seule, même à distance – étaient exactes, contrairement aux théories alternatives dans l'esprit des idées d'Einstein.

Imaginez-vous face à Einstein: qu'est-ce que vous lui diriez ?

Je lui rappellerais ce qu'il a découvert : que, dans certaines situations, deux particules qui ont interagi dans le passé ont des liens que leur distance mutuelle, aussi grande soit-elle, n'affaiblit pas. Mais, contrairement à ce qu'il pensait, ce qui arrive à l'une des deux est irrémédiablement « intriqué » à ce qui arrive à l'autre par l'entremise d'une connexion étrange, sans équivalent dans le monde ordinaire. La paire formée par les deux particules a des propriétés globales que n'ont pas les particules individuelles. Le tout qu'elles forment est plus que l'ensemble de ses parties, et les mesures faites sur chacune d'elles peuvent influencer instantanément les propriétés des autres. Je lui expliquerais donc qu'on ne peut pas, comme il aurait aimé le faire, compléter la mécanique quantique avec des variables cachées locales qui auraient pu expliquer la corrélation des photons intriqués en respectant son point de vue sur le monde, le réalisme local. C'est ce qu'ont démontré les expériences de Clauser, les miennes, et bien d'autres depuis.

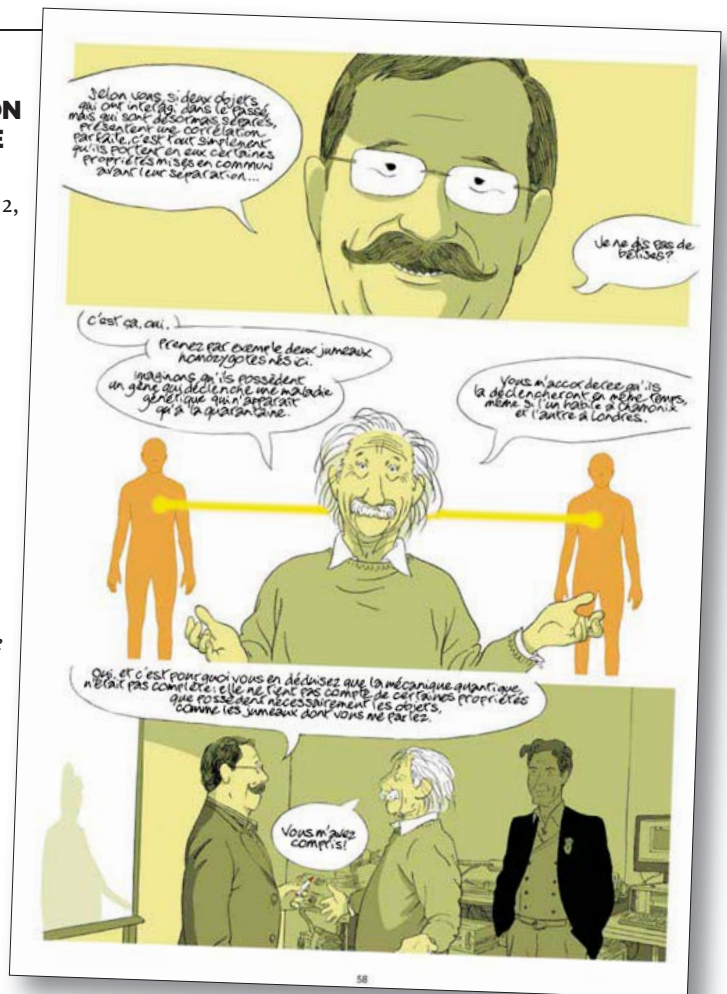
Comment votre travail de thèse a-t-il été reçu par la communauté scientifique ?

Il y a eu une évolution spectaculaire. En 1974, on se moquait de mon sujet, considéré comme sans intérêt par beaucoup. Certains pensaient que ce que je démontrerais, en cas de succès de l'expérience, serait simplement la linéarité de la physique quantique, déjà prouvée par les interférences de particules. Mais, entre 1974 et 1983, il y a eu un basculement de la communauté scientifique,

L'INTRICATION DÉMONTRÉE

Alain Aspect a confirmé, en 1982, l'intrication quantique, un phénomène où deux particules qui ont été en interaction dans le passé gardent un lien, quelle que soit la distance qui les sépare. Cette découverte contredit Einstein, qui parlait ironiquement d'« action fantôme à distance ». Pour ce faire, Alain Aspect a mené une expérience qui montre que les inégalités de Bell peuvent être prises en défaut, ce qui exclut l'existence de variables cachées locales.

Ci-contre, un extrait de la BD *L'Éternité béante*. Et si Einstein revenait ?, d'Étienne Klein, Laurent-Frédéric Bollée et Christian Durieux (Futuropolis/Les Liens qui libèrent), qui imagine une rencontre entre les deux physiciens.



qui a compris que la question de l'intrication quantique était d'une nature différente. Le jour de ma soutenance de thèse, en 1983, l'amphithéâtre de l'Institut d'optique, à Orsay, était tellement plein que les gens n'arrivaient pas à entrer.

Avez-vous douté, pendant cette période ?

J'ai parfois douté de l'intérêt de mon sujet. Mais l'avantage d'être expérimentateur, c'est d'être constamment confronté à des problèmes pratiques immédiats : une fuite à réparer, une électronique trop bruyante, une boucle de masse à

CARLO/SORGE/SIPA - ALAMY STOCK PHOTO/ABACA

identifier. Si, à la fin de la journée, vous avez réglé votre problème, vous êtes content parce que vous l'avez résolu et, si vous ne l'avez pas fait, c'est ça qui vous obsède. Pas de savoir qui d'Einstein ou de Bohr avait raison. La physique expérimentale, ce n'est pas toujours de la haute voltige.

C'est l'une de mes visions de la physique : quel que soit le phénomène que j'ai devant moi, j'essaie de le comprendre sur la base des lois de la physique. Quand j'ai construit mon expérience, je voulais être sûr que la plaque que j'allais déposer sur le sable ne touche pas aux bords parce qu'il risquait d'y avoir des vibrations. C'est parce que je connaissais la propagation des ondes acoustiques dans les métaux que je me préoccupais de ce problème. Quand je me balade et que je vois un arc-en-ciel, je ne peux pas m'empêcher de penser à l'explication donnée par Descartes. Pour moi, le monde s'explique par les lois de la physique. Et les problèmes technologiques, on les règle parce qu'on comprend ces lois.

Si vous aviez 25 ans et un budget illimité, sur quel sujet de recherche vous concentreriez-vous aujourd'hui ?

Un de mes excellents thésards, Antoine Browaeys, est venu me voir il y a quelques années en me disant : « Quand j'étais étudiant, on avait deux sujets mythiques : la mise en évidence du boson de Higgs et la détection des ondes gravitationnelles. Les deux problèmes sont résolus. Que reste-t-il comme sujet ambitieux ? » J'ai répondu : « Ce sur quoi tu travailles déjà, l'ordinateur quantique. » Celui-ci repose sur la manipulation de qubits, unités d'information utilisant les principes d'intrication et de superposition quantiques, offrant des capacités de calcul extraordinairement plus grandes que les ordinateurs classiques. C'est une question fondamentale pour plusieurs raisons : nous ne savons pas où cela va nous mener, nous ignorons s'il pourra tenir ses promesses et nous



ALAIN ASPECT AU PARIS- SACLAY SUMMIT

IA, climat, théorie quantique, médecine... La 2^e édition de l'événement organisé par *Le Point*, qui se tiendra les 12 et 13 février 2025 à l'EDF Lab, à Palaiseau, invite Prix Nobel, scientifiques et décideurs à réfléchir aux grands défis de notre temps. **Alain Aspect, Prix Nobel de physique 2022, participera le 13 février à 16 h 30 à une table ronde :** « Dualité onde/corpuscule, intrication, téléportation : quand la théorie quantique s'oppose au sens commun ».

Inscriptions :
evenements.lepoint.fr/paris-saclay-summit

ne savons pas si les obstacles sont purement technologiques ou s'il existe une limite fondamentale. C'est le grand mystère actuel de la physique : quelle est la limite entre le monde classique et le monde quantique ? J'en profite pour dire qu'on parle d'avantage quantique pour la possibilité de faire des calculs impossibles avec des ordinateurs classiques, mais on peut aussi penser à la possibilité de faire des calculs complexes mais accessibles à l'ordinateur classique en dépensant beaucoup moins d'énergie, ce qui est un des enjeux du siècle.

Pourquoi est-ce si difficile de créer un ordinateur quantique ?

Le défi principal est d'obtenir un nombre suffisant de bits quantiques (qubits) intriqués qu'on peut manipuler sans décohérence, c'est-à-dire sans que les phénomènes de superposition et d'intrication disparaissent. Plusieurs approches sont en développement. Alice & Bob travaille sur des objets quantiques artificiels, construits avec de la microélectronique et des supraconducteurs. Ces systèmes peuvent bénéficier de toutes les technologies de la nanoélectronique, mais ils présentent l'inconvénient, n'étant pas des objets naturels, d'être difficiles à rendre parfaitement identiques. Pasqal, de son côté, utilise des atomes de rubidium et bénéficie de l'avantage des bits quantiques basés sur des objets naturels : tous les atomes de rubidium sont identiques, donc reproductibles. Il y a aussi l'approche par ions, ces atomes auxquels il manque un électron : étant chargés, on peut les contrôler avec des champs électriques et magnétiques. Enfin, Quandela travaille avec les photons, qui sont d'excellents bits quantiques, mais qu'on ne peut pas garder immobiles — ce sont ce qu'on appelle des « *flying qubits* », des qubits volants. Dans ce domaine, le sujet de la mémoire quantique est crucial. Cette technologie permet de stocker et de synchroniser ●●●

●●● des informations quantiques. À Paris, Weling développe des mémoires quantiques en utilisant des atomes ultrafroids. Le but est de créer des dispositifs capables d'interconnecter plusieurs processeurs quantiques, augmentant ainsi la puissance de calcul disponible. Cette technologie facilite également le transfert fiable d'informations sur de longues distances, ouvrant la voie à des réseaux de communication quantique plus étendus et sécurisés que les systèmes classiques. C'est un domaine essentiel pour l'avenir.

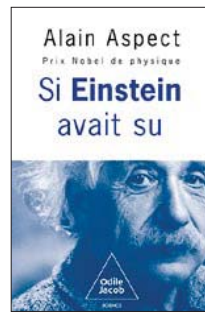
Vous êtes très impliqué dans les start-up du quantique en France... Pourquoi encourager l'entrepreneuriat dans le secteur ?

J'ai toujours été favorable aux applications de nos recherches fondamentales. Donc, quand les jeunes ont une bonne idée et me sollicitent, j'ai tendance à dire oui. Je suis dans le conseil scientifique de plusieurs start-up comme Quandela et Weling parce que c'est de la physique que je sens bien. J'ai également été un des premiers investisseurs dans Muquans, une start-up, créée par mes anciens étudiants, qui fabrique des gravimètres quantiques. Une belle réussite qui a depuis été rachetée par iXblue, devenue Exail fin 2022.

Et puis il y a l'histoire de Pasqal. Christophe Jurczak, un ancien étudiant revenu des États-Unis à la tête d'un fonds d'investissement en technologies quantiques, m'a interpellé il y a quelques années : « Qu'est-ce que vous attendez pour développer des start-up quantiques ? Vous avez des résultats magnifiques. Aux États-Unis, il y aurait déjà trois start-up ! » Je l'ai dirigé vers Antoine Browaeys, qui développait un ordinateur quantique remarquable dans son laboratoire de recherche fondamentale. Le soir même, Antoine est venu me voir en me disant : « J'y vais à condition que tu te lances avec nous. » C'est ainsi que je suis devenu cofondateur de Pasqal « à l'insu de mon plein gré » [Rires.]

L'IA va-t-elle contribuer à révolutionner la recherche en physique ?

C'est une révolution dans notre façon de faire de la science comparable à celle qu'a représentée l'ordinateur dans nos outils de recherche. Mais la vraie question qui se pose est plus profonde : l'IA peut-elle faire des découvertes fondamentales ? Historiquement, les grandes percées scientifiques sont nées de l'intuition et de la créativité humaine. Prenons un exemple historique : en 1860, on connaissait divers phénomènes électriques et magnétiques. Les travaux du physicien écossais James Clerk Maxwell ont conduit à la prédiction des ondes électromagnétiques, ouvrant la voie à la radio et aux télécommunications modernes. Par un coup de génie, il a écrit



« Si Einstein avait su », d'Alain Aspect (Odile Jacob, 368 p., 24,90 €).

« Sur l'IA, la vraie question est : peut-elle faire des découvertes fondamentales ? »

quatre équations qui non seulement synthétisaient tout ce qu'on savait, mais contenaient aussi en elles bien plus que ce qu'on y avait mis. La question cruciale est donc : l'IA pourrait-elle accomplir ce type de saut conceptuel ? Si elle en devient capable, ce sera une révolution majeure dans l'histoire de la pensée humaine.

Ma position sur cette question reste pragmatique : comme pour toute avancée technologique majeure, une fois qu'elle existe, on ne peut pas simplement l'ignorer ou espérer l'interdire. Prenez l'exemple de la bombe atomique : on ne peut pas faire comme si elle n'existait pas. La seule approche raisonnable est d'apprendre à vivre avec ces technologies et de les réguler intelligemment.

Avec l'effervescence de l'écosystème quantique en France, est-ce qu'on peut espérer cette fois-ci rester compétitifs dans cette course technologique ?

J'aimerais être optimiste, mais je crains qu'au fur et à mesure de son développement, les Américains n'avancent plus vite que nous. Dans la première phase, nous sommes très bien positionnés – l'ordinateur quantique développé par Pasqal est même, à mon avis, un cran au-dessus de celui de Mikhail Lukin, à Harvard. L'écosystème français est particulièrement favorable au démarrage des start-up, mais les difficultés surgissent lorsqu'elles atteignent une certaine taille. Pasqal et Quandela emploient maintenant des centaines de personnes, et la gestion de telles structures pose de nouveaux défis. Sur le plan technique, nous ne sommes pas en retard, mais la phase de croissance sera déterminante.

Dans le contexte géopolitique actuel, la recherche internationale est-elle encore possible ?

C'est l'une des tragédies de notre époque. J'ai connu une période merveilleuse après la chute du mur de Berlin, où la collaboration internationale était extraordinaire.

En Chine, on sentait nos collègues respirer un air nouveau. En Russie, tout semblait possible. Ces dernières années ont vu un repli significatif. Je ne me rends plus en Russie, alors que j'y allais régulièrement auparavant. Je suis réticent à l'idée d'aller en Chine. J'ai même un poste de professeur à Hongkong, où j'avais signé mon contrat à l'époque où c'était encore une démocratie, mais je n'y vais plus. Je ne peux pas me résoudre à enseigner dans un pays où l'on emprisonne les étudiants qui osent protester et s'opposer au régime. Bien que la recherche scientifique ne souffre pas encore trop de cette situation, les relations avec les chercheurs russes en particulier se sont cassées depuis l'invasion de l'Ukraine. Heureusement, de très nombreuses collaborations internationales existent encore,

notamment en Europe où elles sont soutenues par plusieurs dispositifs de l'Union européenne.

Les chercheurs sont-ils suffisamment considérés et payés en France ?

Il y a dix ou quinze ans, le salaire d'un professeur agrégé correspondait à 2,5 fois le smic ; aujourd'hui, c'est 1,6 fois... Pareil pour les salaires de l'enseignement supérieur ou du CNRS, ce n'est pas possible. Quand on compare le salaire de nos enseignants-chercheurs à celui des Américains, c'est désolant ; même s'il ne faut pas oublier que, en France, vous n'avez pas à payer les assurances santé de votre famille ou l'université de vos enfants... Je pense qu'on pourrait être compétitifs si on doublait les salaires français, bien que nettement en dessous des chiffres qu'on cite ailleurs, grâce à tous les services offerts par la société.

« On ne résoudra pas les problèmes de la planète contre la science, mais avec elle. »

Comment répondre à la désaffection des jeunes pour les sciences ?

Mon message aux lycéens est clair : on ne résoudra pas les problèmes de la planète contre la science, mais avec elle. Je ne pense pas qu'on va régler le problème du réchauffement climatique en se repliant en Ardèche pour élever des moutons dans son coin. Avec 10 milliards d'humains à l'horizon, les solutions sont dans les sciences, dont les notions de base devraient être connues d'une majorité de citoyens. Cela permettrait de ne pas se laisser abuser par des raisonnements grossièrement faux. Par exemple, certains disent qu'il y a une quantité d'hydrogène infinie dans la mer, sans comprendre qu'il faut de l'énergie pour séparer l'hydrogène de l'oxygène dans l'eau. Donc, si on le comprend, il faut accepter des solutions respectant les lois de base de la physique. Par exemple, placer en mer des éoliennes, qui fournissent l'électricité produisant de l'hydrogène que l'on stocke dans un réservoir qui pourra servir, notamment, aux camions non polluants de demain. Je pense que la désaffection de certains jeunes pour la science vient de leur désarroi, de la peur. Ils ont raison d'être inquiets, mais la peur ne doit pas amener à être irrationnel. Quand on est trop inquiet, il ne faut pas se jeter dans les bras de gourous.

Comment expliquer le manque de femmes en sciences ?

Le problème majeur réside dans les stéréotypes profondément ancrés. Je me souviens d'une expérience frappante lors de ma présidence des Olympiades de physique au Palais de la découverte. En discutant avec les finalistes de leurs projets d'études, le contraste était saisissant : les garçons répondaient sans hésiter « maths sup », tandis que les filles disaient « peut-être médecine ou biologie ». Quand je leur demandais « pourquoi pas la physique qui manifestement vous passionne ? », je sentais tout de suite le poids des préjugés sociétaux : « Les maths et la physique, ce n'est pas pour les filles. » Cette situation souligne un enjeu plus large : la nécessité d'une véritable culture scientifique dans l'éducation générale, notamment dans les études en sciences politiques et... dans les écoles de journalisme ●