

Quel avenir pour la physique ?

Entretien de Serge Haroche avec Michèle Leduc, le 22 octobre 2015

Serge Haroche a reçu, avec David Wineland, le prix Nobel de physique en 2012 pour ses travaux sur « ... la manipulation de systèmes quantiques individuels » (voir l'article de Jean-Michel Raimond dans ce même numéro, p. 41).

Ayant accepté de répondre aux questions de Michèle Leduc pour *Reflets de la physique*, il a choisi d'exposer d'abord sa vision de la politique scientifique en France, la comparant de façon éclairante à celle de pays étrangers comme les États-Unis ou l'Allemagne, qu'il connaît bien. Il développe sa conception de l'excellence en recherche, expose le fonctionnement de son équipe et précise comment il voit ses devoirs de lauréat Nobel face à la société. Enfin, il exprime ses réflexions sur l'avenir de la physique et de la science en général, avec une vision personnelle de l'information quantique telle qu'il la pratique.

Michèle Leduc : Ma première question sera générale. Comment vois-tu l'avenir de la physique ? La SFP a beaucoup de questions sur l'enseignement au lycée. Penses-tu que la physique va perdurer en tant que discipline de base ?

Serge Haroche : Comme la SFP, la section de physique de l'Académie des sciences est préoccupée par la question de l'évolution de l'enseignement de la physique au lycée. La situation est inquiétante, les programmes incitant à voir la physique sous un angle journalistique, à faire du descriptif et du qualitatif. On n'apprend plus à calculer, ce qui va d'ailleurs de pair avec un allègement des programmes de mathématiques. L'évolution générale n'est plus du tout faite pour inciter les élèves à s'orienter vers la science. On part du principe que le bac S est un bac standard plutôt que scientifique. Il faut ensuite que l'enseignement pour la science et pour la recherche soit rattrapé au niveau de l'université et des classes préparatoires. Pourtant, quand je fais des interventions dans les lycées, je sens un grand enthousiasme pour la physique, et c'est cela qu'il faut essayer de conforter : on va en effet avoir besoin d'ingénieurs et de chercheurs dans tous les domaines.

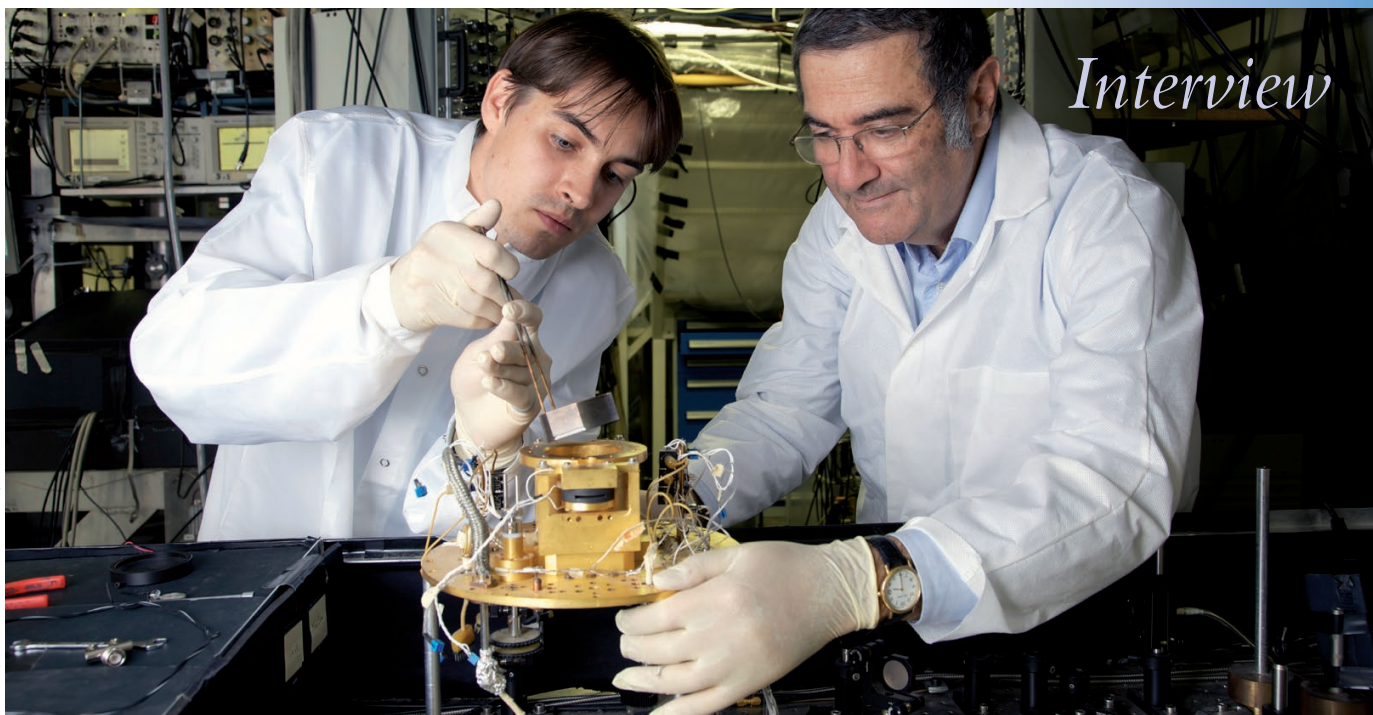
ML : Tous les programmes européens et français sont tournés vers l'innovation. Comment vois-tu l'articulation avec la recherche très fondamentale telle que tu la pratiques ?

SH : Chaque fois que j'en ai l'occasion, j'insiste sur le fait que la recherche fondamentale est le substrat indispensable à partir duquel les innovations vont pouvoir se développer. Les autorités disent être d'accord, mais quand il s'agit d'organiser et d'orienter les financements de la recherche, c'est autre chose... Je suis choqué par exemple que l'ANR décline dans ses appels tous les « défis sociétaux » que les chercheurs sont appelés à relever et que le dernier défi, présenté comme une espèce d'appendice bizarrement nommé, est celui des « autres savoirs »... Parce qu'on ne sait pas où classer la recherche fondamentale, on ne

la défend pas vraiment. Une des raisons est sans doute que la recherche fondamentale demande du temps et que les intérêts des politiques sont dans le court terme, et même le très court terme. Il est également révélateur – et inquiétant – de constater que le public et les jeunes en particulier ne se rendent en général pas compte que tous les appareils dont nous nous servons dans la vie quotidienne proviennent de recherches fondamentales et se sont développées de façon souvent fortuite à partir de découvertes stimulées par la pure curiosité des chercheurs.

ML : Faudrait-il, avec l'aide du Collège de France, de l'Académie, d'autres institutions prestigieuses, que les sociétés savantes se mobilisent pour proposer quelque chose de plus concret pour la diffusion de la culture scientifique ?

SH : Le morcellement des sociétés savantes en France n'aide pas à la mobilisation. Trop peu d'enseignants, qui sont les premiers intéressés à voir évoluer les programmes dans le bon sens, sont inscrits à la SFP. Ils ont évidemment leur propre association, mais je crois que l'influence des enseignants à tous les niveaux, primaire, secondaire et supérieur, ainsi que celle des chercheurs, serait plus forte s'ils parlaient et s'exprimaient ensemble. Paradoxalement, à la dispersion des sociétés savantes s'oppose le monolithisme du système d'enseignement. La France est un pays centralisé, et quand on établit un programme il doit être uniforme, le même pour tout le monde ! Alors que dans un pays comme les États-Unis, il est évident que la physique n'est pas enseignée de la même façon dans le lycée du Bronx, qui a produit sept ou huit prix Nobel au cours des cinquante dernières années, et dans un lycée du Midwest où l'on n'a même pas le droit d'enseigner la théorie de l'évolution... Cette diversité peut être catastrophique lorsqu'elle permet certaines dérives réactionnaires, mais elle laisse aussi la liberté d'enseigner des éléments beaucoup plus avancés aux élèves qui sont capables de les recevoir.



© Christophe LEBEDINSKY / CNRS Photographique

Serge Haroche (à droite) et son collaborateur Igor Dotsenko examinent une cavité « piège à photons » au Laboratoire Kastler Brossel.

ML : Comment vois-tu les modes de financement actuels de la recherche en France ?

SH : Ces financements sont actuellement insuffisants. Il faut créer de nouveaux postes de chercheurs et augmenter les salaires beaucoup trop bas des débuts de carrière. L'augmentation du nombre de postes ouverts aux concours est indispensable pour compenser la baisse des dernières années et pour éviter que se crée un *gap* dans certaines disciplines entre les générations de chercheurs. Il faudrait aussi un équilibre plus satisfaisant entre les crédits récurrents, nécessaires au fonctionnement au jour le jour de laboratoires travaillant sur des projets de recherche fondamentale à long terme, et l'argent distribué sur des contrats (essentiellement ceux de l'ANR) qui exigent que les chercheurs s'engagent à obtenir des résultats rapides, dans des domaines souvent appliqués. Aujourd'hui, la recherche n'est pratiquement plus financée que par cette seconde méthode. Et la façon dont ces contrats sont accordés est économiquement aberrante, en raison de la faiblesse de l'enveloppe globale de l'ANR. L'État, en titularisant des jeunes chercheurs s'engage à les rémunérer pendant une longue carrière, ce qui correspond à une somme d'argent conséquente. Mais, lorsque ces mêmes chercheurs font des demandes à l'ANR, le taux de succès est actuellement de l'ordre de 8 %. De deux choses l'une : ou ces chercheurs sont mauvais et il ne fallait pas les engager, ou ils sont bons (et je sais que dans leur immense majorité ils le sont) et l'État paye des salaires à des personnes auxquelles il ne donne pas les moyens de travailler.

Pour résumer, nous avons besoin d'une reprise de créations de postes dans la recherche, d'une augmentation des crédits de l'ANR et d'un meilleur équilibre entre financements récurrents et sur contrat. Ceci n'a pas un coût exorbitant. On peut l'estimer à environ un milliard d'euros, ce qui est peu comparé à celui du crédit impôt-recherche, dont on peut raisonnablement penser qu'il est, au moins en partie, détourné de son objectif par certaines entreprises.

ML : Est-ce que le gouvernement consulte et écoute les prix Nobel comme toi sur ces questions ?

SH : Oui, il consulte et il écoute, et pas seulement les prix Nobel. Je suis membre du Conseil Supérieur de la Recherche qui a fait part au gouvernement de nos préoccupations, et j'espère qu'il en tiendra compte. Mais, tenu par les contraintes économiques et budgétaires que l'on sait, l'État a du mal à satisfaire nos demandes, même minimales concernant la recherche. Un autre gros problème vient des besoins légitimes de l'enseignement supérieur, avec les ressources limitées des universités, le surpeuplement des amphithéâtres, le vieillissement des locaux et en général la difficulté d'accueillir dans de bonnes conditions tous les étudiants qui y entrent. Il est compréhensible que l'État se sente obligé de donner aussi la priorité à ces questions. La situation serait sans doute tout autre si les universités étaient plus indépendantes et pouvaient compter sur d'autres financements que ceux provenant de l'État. J'en rêve parfois, mais je ne me fais pas trop d'illusions. Les traditions de l'enseignement supérieur français sont très différentes de celles du monde anglo-saxon. Sans plaider pour l'adoption en France du système américain qui a aussi ses défauts, il est bon de se livrer à une comparaison qualitative simple. Nous avons en France beaucoup moins de mécènes disposés à financer les universités ou les institutions de recherche, et l'accès au supérieur est quasi gratuit pour tous les étudiants alors qu'il a un prix très élevé outre-Atlantique. Et ces deux aspects du problème, qui limitent considérablement les ressources de nos universités par rapport à celles de leurs concurrentes à l'étranger, sont paradoxalement corrélés. Aux États-Unis, un étudiant d'une université prestigieuse paye très cher ses études, ce qui contribue à les valoriser à ses yeux et à renforcer son attachement à son *alma mater*. Lorsqu'il devient un ancien élève, un *alumnus*, il s'en souvient et souvent marque son attachement à l'université qui l'a formé en lui faisant une donation, parfois très importante. En France, c'est l'inverse. L'enseignement est gratuit et l'ancien élève n'aura, ni pendant ses études ni après, l'idée que sa





relation avec son *alma mater* puisse se manifester par un échange d'argent. Cette question est un tabou en France et les politiques de tout bord craindront toujours qu'augmenter les droits universitaires, ne serait-ce que de quelques milliers d'euros par an, mettra automatiquement des millions d'étudiants dans la rue. En outre, les universités auront toujours du mal à être véritablement indépendantes et à exercer une saine concurrence entre elles. Il revient donc principalement à l'État d'exercer sa fonction régaliennne de financement de l'enseignement supérieur et de la recherche. Les deux vont ensemble. Il n'y a pas d'université d'excellence sans recherche fondamentale d'excellence. L'État doit donc améliorer de pair les conditions d'exercice de l'enseignement supérieur et celles de la recherche. Et en complément il doit essayer de favoriser en parallèle l'émergence d'un mécénat privé et d'une contribution plus grande du financement des recherches par l'industrie.

ML : Quelles seraient les bonnes conditions pour que la recherche marche bien dans un labo ?

SH : Il n'y a pas de réponse générale. Cela dépend du domaine de recherche. En physique atomique, on travaille en petites équipes, avec au plus trois à quatre étudiants sur chaque expérience. Dans ces petits groupes, les étudiants maîtrisent à la fois les aspects expérimentaux et les côtés théoriques de leur domaine de recherche. Des liens personnels peuvent également s'établir entre chercheurs et techniciens travaillant sur un projet commun. Je pense que c'est un atout de la recherche « à échelle humaine » que nous pratiquons et qui oppose cette recherche à celle des groupes beaucoup plus nombreux travaillant autour des grands instruments. Je n'ai pas d'expérience du travail scientifique à cette autre échelle, pour laquelle d'autres conditions doivent certainement être remplies si l'on veut assurer le fonctionnement harmonieux de la recherche. Je voudrais aussi évoquer un autre aspect de la recherche en petits groupes. Il faut donner la possibilité aux jeunes de démarrer leur propre projet indépendant. Cela n'a rien d'évident dans le système français, où les jeunes qui entrent chargés de recherche au CNRS ou maîtres de conférence dans une université sont en général associés à une équipe existant déjà, simplement parce qu'on ne peut pas leur donner le financement nécessaire au démarrage d'un projet personnel, ce qu'on appelle les *starting funds* dans le monde anglo-saxon. Au Collège de France, pour favoriser l'épanouissement de talents nouveaux, nous avons créé une pépinière de jeunes équipes en physique : on engage pour une période de quatre à six ans un jeune chercheur, après décision d'un jury international complètement indépendant, et on lui donne au départ ce qu'il faut pour démarrer son laboratoire et pour avoir un ou deux étudiants et un postdoc. Cela se fait avec le soutien du CNRS. On lui met ainsi le pied à l'étrier, tout en lui demandant d'essayer d'obtenir un financement sur contrat français ou européen. Les premiers résultats de ce programme sont encourageants, puisque nos deux premiers lauréats ont obtenu une bourse de l'ERC (European Research Council). À plus long terme, les jeunes chercheurs, une fois leurs preuves faites, devront essaimer dans d'autres laboratoires.

ML : À propos de l'ERC, beaucoup pensent qu'elle devrait évoluer vers la reconnaissance des petites équipes et pas seulement des chercheurs individuels.

SH : Je ne comprends pas bien cette opposition. En reconnaissant un chercheur porteur de projet, c'est finalement la petite équipe qu'il constitue autour de lui et qu'il doit décrire en détail dans son projet que l'ERC reconnaît. Je pense que le système de l'ERC est, dans le contexte actuel, ce qui a sauvé la recherche fondamentale en France. Les projets qui sont reconnus sont en général excellents. Le but de l'ERC pour les jeunes, c'est d'arriver à discerner ceux qui ont l'ambition de faire quelque chose d'important et d'intéressant. Je crois que l'essentiel est de laisser un espace de liberté pour une recherche fondamentale pilotée uniquement par la curiosité et non par des besoins sociétaux. L'ERC est vraiment la seule possibilité qui nous reste actuellement en Europe, il faut se battre pour la défendre. Et même les Américains nous l'envient dans une certaine mesure.

ML : Dans les laboratoires de physique atomique et moléculaire comme le nôtre, nous avons beaucoup d'échanges avec l'Allemagne, où les bonnes institutions de recherche ont plus de moyens qu'ici. Comment tenir la compétition en France ?

SH : Le système des instituts Max Planck marche très bien. Les laboratoires des Max Planck mettent dans leur équipement et leur fonctionnement une part de leur budget beaucoup plus importante que ne le fait le CNRS, comparé au coût des salaires. Ils ont trouvé un meilleur équilibre. Les chercheurs qui parviennent aux postes de directeurs au Max Planck n'ont pas autant besoin de contrats que leurs homologues français, car ils sont bien financés de façon récurrente. On me dira que ce sont des mandarins... certes, mais de bons mandarins. Ce qui manque au système français, c'est la reconnaissance d'un certain nombre de laboratoires d'excellence, auxquels on donnerait les moyens de faire leur politique scientifique, c'est-à-dire de distribuer des moyens récurrents à leurs bonnes équipes.

ML : Mais l'excellence en recherche est une notion difficile à définir et encore plus à mesurer, les critères sont importés du secteur économique...

SH : En recherche, l'excellence est peut-être difficile à mesurer, mais elle s'impose à l'évidence dans certains laboratoires : il y a des chercheurs et des équipes dans le monde dont on ne discute pas une seconde s'ils sont excellents ou non. Évidemment il y a une zone grise dans certains secteurs de la recherche, à partir du moment où l'on peut se poser la question de l'originalité et de la qualité des travaux. En réalité, je crois que le mot excellence ne doit pas être considéré comme un tabou : c'est vraiment ce vers quoi il faut tendre.

ML : Alors, comment choisis-tu les collaborateurs qui travaillent avec toi ? En tant que lauréat du prix Nobel, je suppose que tu as beaucoup de bonnes propositions ?

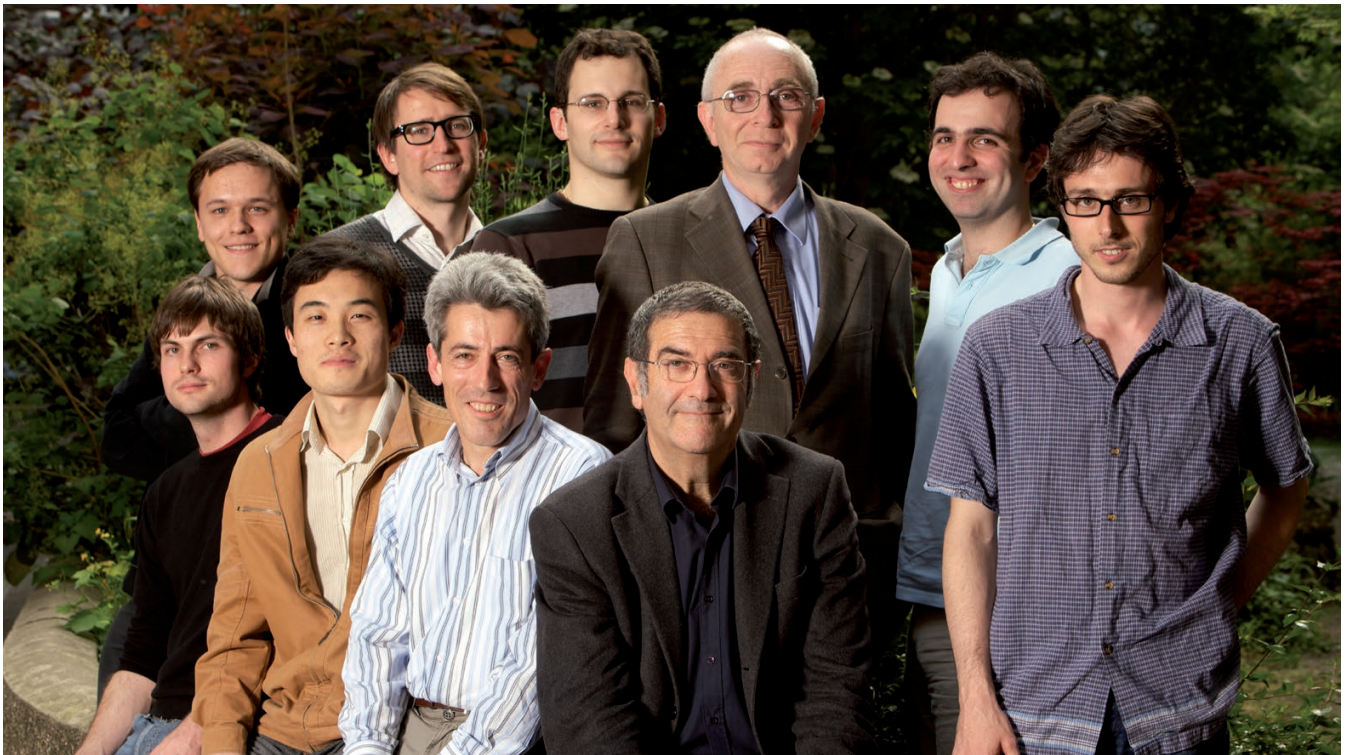
SH : Depuis trois ans, en raison des contraintes du prix Nobel et surtout de celles de l'administration du Collège de France, je me suis un peu éloigné de mon laboratoire, qui a amélioré considérablement ses conditions de travail en emménageant dans des locaux neufs au Collège de France. La reconnaissance apportée par le prix nous a permis d'engager dans notre groupe un jeune enseignant-chercheur. Nous n'avons pas pu augmenter notre groupe davantage, faute de postes et surtout de moyens financiers. Si maintenant je me retourne sur ma carrière, je peux dire que la meilleure chose qui me soit arrivée, c'est d'avoir eu comme étudiants Jean-Michel Raimond et Michel Brune, qui sont ensuite restés dans mon groupe, qui l'ont longtemps dirigé avec moi et qui, maintenant que je suis à la retraite, prennent la relève. Nous avons formé un noyau qui a travaillé ensemble sur une très longue durée, sans laquelle rien n'aurait été possible. Et nous avons pu former un grand nombre d'étudiants et postdocs brillants qui ont ensuite fait carrière ailleurs. En général les jeunes quittent leur patron de thèse pour développer leur propre groupe. Dans notre cas, la possibilité de garder plusieurs chercheurs confirmés ensemble a été bénéfique. Il est intéressant de constater que David Wineland, avec qui j'ai partagé le prix Nobel, a poursuivi toute sa carrière dans des conditions analogues à la mienne. C'est ce qui crée la masse critique d'un laboratoire travaillant sur un projet ambitieux et permet aussi de maintenir les connaissances d'une génération d'étudiants à l'autre. Le prix Nobel ne reconnaît en général que le chercheur le plus ancien dans le groupe. En un sens, c'est certainement injuste.

ML : Comment conçois-tu les devoirs que te donne le prix Nobel envers la société ?

SH : Le premier devoir est d'insister à chaque fois que l'occasion m'en est donnée, sur l'importance de la science et de la connaissance. Je le fais dans mes nombreuses interventions devant des lycéens ou des étudiants, ou auprès du grand public. Quand on veut justifier la recherche fondamentale, on dit toujours, comme je l'ai fait plus haut, qu'elle est essentielle parce que sans elle il n'y aurait pas d'applications. Mais ce n'est pas la seule raison de son importance. En insistant uniquement sur le rôle utilitaire de la recherche fondamentale, on renonce à justifier la quête de la connaissance pour elle-même. Il y a des domaines pour lesquels il n'y aura jamais d'applications : la recherche des exoplanètes, par exemple, est fascinante, mais on n'ira jamais là-bas ! J'aime beaucoup citer la réponse de ce physicien des hautes énergies aux États-Unis, interrogé par un sénateur américain sur l'utilité pour la Défense de développer le Fermi Lab : « Cela ne servira pas à défendre les États-Unis, mais cela les rendra encore plus dignes d'être défendus »... On n'insistera jamais assez sur le fait que les valeurs de la civilisation, dont la recherche fondamentale est un élément essentiel, sont dignes d'être défendues pour elles-mêmes, en dehors de toute utilité immédiate.

Le deuxième devoir que je dois remplir, c'est effectivement de dire tout ce que nous avons déjà évoqué quand on me questionne à un niveau politique gouvernemental. Pourtant, n'importe quel autre scientifique qui a de l'expérience pourrait en faire autant. Le prix Nobel me donne le privilège, un peu exagéré, d'être peut-être davantage écouté, si ce n'est entendu.

»»»



Serge Haroche (au premier plan, au milieu) et son équipe, le groupe d'électrodynamique des systèmes simples du Laboratoire Kastler Brossel, en 2009.

>>>

ML : Je voudrais maintenant aborder l'information quantique, puisque c'est ton sujet actuel. Pendant longtemps, tu as dit que tu ne croyais pas beaucoup à l'ordinateur quantique. Pourtant, il y a beaucoup de moyens qui vont à ce domaine partout dans le monde. Comment vois-tu le futur ?

SH : Je n'aime pas l'idée de survendre la recherche en faisant des promesses que l'on n'est pas sûr de tenir. Certains groupes se sont focalisés sur la construction d'un « qubit éternel » dont on saura préserver indéfiniment la cohérence, et sur la réalisation d'une porte quantique dont on saura corriger toutes les erreurs. Mais peut-être que cela les empêche de faire d'autres choses qui seraient éventuellement plus faciles et plus intéressantes ? Il y a un risque de dérive, là où la recherche fondamentale est sollicitée par une application qui est peut-être utopique... Penser qu'il suffira de programmer un ordinateur quantique pour qu'il calcule n'importe quoi à une vitesse plus rapide que l'ordinateur classique, cela reste largement un rêve. C'est très beau sur le plan théorique d'étudier comment corriger la décohérence dans ce cas-là, mais on est très, très loin des applications ! Il est aujourd'hui illusoire d'envisager une espèce de projet Manhattan pour l'ordinateur quantique et de croire qu'il suffit d'y mettre les moyens financiers et technologiques pour y arriver.

Ceci dit, les technologies quantiques présentent un grand intérêt. La cryptographie quantique marche déjà. La simulation quantique est aussi très prometteuse. On réalise par exemple avec des atomes froids ou des ions piégés de petites structures de quelques dizaines de particules, qui imitent des situations rencontrées naturellement en physique de la matière condensée. En observant l'évolution de ces systèmes artificiels, on apprend comment les matériaux quantiques réels se comportent, dans des situations trop complexes pour qu'un ordinateur classique puisse les calculer. Dans un autre registre, on peut s'attendre à ce que les limites standard de précision des mesures soient dépassées en préparant et en utilisant comme sondes des états non classiques de la matière ou de la lumière, en particulier dans le cas des horloges ou dans d'autres mesures quantiques comme celles de très faibles champs. Les applications potentielles vont concerner toutes sortes de domaines, de la biologie à la géodésie. Toutefois, pour que ces recherches aboutissent à des applications, il faut qu'il y ait un besoin global sur le marché, ce qui n'est pas évident, même pour la cryptographie quantique.

Bref, je crois beaucoup aux sciences de l'information et en général aux technologies quantiques du futur. Il faut continuer la recherche dans ce domaine, mais sans faire d'annonces irréfléchies, et garder à l'esprit que les constantes de temps pour les applications peuvent être de vingt à trente ans. C'est par exemple le délai qui s'est écoulé entre la découverte de la RMN par Purcell et Pound et le développement de l'IRM médicale.

Enfin, le passé nous apprend que le développement de la recherche et le cheminement entre la recherche fondamentale et les applications qui en sont faites conduisent souvent à des surprises imprévisibles. Lorsque le laser a été inventé, personne ne prévoyait qu'il permettrait d'atteindre des températures de l'ordre du nanokelvin et de réaliser des interféromètres atomiques et des horloges d'une précision fantastique. Je suis sûr que les

manipulations actuelles de systèmes quantiques isolés conduiront dans le domaine des applications à des surprises du même ordre, qui seront sans doute très différentes des extrapolations auxquelles on se livre aujourd'hui sur l'ordinateur quantique. Cette imprévisibilité est sans doute l'un des traits les plus passionnants de la recherche.

ML : N'as-tu pas l'impression que les cloisonnements se défont entre les branches de la physique et dans leurs relations avec les autres secteurs de la science ?

SH : C'est effectivement un des aspects passionnants de la science actuelle. Quand j'ai commencé ma carrière, la physique des atomes et celle de la matière condensée étaient complètement séparées. Maintenant, il y a des ponts entre les deux, et aussi avec l'astrophysique. Je pense à toutes les simulations quantiques que permettent les atomes froids. Ce que font nos collègues avec les fermions ultrafroids est une physique similaire à celle des étoiles à neutrons. Et les horloges ultra-précises permettent de voir si les constantes fondamentales évoluent ou non dans le temps, c'est là également un lien avec la cosmologie. La physique des phénomènes ultrarapides avec les lasers attosecondes, qui fait le pont avec la biologie, est aussi un domaine fascinant. Donc je n'ai aucun doute quant au fait que des choses passionnantes vont se faire en science. Il y aura d'autres avancées.

ML : Pour terminer, comment vois-tu l'avenir de la physique en tant que discipline ? À chaque tournant de siècle, on dit qu'on a tout trouvé, d'abord avec les équations de Maxwell, ensuite avec la mécanique quantique et la relativité. Certains prétendent aujourd'hui qu'on n'a rien découvert d'important depuis un siècle...

SH : C'est évidemment faux. L'invention du laser il y a cinquante ans a eu un retentissement scientifique extraordinaire. Certains peuvent dire que ce n'est que de la technologie, mais le laser nous a donné des moyens d'exploration et de contrôle sur le monde absolument inouïs. Aujourd'hui on parle d'énergie noire, de matière manquante de l'Univers, ce sont des problèmes de physique fondamentaux qui restent à élucider pour la compréhension de l'Univers dans son ensemble, ce qui aura peut-être des conséquences technologiques un jour. On peut énoncer d'autres problèmes fondamentaux à résoudre, comme l'unification de la gravitation avec la physique quantique. Quand viendra-t-il un Einstein pour les débroussailler ? Ce n'est pas prévisible statistiquement ! J'ai horreur de prétendre prévoir ce qui va se passer. C'est un défaut actuel, il faut se vendre, il faut promettre pour obtenir des contrats. On nous dit qu'on est aujourd'hui dans une seconde révolution quantique, mais quand la première est arrivée, je ne crois pas que Schrödinger, Dirac ou Einstein se soient vantés que le monde allait changer avec ce qu'ils avaient découvert. Tout ce qu'on sait, si l'on suit les leçons de l'Histoire, c'est qu'il va encore se passer beaucoup de choses en physique. Simplement, il faut que la recherche ait la possibilité de se développer. ■