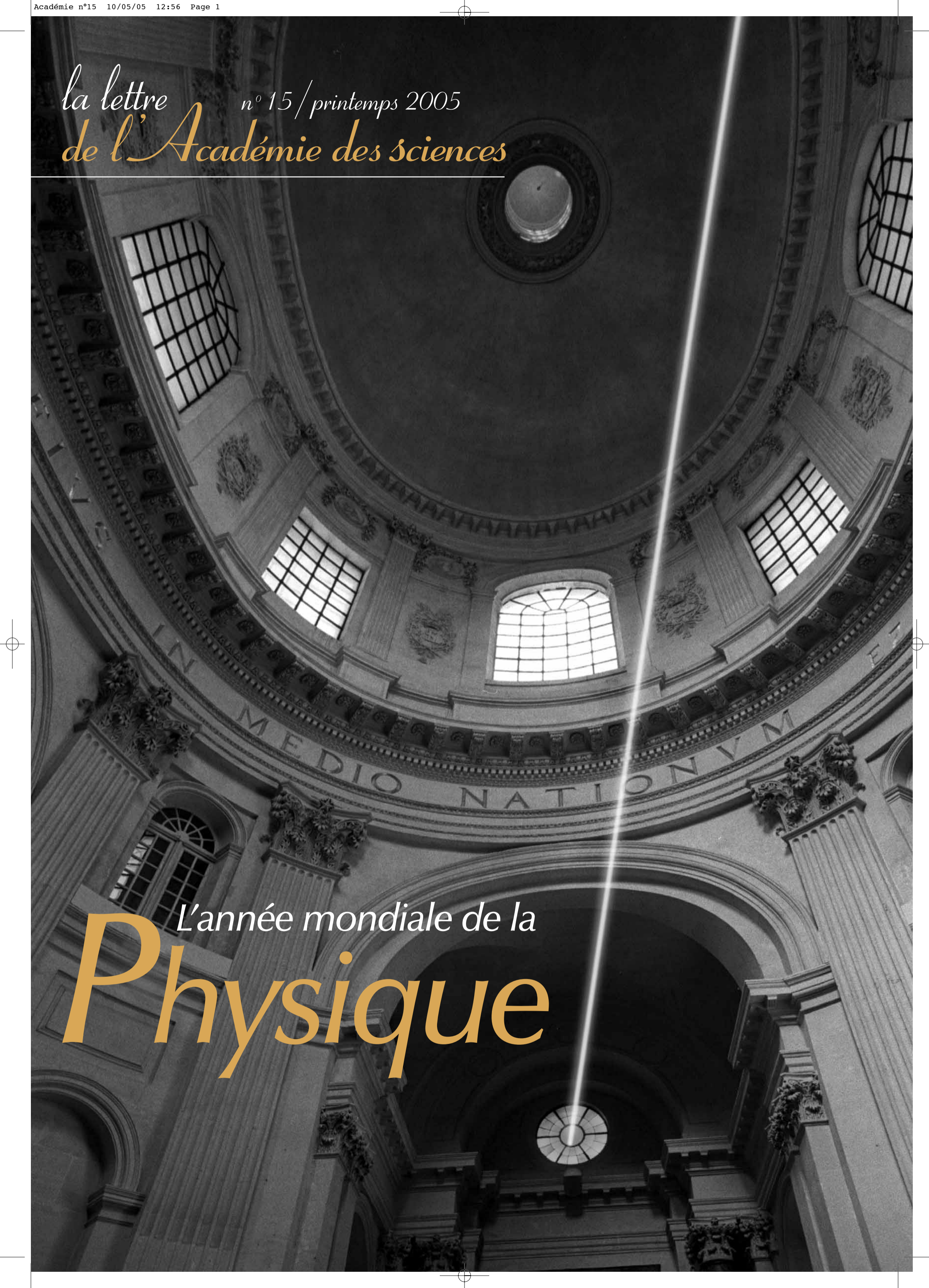


la lettre n° 15 / printemps 2005
de l'Académie des sciences

L'année mondiale de la
Physique



Sommaire

Éditorial

Édouard Brézin
page 2

Dossier

Une nouvelle révolution quantique
Alain Aspect
page 3

La physique de l'eau liquide
Bernard Cabane, Rodolphe Vuilleumier
page 7

Les défis de la physique théorique
Jean Iliopoulos
page 8

Le retournement temporel
des ondes
Entretien avec Mathias Fink par Paul Caro
page 11

Question d'actualité

Le challenge du Manchot
antarctique : comment réussir
à se reproduire sans compromettre
sa propre survie
Yvon Le Maho
page 13

La vie de l'académie

Pedro Vicente Maldonado
André Capron
page 16

Biologie cellulaire
Biologie du développement
page 17

La vie des séances

La Nature, leçon d'harmonie
Dominique Meyer
page 18

Quel avenir pour la recherche
pharmaceutique en France
Jean-Charles Schwartz
page 20

Carnet

page 20

Editorial

L'année 2005 a été choisie pour célébrer les sciences physiques dans le monde entier, exactement cent ans après la parution des travaux révolutionnaires d'Albert Einstein sur trois thèmes fondamentaux qui ont ouvert la voie à pratiquement tous les développements de la Physique du XX^{ème} siècle :

- la théorie de l'effet photoélectrique dans laquelle il introduisit le quantum de lumière (cet article sera couronné par le prix Nobel),
- la théorie de la relativité dans lequel il brisait la nature absolue du temps et abandonnait le concept d'éther (support hypothétique de la propagation de la lumière), article donc totalement révolutionnaire même si les contributions antérieures de Lorentz et Poincaré ont été elles aussi déterminantes ; il introduisit également cette même année la célèbre équivalence masse-énergie,
- et enfin la théorie du mouvement brownien, révélatrice de la constitution atomique de la matière, qui devait effectivement permettre à Jean Perrin de mesurer le nombre d'Avogadro.

La réunion de l'Académie des sciences à Lyon le 25 janvier dernier, à l'invitation de la municipalité de cette ville, a été l'occasion de présenter publiquement, en liaison avec la Société française de Physique, les manifestations prévues tout au long de l'année dans notre pays. La communauté scientifique s'est en



par Édouard Brézin

Président de l'Académie
des sciences, professeur
à l'université Pierre et Marie Curie

effet fortement impliquée pour faire de cette Année mondiale de la Physique autre chose que la commémoration d'A. Einstein, bien qu'il soit à l'évidence l'une des plus grandes figures de la science de tous les temps. Le but est avant tout de faire connaître par un public aussi large que possible, et singulièrement par les jeunes, les progrès conceptuels de la physique, qui ont complètement bouleversé notre compréhension de l'espace, du temps, de la matière, et simultanément de faire prendre conscience de l'importance de ces changements dans la vie quotidienne de chacun d'entre nous. Des expositions, des conférences, des présentations publiques d'expériences, des manifestations artistiques variées, auront lieu tout au long de l'année sur tout le territoire, grâce à la mobilisation et à l'imagination créatrice de toute la communauté scientifique. Quant à l'Académie, au-delà de l'action de ses membres, elle a pris l'initiative d'un livre collectif réalisé sous son égide (« Demain la Physique », éditions O. Jacob) dans lequel nous avons tenté de faire une présentation de questions incomprises (sans recours au formalisme mathématique). La Délégation à l'information scientifique et à la communication, en liaison avec le service des archives, a également choisi de présenter chaque mois le portrait d'un physicien du passé, français ou étranger, mais lié à notre Académie, en permettant une consultation en ligne des articles originaux issus de nos archives et de certains articles que ces travaux initiaux ont inspiré. Combattre le relatif désintérêt que l'on note dans la jeunesse pour les carrières scientifiques et redonner le goût de la démarche scientifique est aujourd'hui un enjeu mondial. Il est en effet essentiel de faire comprendre que le XXI^{ème} siècle aura un besoin croissant des sciences physiques pour trouver des solutions aux problèmes majeurs qui préoccupent légitimement nos contemporains, qu'il s'agisse de la dynamique de notre planète, de la production d'énergie, ou encore d'imagerie médicale. Il faut aussi faire prendre conscience de grandes questions, comme celles qui concernent l'information quan-

tique dont nul ne sait si elles auront des conséquences pratiques (mais nul ne pensait au moment de l'apparition du laser qu'il aurait le moindre impact hors des laboratoires de recherche), ou de notre univers comme celle qui concerne l'origine de cette mystérieuse énergie noire (qui constitue apparemment 70 % de l'énergie de l'univers). La physique est une matière réputée difficile, dont l'apprentissage suppose non seulement l'observation et la compréhension des phénomènes mais aussi l'utilisation et la maîtrise des outils mathématiques pour exprimer les lois de la physique. La « Main à la pâte », développée depuis près de dix ans par nos Confrères Charpak, Léna et Quéré, rejoints aujourd'hui par toute une équipe, a permis pour de nombreuses classes de l'école primaire, de renouer avec l'expérimentation personnelle, d'observer les phénomènes naturels qui nous entourent. et, avec l'aide des maîtres de tenter de les comprendre. Il est nécessaire désormais de prolonger dans les classes de collège et de lycée cette façon d'appréhender le monde, de comprendre que celui-ci est intelligible et que seule une approche rationnelle permet de l'appréhender. Cet enjeu mettra sans doute plusieurs années à se développer, il ne suffira pas d'une « année mondiale » pour cela, mais le rôle de l'Académie sera certainement déterminant ■

Une nouvelle révolution quantique

par Alain Aspect

Membre de l'Académie des sciences,
directeur de recherche au CNRS,
professeur à l'École polytechnique

La première révolution quantique

Le développement de la physique quantique, au XX^{ème} siècle, est l'une des aventures intellectuelles les plus extraordinaires de toute l'histoire humaine.

Cette théorie physique a modifié de fond en comble notre conception du monde, puisqu'elle nous force, par exemple, à accepter qu'une particule puisse se trouver à la fois ici et là, où qu'une porte quantique puisse être à la fois ouverte et fermée. Et elle a tout autant bouleversé notre mode de vie par ses applications innombrables : lasers, transistors, circuits intégrés, qui sont les composants de base des technologies de l'information et de la communication...

Une telle accumulation de succès aurait pu laisser craindre un épuisement du domaine : il n'en est rien. Qu'il s'agisse du comportement des électrons dans les solides, de l'interaction lumière matière, des fluides quantiques ultra-froids, on voit apparaître des phénomènes, certes compréhensibles dans le cadre de la physique quantique, mais tellement nouveaux et inattendus que l'intérêt rebondit sans cesse, ponctué par l'attribution de nombreux prix Nobel.

De façon sans doute encore plus imprévue, tant était grand le sentiment que « les pères fondateurs » (Niels Bohr et ses élèves) avaient totalement clarifié le sujet (essentiellement en répondant aux objections d'Einstein), c'est au niveau du cœur conceptuel de la théorie quantique qu'une nouvelle phase de progrès majeurs a débuté en 1960 avec les travaux de John Bell, suivis d'expériences de plus en plus fines. La violation des inégalités de Bell a apporté l'évidence irréfutable de l'*inséparabilité quantique*, propriété extraordinaire d'une paire d'objets intriqués qui se comportent comme un système quantique unique, même si les deux objets sont très éloignés l'un de l'autre.

C'est peu de temps après que l'on a appris à manipuler un par un des électrons, puis des ions, des atomes ou des photons. Il a alors fallu clarifier la façon d'appliquer le formalisme quantique fondamentalement probabiliste, à des objets individuels, et pas seulement à de très grands ensembles. Il n'est sans doute pas exagéré de dire que ces deux avancées conceptuelles de la fin du XX^{ème} siècle – la compréhension et la maîtrise des états intriqués, la compréhension et la maîtrise de la dynamique des objets quantiques individuels – signent le début d'une *nouvelle révolution quantique*. Et il n'est pas interdit d'imaginer qu'au delà des progrès en physique fondamentale dont nous n'avons sans doute observé que les prémices, et des questions d'interprétation qui restent plus ouvertes que jamais, cette nouvelle révolution quantique pourrait à son tour bouleverser notre société en débouchant sur une nouvelle *révolution technologique*, la *révolution de l'information quantique*...

et de stockage de l'information. Le laser, d'abord un instrument de physicien, est devenu omniprésent dans les applications les plus diverses, du guidage des engins de travaux publics aux lecteurs de code barre ou de disques compacts. Les télécommunications par laser et fibres optiques ont multiplié le débit d'information que l'on peut faire circuler à l'échelle de la planète et les autoroutes de l'information permettent aujourd'hui à l'humanité de partager les informations stockées dans les ordinateurs du monde entier, ou de mettre en commun leurs puissances de calcul.

La place prise par les applications des lasers ne doit pas faire croire que les progrès dans la compréhension et la maîtrise de l'interaction matière-lumière se seraient arrêtés en 1960. On a vu par exemple apparaître l'optique quantique dont la plupart des concepts étaient ignorés en 1960, et qui permet de repousser les limites des méthodes d'observation et de mesure optiques. On citera aussi la découverte *a priori* paradoxale, couronnée par le prix Nobel 1997 attribué à Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji, et Bill Phillips, du refroidissement par laser des vapeurs atomiques à des températures proches du zéro absolu. Ces progrès de la recherche fondamentale ont déjà débouché sur une amélioration spectaculaire de la précision des horloges atomiques, dont la précision conditionne celle de la localisation par satellite du système GPS. Ils ont aussi permis le développement d'interféromètres atomiques capables de détecter d'infimes anomalies de la pesanteur, ouvrant la voie à de nouvelles méthodes d'analyse du sous-sol. Et puis, par ce mouvement de balancier dont ils sont coutumiers, les physiciens projettent aujourd'hui d'utiliser ces nouveaux instruments à base d'atomes froids pour revenir sur des problèmes de physique fondamentale, comme des tests de relativité générale, ou la recherche d'éventuelles modifications des lois physiques à l'échelle de l'âge de l'Univers.

Ainsi, après bientôt un siècle, la *première révolution quantique* n'en finit pas de produire ses effets. La théorie quantique élaborée dans les années 1905-1925, et raffinée à la fin des années 1940, reste le cadre naturel dans lequel les physiciens continuent de découvrir et de comprendre les propriétés exotiques de la matière dans des situations extrêmes, ou même dans des conditions inconnues dans la nature. C'est aussi le cadre dans lequel doivent se placer les ingénieurs qui cherchent à pousser les technologies à leurs limites ultimes, de nature quantique. Mais au-delà de cette physique quantique bien établie, on assiste aujourd'hui à ce que l'on peut sans doute appeler une « *seconde révolution quantique* », qui a débuté avec les travaux de John Bell sur le problème d'Einstein-Podolsky-Rosen.

Des objections d'Einstein aux photons jumeaux : l'intrication quantique

Le débat Bohr-Einstein

Les renoncements ayant permis l'émergence de la mécanique quantique étaient si radicaux que plusieurs physiciens, dont Einstein et de Broglie, et dans une certaine mesure Schrödinger, n'admettaient pas leur caractère définitif, à la différence de Bohr qui en avait fait la clef de voûte de l'interprétation de la nouvelle théorie connue sous le nom « d'interprétation de Copenhague ». Einstein ne remettait pas en cause le formalisme mathématique de la mécanique quantique, ni ses prévisions, mais il semblait penser que les renoncements préconisés par Bohr dans son interprétation ne traduisaient que l'état d'inachèvement de la théorie quantique. Cette position allait donner lieu des débats homériques entre eux, en particulier celui qui débuta avec la publication, en 1935, de l'article d'Einstein, Podolsky, et Rosen (EPR). Dans cet article, Einstein et ses coauteurs montrent que le formalisme quantique prédit l'existence d'états particuliers de deux particules, par exemple deux électrons, caractérisés par de très fortes corrélations à la fois des vitesses et des positions.

Plus précisément, pour un état EPR, le formalisme quantique prédit que des mesures de position sur chacun des deux électrons donneront des valeurs symétriques par rapport à l'origine, et que des mesures de vitesses donneront de même des résultats toujours identiques. Les deux électrons étant éloignés l'un de l'autre au moment de la mesure, on est conduit, pour comprendre ces corrélations, à admettre que chacun des électrons possédait avant la mesure une valeur parfaitement déterminée de vitesse et de position. Mais le formalisme quantique ne donne pas de valeur précise à ces quantités tant que la mesure n'est pas faite, et EPR concluent que le formalisme quantique ne rend pas compte de la totalité de la réalité physique, et qu'il faut donc s'attacher à essayer de le compléter. Niels Bohr fut, semble-t-il, bouleversé par cet argument qui s'appuie sur le formalisme quantique lui-même pour en montrer le caractère incomplet, provisoire. Ses écrits mon-

trèrent une conviction profonde que si le raisonnement EPR était correct, compléter le formalisme quantique ne serait pas suffisant, c'est toute la physique quantique qui s'effondrerait. Bohr contesta donc immédiatement le raisonnement EPR, en affirmant que dans un état quantique de ce type, « non factorisable », on ne peut parler des propriétés individuelles de chaque électron, et cela même s'ils sont très éloignés l'un de l'autre. Avec Schrödinger, qui découvrit au même moment ces états étonnants, on allait désormais parler « d'état intriqué », pour indiquer que les deux électrons sont indissolublement enchevêtrés, qu'ils forment un objet unique quelle que soit leur éloignement.

On pourrait penser que ce débat entre deux géants de la physique du XX^{ème} siècle eut un immense écho chez les physiciens. En fait, lorsque l'article EPR parut en 1935, la mécanique quantique allait de succès en succès et, mis à part Bohr, la plupart des physiciens ignorèrent une discussion qui leur paraissait académique : il semblait que l'adhésion à l'une ou l'autre des positions fût une affaire de goût personnel (ou de position épistémologique) sans aucune conséquence pratique sur la mise en œuvre du formalisme quantique, ce qu'Einstein lui-même ne semblait pas contester. Il fallut attendre presque trente ans pour voir paraître un démenti à cette position relativement consensuelle.

Les tests expérimentaux des inégalités de Bell

C'est en 1964 que John Bell, physicien théoricien irlandais travaillant au CERN à Genève, publie un court article qui va bouleverser la situation. En quelques lignes de calcul, il montre que si l'on prend au sérieux l'argument EPR, et donc qu'on introduit explicitement des variables supplémentaires (complétant le formalisme quantique) spécifiant la totalité de la réalité physique au sens d'Einstein, par exemple à la fois les positions et les vitesses des électrons intriqués, alors on aboutit à une contradiction avec les prédictions quantiques. Pour établir cette contradiction, John Bell montre que tout modèle dans l'esprit des idées d'Einstein ne peut prédire que des corrélations dont les valeurs sont limitées par des inégalités – aujourd'hui appelées « inégalités de Bell » – que violent certaines prévisions quantiques. Le choix entre les positions d'Einstein et de Bohr n'est alors plus une question de goût personnel, puisque les deux positions conduisent à des prévisions *quantitativement* différentes. Il devient possible de trancher le débat par l'expérience, en mesurant les corrélations dans des paires intriquées, et en confrontant les résultats aux inégalités

de Bell. En 1964, il n'existait aucun résultat expérimental permettant de conclure. Les expérimentateurs se mirent donc au travail pour construire une expérience « sensible », dans une des rares situations où la mécanique quantique prédit une violation des inégalités de Bell. Les expériences les plus convaincantes ont été réalisées avec des paires de photons, sur lesquels des mesures de polarisation – suivant deux directions distinctes – jouent un rôle analogue aux mesures de position et de vitesse dans le schéma EPR originel. Après une première génération d'expériences pionnières, une nouvelle série d'expériences conduites à Orsay au début des années 1980, suivant des schémas de plus en plus proches de « l'expérience de pensée » idéale, donnèrent un ensemble de résultats incontestables, en excellent accord avec la mécanique quantique, et violant nettement les inégalités de Bell. Une troisième génération d'expériences entreprises à partir du début des années 1990 sont venues conforter ces résultats. Il faut se rendre à l'évidence : *les photons intriqués jumeaux ne sont pas deux systèmes distincts portant deux copies identiques d'un même ensemble de paramètres (à la différence des jumeaux humains dont les ressemblances s'expliquent par l'identité de leurs chromosomes). Une paire de photons intriqués doit en fait être considérée comme un système unique, inséparable, décrit par un état quantique global, impossible à décomposer en*

deux états relatifs à chacun des deux photons : les propriétés de la paire ne se résument pas à la réunion des propriétés des deux photons.

L'inséparabilité quantique se manifeste même si les deux photons sont éloignés l'un de l'autre, et qu'aucune interaction ne peut *a priori* connecter causalement les mesures, sauf à se propager plus vite que la lumière, ce qui est interdit par la relativité. Ce point a été vérifié pour la première fois dans l'une des expériences réalisées à l'Institut d'optique d'Orsay en 1982, et confirmé en 1998 par une équipe autrichienne. Dans les expériences récentes, des sources d'un nouveau type permettent d'injecter les photons intriqués dans deux fibres optiques partant dans des directions opposées, et une équipe genevoise a pu vérifier que l'inséparabilité subsiste à des distances de plusieurs dizaines de kilomètres. Même à de pareilles distances, tout se passe donc comme si les deux photons restaient toujours en contact, et si le résultat de la mesure effectuée sur l'un affectait instantanément l'autre. Bien qu'on ne puisse utiliser ce phénomène pour transmettre de l'information plus vite que la lumière, les propriétés troublantes des états intriqués continuent à interpeller les physiciens qui sont loin d'avoir atteint un consensus sur la façon de comprendre l'inséparabilité quantique. Nul ne peut dire aujourd'hui si les progrès viendront de nouvelles expériences, de percées théoriques, ou de ruptures épistémologiques.

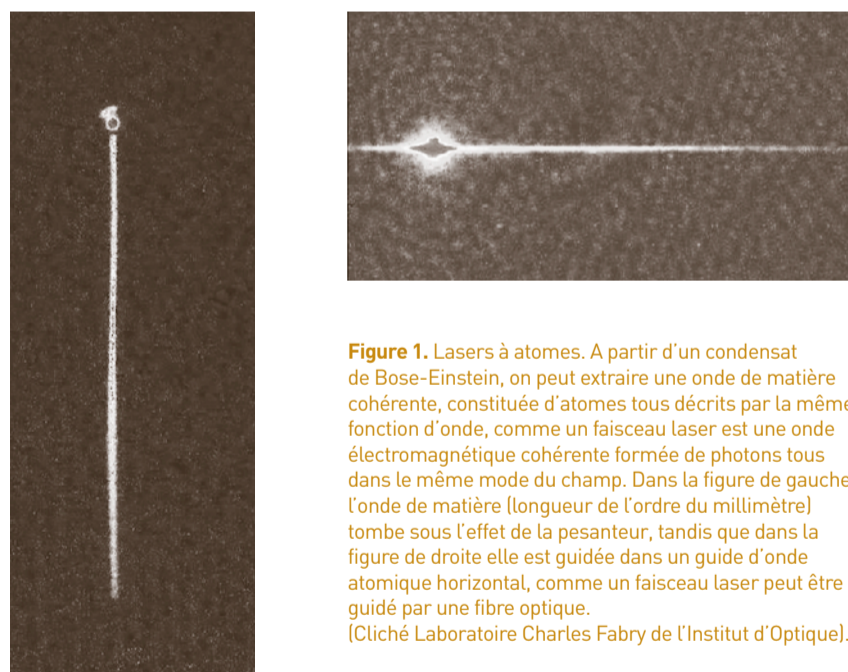


Figure 1. Lasers à atomes. A partir d'un condensat de Bose-Einstein, on peut extraire une onde de matière cohérente, constituée d'atomes tous décrits par la même fonction d'onde, comme un faisceau laser est une onde électromagnétique cohérente formée de photons tous dans le même mode du champ. Dans la figure de gauche, l'onde de matière (longueur de l'ordre du millimètre) tombe sous l'effet de la pesanteur, tandis que dans la figure de droite elle est guidée dans un guide d'onde atomique horizontal, comme un faisceau laser peut être guidé par une fibre optique. (Cliché Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique).

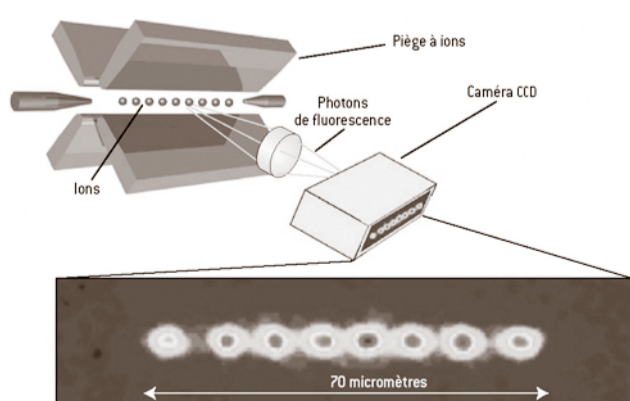


Figure 2. Chaîne d'ions piégés constituant un ensemble de qubits (bits quantiques). Par manipulation individuelle de ces ions, on peut les faire interagir et aboutir à un état intriqué. On réalise ainsi des opérations élémentaires du calcul quantique. (Cliché Université de Innsbruck).

La mécanique quantique et les systèmes individuels

Jusqu'à la fin des années 1970, les situations expérimentales où la mécanique quantique était impliquée concernaient de très grands ensembles d'objets microscopiques sur lesquels on observait un signal moyenné. Ainsi, la lumière émise par une lampe à décharge, dont les propriétés spectrales ont conduit à la première révolution quantique, est-elle émise par les millions de milliards d'atomes d'un gaz. De même, la superfluidité de l'hélium liquide, ou la supraconductivité de certains métaux, s'observent-elles sur des quantités macroscopiques, où le nombre d'atomes est de l'ordre du nombre d'Avogadro (6×10^{23} , six cent mille milliards de milliards). Dans ce type de situation, il n'y a aucune difficulté à utiliser les résultats probabilistes des calculs quantiques. A partir des années 1970, les physiciens ont inventé des méthodes pour manipuler et observer un seul électron, ou un seul ion, conservé pendant des heures (voire des jours, des mois) à l'aide de champs électriques et magnétiques qui le maintiennent loin de toute paroi, dans une enceinte à vide : on parle alors de particule unique « piégée ». Puis est apparue la microscopie de champ proche (microscope à effet tunnel, microscope à force atomique), qui a permis d'observer et de manipuler des atomes individuels déposés sur une surface. A la même époque, les progrès conceptuels et expérimentaux de l'optique quantique ont conduit au développement de sources où les photons sont émis un par un. Ces avancées expérimentales, couronnées par plusieurs prix Nobel, ont d'abord eu des conséquences importantes en physique fondamentale. C'est ainsi que le piégeage d'objets élémentaires uniques a fait considérablement progresser la précision des mesures de certaines grandeurs microscopiques, dont la valeur fournit souvent un test sévère de la théorie.

En parallèle avec les progrès expérimentaux, le piégeage d'objets microscopiques individuels a obligé les physiciens à se poser la question, soulevée elle aussi par Einstein, de la signification de la théorie quantique lorsqu'on l'applique à un objet unique. Même si la question apparaissait totalement académique dans les années 1930, où l'on était loin de penser qu'on pourrait un jour observer des objets microscopiques uniques, les physiciens de l'école de

Copenhague ne l'éluiaient pas : pour y répondre, ils invoquaient le « postulat de réduction du paquet d'onde » qui affirme que lorsqu'un système quantique interagit avec un appareil de mesure, ce système quantique cesse d'être dans une superposition d'états et « saute » dans l'un ou l'autre d'entre eux. Appliqué à un ion unique piégé soumis à des faisceaux lasers convenablement choisis, ce raisonnement conduit à prédire l'existence de sauts quantiques aléatoires entre un état « brillant » ou l'ion diffuse beaucoup de photons observables à l'œil nu et un état « noir » ou aucun photon n'est diffusé.

L'existence de ces « sauts quantiques », qui implique une évolution discontinue du système, avait été violemment contestée par nombre de physiciens parmi les plus grands (tel Schrödinger), qui y voyaient tout au plus un artifice commode, à valeur pédagogique, et semblaient penser que la description quantique ne s'appliquait qu'aux grands ensembles. Au milieu des années 1980, on a pu observer les sauts quantiques sur un ion unique piégé, dont la fluorescence varie brutalement lorsque l'atome saute d'un état à l'autre. Cette observation a beaucoup frappé les physiciens, et elle a déclenché de nouveaux progrès à la fois dans le domaine expérimental et dans le domaine théorique.

Du microscopique au mésoscopique et au macroscopique : la décohérence

Sachant que la mécanique quantique peut décrire le comportement des objets individuels microscopiques, on peut évidemment se demander si elle s'applique à des objets plus gros. On sait bien

qu'il n'y a pas besoin d'elle pour décrire le mouvement des planètes ou d'une pomme qui tombe : la physique classique s'en acquitte parfaitement, ce qui explique d'ailleurs sans doute la difficulté de comprendre les concepts quantiques à partir d'une intuition forgée dans le monde macroscopique. Mais il existe une échelle intermédiaire, l'échelle mésoscopique, où c'est l'objet lui-même – et pas seulement son matériau – qui doit être décrit par la mécanique quantique. On sait ainsi réaliser aujourd'hui des anneaux conducteurs mésoscopiques (à ne pas confondre avec les fils supraconducteurs), dont la taille est de l'ordre du micromètre, et dont la résistance électrique nulle ne peut être comprise qu'en considérant la fonction d'onde globale de l'ensemble des électrons de ce nanocircuit. Un autre exemple célèbre (prix Nobel 2001) d'objet mésoscopique est celui des condensats de Bose-Einstein gazeux, ensemble d'atomes (typiquement quelques millions) qui eux aussi doivent être décrits par une fonction d'onde quantique globale. Si ces objets mésoscopiques où une description quantique s'impose sont encore des curiosités des laboratoires de recherche fondamentale, il ne fait guère de doute que les progrès des nanotechnologies, en particulier la miniaturisation ininterrompue des composants semi-conducteurs, obligeront bientôt l'industrie de la microélectronique à utiliser une approche complètement quantique pour maîtriser ces nanocomposants.

Mais alors, si l'on observe un comportement quantique avec des objets de plus en plus gros, où se situe la frontière ? A vrai dire, on ne connaît pas la réponse à cette question, l'une des plus impor-

tantes qui soient posées aux physiciens du début du XXI^{ème} siècle. L'une des propriétés spécifiques de la physique quantique est l'existence des *superpositions d'états* : si un système possède plusieurs états quantiques possibles, il peut non seulement se trouver dans l'un d'eux, mais il peut également se trouver dans un état hybride formé à partir de ces états de base, une « *superposition cohérente* » de ces états. Ainsi, un atome arrivant sur une séparatrice à atomes, analogue à une lame semi-réfléchissante pour les photons, peut soit être transmis, soit être réfléchi, ce qui conduit à des trajectoires distinctes. Mais il peut aussi être dans une *superposition des états transmis et réfléchis*, c'est-à-dire *présent à la fois en deux points différents de l'espace*. On peut démontrer expérimentalement que cet état existe vraiment, en recombinaison des deux trajectoires et en observant des interférences, qu'on ne peut interpréter qu'en admettant que l'atome a suivi les deux chemins à la fois. Un tel comportement a effectivement été observé avec des objets microscopiques (électrons, photons, neutrons, atomes, molécules), ou mésoscopiques (courants électriques dans des nanocircuits), mais jamais avec des objets macroscopiques, alors que rien ne l'interdit *a priori* dans le formalisme quantique. Ce problème a attiré l'attention de nombreux physiciens, à commencer par Schrödinger qui en a donné une illustration amusante sous la forme du fameux chat qui pourrait à la fois être mort et vivant, ces deux états représentant un exemple particulièrement frappant d'états incompatibles. Pourquoi, dans le monde réel, n'observe-t-on pas la superposition cohérente des états « mort » et « vivant » ?

Est-il mort, est-il vivant ?



Les physiciens invoquent généralement la *décohérence quantique* pour expliquer l'impossibilité d'une superposition cohérente d'états d'objets macroscopiques. La décohérence doit se manifester dès qu'un système quantique interagit avec le monde extérieur. Reprenons l'exemple de l'atome dont les trajectoires se sont séparées puis sont recombinaées pour donner des interférences. Si on l'éclaire avec de la lumière laser, il devient possible d'observer sa trajectoire et de dire s'il suit un trajet ou l'autre. Mais la lumière d'éclairage perturbe l'atome, et les interférences disparaissent. On retrouve une situation classique, sans superposition cohérente : l'atome suit un chemin ou l'autre, pas les deux à la fois. Or, plus un objet est complexe et gros, et plus il est, en général, sensible aux perturbations extérieures qui font disparaître les interférences. La décohérence par interaction avec le monde extérieur serait donc la clef du passage entre comportements quantique et classique. Même si ce raisonnement est séduisant, de nombreuses questions restent posées. A l'heure actuelle, on n'a aucun argument vraiment convaincant permettant de savoir s'il existe une taille limite fondamentale au-dessus de laquelle la décohérence serait inévitable et les superpositions quantiques cesseraient d'exister. Une réponse à cette question aurait des implications immenses, tant sur le plan conceptuel que pour les technologies du futur basées sur l'hypothétique ordinateur quantique.

L'information quantique

Nous avons suggéré plus haut que la prise de conscience du caractère extraordinaire de l'intrication quantique, couplée à la maîtrise des objets microscopiques individuels, avait marqué le début d'une nouvelle révolution quantique. La portée de cette nouvelle révolution quantique pourrait aller bien au-delà des concepts, et conduire à des applications révolutionnaires dans le traitement et la transmission de l'information. C'est le domaine de l'*information quantique*, qui vise à mettre en œuvre ces concepts physiques nouveaux pour aboutir à deux types d'applications : d'une part la cryptographie quantique, qui commence à être opérationnelle, et d'autre part le calcul quantique, qui n'en est qu'à une phase de recherche fondamentale encore très éloignée des éventuelles applications.

La cryptographie a pour but de communiquer des informations codées sur un canal public sans que des tiers puissent les déchiffrer. Les progrès dans le codage et les tentatives de déchiffrement s'appuient d'une part sur des avancées mathématiques, d'autre part sur la puissance croissante des ordinateurs, et on

comprend que la sécurité d'un code repose sur l'hypothèse que l'espion qui tente de déchiffrer un message n'a pas un niveau de développement en mathématiques ou en informatique beaucoup plus avancé que l'expéditeur. Seule fait exception la méthode par clef de codage à utilisation unique : il s'agit d'une suite aléatoire de caractères, existant en deux exemplaires identiques entre les mains de l'émetteur et du récepteur. On montre, par un théorème à la rigueur toute mathématique, qu'il est alors possible de réaliser un codage inviolable d'un message, pourvu que sa longueur soit inférieure ou égale à celle de la clef secrète, qui ne doit être utilisée qu'une fois. La *cryptographie quantique* va permettre de renouveler la clef en distribuant à deux partenaires éloignés deux suites identiques de bits, avec la garantie qu'aucun espion n'a pu intercepter cette clef et en faire une copie. L'idée de base est qu'il est possible de détecter un espion tentant de prendre connaissance de la clef secrète par la trace qu'il laisse nécessairement, et que la mécanique quantique permet de préciser. Par exemple, dans l'un des schémas qui utilise des paires de photons intriqués pour engendrer les deux clefs identiques, on montre que la présence éventuelle d'un espion sur la ligne peut être démasquée par un test des inégalités de Bell.

Le *calcul quantique* a été lancé, au début des années 1990, par une découverte théorique : la démonstration mathématique que si l'on disposait d'ordinateurs quantiques, capables d'utiliser le phénomène d'intrication, on pourrait mettre en œuvre des algorithmes radicalement nouveaux permettant d'effectuer certaines opérations difficiles, comme la décomposition d'un nombre (grand) en facteurs premiers, dans des temps exponentiellement plus courts qu'avec les méthodes habituelles. Cette découverte a une portée conceptuelle considérable, puisqu'elle montre que la façon de faire les calculs (l'algorithme)

quantique) n'est pas indépendante du type de machine utilisé. Elle pourrait aussi avoir des conséquences pratiques immenses, puisque le cryptage (classique) des informations (par exemple sur la toile) repose aujourd'hui sur l'impossibilité de factoriser les très grands nombres en un temps raisonnable.

Encore faut-il être capable de construire un ordinateur quantique. De nombreux groupes dans le monde se sont lancés dans le développement de systèmes physiques réalisant la variable quantique élémentaire, le qubit, et l'unité de calcul de base, la porte logique quantique. Une porte logique quantique doit pouvoir combiner plusieurs qubits en donnant pour résultat un état intriqué. D'intrication en intrication, on obtient des états représentant simultanément un nombre immensément grand de situations, et il est possible d'effectuer des calculs massivement parallèles, même avec un nombre modéré de portes logiques quantiques. Plusieurs pistes sont en cours d'exploration, avec des bits quantiques reposant sur les systèmes les plus divers : atomes, ions ou photons uniques, mais aussi molécules complexes manipulées par les méthodes de la résonance magnétique nucléaire, ou jonctions Josephson, systèmes artificiels réalisés par les techniques de nanofabrication. L'ordinateur quantique existera-t-il un jour ? Il serait présomptueux de répondre, mais la recherche expérimentale sur les portes logiques quantiques est très active et a déjà obtenu des résultats intéressants. Il demeure une grande inconnue : saura-t-on maîtriser le problème de la *décohérence*, dont les effets sont d'autant plus dévastateurs que le système est plus grand ? Ce n'est qu'à cette condition que l'on pourrait croire en l'avenir de l'ordinateur quantique. Mais même si l'on n'aboutit pas à une réalisation concrète telle qu'on peut en rêver aujourd'hui, nul doute que cet effort de recherche marquera une étape importante dans l'histoire de l'informatique aussi bien que dans celle de la physique quantique.

La physique quantique : un défi pour l'intuition, une source de ruptures technologiques

Un siècle après son émergence, la physique quantique occupe toujours une position singulière. Elle met en jeu des concepts absolument étrangers à une intuition forgée par l'observation des objets et des phénomènes à notre échelle. Même si les physiciens s'y sont habitués, et même si l'on maîtrise le formalisme mathématique permettant d'en rendre compte, ces concepts restent déroutants. Aux difficultés originelles s'est ajouté le concept d'intrication. Par ailleurs, la question de la frontière entre le monde quantique et le monde classique, plaisamment illustrée par la parabole du chat de Schrödinger, reste un des problèmes conceptuels majeurs sur lesquels butent les physiciens, même si des progrès dans la compréhension des phénomènes de décohérence ouvrent des pistes intéressantes.

L'existence de questions non résolues ne doit pas nous faire oublier les succès extraordinaires de la physique quantique. La première révolution quantique, d'abord conceptuelle, a permis une avancée sans précédent dans la compréhension du monde au niveau microscopique, et a été à l'origine d'une révolution technologique formidable qui nous a fait plonger dans la société de l'information et de la communication. Peut-être vivons-nous aujourd'hui une histoire analogue, avec une nouvelle révolution quantique d'abord conceptuelle, mais qui pourrait avoir un immense impact sur la société si l'information quantique tient ses promesses. Certes nous en sommes loin. Mais on peut parier, sans trop de risques, que des applications que nous ne soupçonnons pas aujourd'hui émergeront tôt ou tard, car comment des phénomènes aussi extraordinaires ne stimuleraient-ils pas l'imagination des chercheurs et des inventeurs ? ■

Pour en savoir plus

Demain la physique (éditions Odile Jacob, 2004).
Einstein aujourd'hui (EDP sciences) : chapitre 2 (A. Aspect et P. Grangier).

Bell's theorem : the naive view of an experimentalist (A. Aspect) : téléchargeable librement sur <http://hal.ccsd.cnrs.fr/ccsd-00001079> ; version française sur http://www.institutoptique.fr/telechargement/inegalites_Bell.pdf.

Speakable and unspeakable in quantum mechanics (J. S. Bell, Cambridge University Press, 2ème édition, 2004).

Cours et séminaires de la chaire de Physique Atomique et Moléculaire du Collège de France (C. Cohen-Tannoudji, 1973-2003) disponibles sur : <http://www.phys.ens.fr/cours/college-de-france/>
Cours et séminaires de la chaire de Physique Quantique du Collège de France (S. Haroche) disponibles sur :

<http://www.lkb.ens.fr/recherche/qedcav/college/college.html>

La physique de l'eau liquide



par **Bernard Cabane**¹, **Rodolphe Vuilleumier**²

L'eau est le liquide le plus abondant à la surface de la terre. C'est un liquide dont les propriétés sont tout à fait surprenantes, à la fois comme liquide pur et comme solvant.

L'eau est un liquide très cohésif : ses températures de cristallisation et d'ébullition sont très élevées pour un liquide qui n'est ni ionique, ni métallique, et dont la masse molaire est faible. Ainsi, l'eau reste liquide à pression atmosphérique jusqu'à 100 °C, alors que l'extrapolation de la série H₂S, H₂Se, H₂Te donnerait une température d'ébullition de - 80 °C. Cette cohésion est assurée par les liaisons hydrogène entre molécules d'eau ; l'eau fait ainsi partie, avec les alcools et les amines, d'un petit groupe de liquides qu'on appelle liquides associés

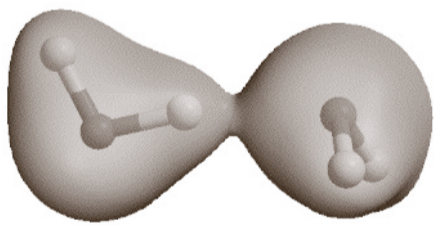


Figure 1. Densités électroniques du dimère, obtenues par calcul des orbitales localisées via la mécanique quantique. Le "pont" de densité électronique qui joint les deux molécules est la "signature" de la liaison H.

(Figure 1). Parmi ces liquides, la cohésion de l'eau est remarquable. Par exemple, l'eau a des températures de fusion et d'ébullition très supérieures à celles de l'ammoniac et de l'acide fluorhydrique, qui font des liaisons H plus faibles (ammoniac) ou spatialement moins développées (acide fluorhydrique).

¹ Correspondant de l'Académie des sciences, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire PMMH, ESPCI

² Chargé de recherche au CNRS, LPTMC, université Pierre et Marie Curie

La cohésion de l'eau se traduit aussi par une chaleur spécifique énorme : il faut 3 fois plus d'énergie pour réchauffer l'eau que pour la même masse de pentane, et 10 fois plus que pour la même masse de fer. Cette chaleur spécifique est aussi beaucoup plus élevée que celle du solide (plus de 2 fois supérieure à celle de la glace), alors que la plupart des liquides ont des chaleurs spécifiques proches de celles des solides correspondants. Elle est due à l'absorption de chaleur par la rupture de liaisons hydrogène : la chaleur absorbée par ces processus n'est pas disponible pour augmenter l'énergie cinétique des molécules, ce qui réduit l'élévation de température. Cette résistance aux variations de température a des conséquences climatiques importantes, puisque la capacité calorifique des océans leur fait jouer le rôle de régulateurs thermiques du climat.

L'enchaînement des molécules d'eau par des liaisons hydrogène donne aussi à l'eau liquide des propriétés diélectriques tout à fait remarquables. En effet, les molécules ainsi liées se polarisent mutuellement (Figure 2). Cette polarisation mutuelle augmente énormément la réponse du liquide à un champ électrique appliqué. Ainsi, la constante diélectrique de l'eau liquide est bien plus élevée que celle qu'on attendrait pour un liquide non associé sur la base du moment dipolaire de la molécule isolée (Figure 3)

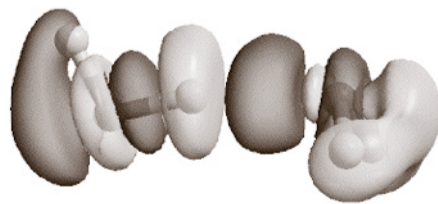


Figure 2. Variations de densité électronique causées par les interactions des deux molécules du dimère, par rapport aux densités électroniques de molécules isolées. Les régions où la densité électronique du dimère est excédentaire sont ombrées en gris, celles qui ont perdu de la densité électronique en blanc. L'alternance régulière de régions contenant un excès et un défaut de densité électronique crée une polarisation des molécules, qui augmente le moment dipolaire du dimère.

C'est grâce à cette constante diélectrique exceptionnelle que la vie a pu se développer dans l'eau. La plupart des molécules biologiques sont en effet ioniques, et les processus biochimiques requièrent la dissociation des paires d'ions et l'écrantage des charges électriques. C'est la polarisation des molécules d'eau autour d'un ion qui compense le champ électrique créé par l'ion, et permet ainsi la dissociation des paires d'ions et la dissolution des cristaux ioniques. L'exemple le plus courant de solution ionique est, bien sûr, l'eau de mer, qui ne contient que 9 molécules d'eau par paire d'ions.

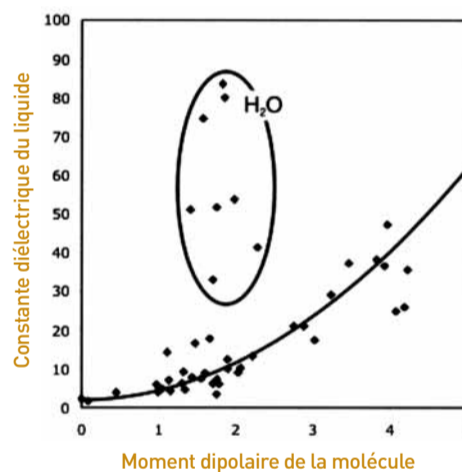


Figure 3. Constantes diélectriques relatives des liquides polaires usuels (variation parabolique en fonction du moment dipolaire de la molécule isolée) et de liquides associés (points situés très au-dessus). La valeur anormalement élevée de la constante diélectrique de l'eau est due à la polarisation mutuelle des molécules dans le liquide

L'eau est encore, dans les conditions usuelles de température et de pression, un liquide peu dense. Sa masse volumique est relativement peu élevée pour un liquide aussi cohésif (les huiles ont des densités comparables, mais sont beaucoup moins cohésives). Cette faible masse volumique exprime le fait que le volume occupé par les atomes est faible par rapport au volume total : les atomes de la molécule d'eau n'occupent que 49 % du volume disponible par molécule. Une grande partie du volume de l'eau liquide est donc formée de cavités. Ainsi l'eau présente-elle toute une série d'anomalies liées aux variations de son volume. Tout d'abord, la variation en température de sa masse volumique est anormale à basse température. Pour

presque tous les liquides, le volume occupé diminue régulièrement lorsqu'on abaisse la température, par suite de la réduction du désordre et surtout du nombre de lacunes excitées thermiquement. Au contraire, l'eau se dilate quand on la refroidit en dessous d'une température appelée température du maximum de densité (TMD + 4 °C pour H₂O). L'eau liquide à basse température est un liquide peu dense par rapport à ce qu'on attendrait d'après sa densité à haute température.

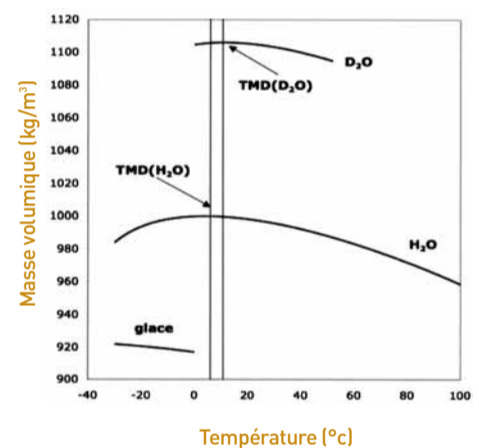


Figure 4. Variation de la masse volumique de l'eau liquide avec la température. Pour les liquides "normaux", la masse volumique décroît de manière monotone. La température du maximum de densité de l'eau vaut 4 °C dans H₂O, 11,2 °C dans D₂O et 13,4 °C dans T₂O. La décroissance de la densité à basse température résulte d'un changement de la structure du liquide, qui crée systématiquement des liaisons et des cavités

Pour presque tous les liquides, le volume occupé se réduit d'environ 10 % lors de la cristallisation, car les atomes ou les molécules sont empilés de manière plus efficace dans le cristal. Au contraire, l'eau se dilate d'environ 9 % en cristallisant. Cette augmentation de volume, qui fait flotter la glace sur l'eau, a des conséquences environnementales considérables : si la glace était plus dense que l'eau liquide, toute la glace formée dans les régions arctiques coulerait au fond des océans au lieu de former une banquise qui les isole thermiquement des températures extérieures, et la production de glace continuerait jusqu'à congélation complète de ces océans. Les propriétés de l'eau confinée dans des pores ou des films nanométriques diffèrent aussi de celles des autres

liquides. La plupart des liquides se stratifient lorsqu'ils sont confinés entre deux surfaces planes, et ils résistent comme des solides lorsqu'on essaie de les faire s'écouler. Au contraire, l'eau reste fluide même dans des géométries extrêmement confinées. Cette résistance à la solidification semble être due aux anomalies volumiques de l'eau, qui devient plus fluide lorsqu'elle est soumise à une pression. La persistance de l'état fluide de l'eau est capitale pour le fonctionnement des cellules biologiques : en effet, de nombreux processus requièrent le déplacement de couches d'hydratation avant le contact entre macromolécules. De même le passage des ions à travers les canaux qui traversent les membranes n'est possible que grâce à la fluidité de cette eau confinée.

Les propriétés de l'eau comme solvant sont également très surprenantes. On comprend bien que les molécules polaires ou ioniques se dissolvent facilement dans l'eau, tandis que les molécules apolaires se dissolvent beaucoup plus difficilement. Cette préférence est à l'origine de phénomènes physico-chimiques comme la micellisation des molécules de tensioactifs, la formation des membranes biologiques, et le repliement ou la dénaturation des protéines. Cependant le passage dans l'eau de ces molécules hydrophobes ou amphiphiles se fait de manière tout à fait anormale : alors que la dissolution dans n'importe quel solvant est un processus défavorable du point de vue des énergies, mais favorisé par l'entropie, c'est l'inverse qui se produit pour la dissolution des molécules apolaires dans l'eau. Ces effets varient fortement avec la température, et on trouve que les solubilités augmentent aussi bien quand on va vers les basses températures (c'est bien pour les poissons, qui respirent l'oxygène dissous) que lorsqu'on va vers les températures élevées (l'eau super-critique est un bon solvant, utilisé, par exemple, pour extraire la caféine). Le minimum de solubilité coïncide à peu près avec le minimum de densité de l'eau pure, ce qui suggère que ces solubilités anormales sont liées à l'équation d'état (anormale elle aussi) de l'eau liquide.

Les théories anciennes attribuaient toutes ces anomalies au fait que les molécules d'eau sont liées par des liaisons H. En ce sens, l'eau devrait avoir des propriétés « en ligne » avec celles d'autres liquides associés (éthanol, glycols, formamide). Pour les propriétés de cohésion, c'est une bonne hypothèse de départ – bien que les propriétés de l'eau (densité d'énergie cohésive, constante diélectrique) soient supérieures à celles des liquides comparables. Pour les autres propriétés, cette explication n'est pas suffisante : les autres liquides associés ne partagent pas les propriétés volumiques anor-

males de l'eau, ni son polymorphisme, ni son comportement comme solvant. Nous découvrirons peut-être un jour que chacune des propriétés anormales de l'eau existe aussi dans un autre liquide. Cependant il est remarquable qu'un seul liquide rassemble autant d'anomalies. Il y a donc un besoin d'explication, auquel ne répondent pas les théories développées pour les liquides simples.

On ne compte plus les théories proposées pour expliquer telle ou telle anomalie de l'eau, et abandonnées parce qu'elles n'expliquent que certaines anomalies, mais pas l'ensemble des propriétés de l'eau. On peut ainsi citer la théorie des « icebergs », dans sa version liquide pur (l'eau liquide serait formée de petits groupes de molécules ayant la structure de la glace, séparées par un liquide désordonné) et dans sa version solvant (les molécules d'eau se réorganiseraient autour d'un soluté apolaire pour former plus de liaisons hydrogène que l'eau pure, ce qui expliquerait le coût entropique de l'introduction du soluté). De nombreuses théories ont aussi postulé des structures particulières, comme des structures de type « clathrates », semblables aux cages que forment les molécules d'eau dans les hydrates de gaz cristallins. On discute actuellement une série de modèles qui postulent que l'eau serait formée de deux liquides mélangés dans des proportions qui changeraient avec la température et la pression, mais ne se sépareraient que dans des conditions de température inaccessibles aux expériences.

Il peut sembler paradoxal qu'une civilisation qui comprend la physique de l'infiniment grand et de l'infiniment petit, et qui est capable de prouesses technologiques considérables, n'arrive pas à décrire le liquide dans lequel tous les systèmes vivants fonctionnent. En fait, il s'agit d'un problème dur. Les verrous tiennent, pour une part, à une limitation des informations expérimentales. En effet, nous ne savons pas mesurer, dans un liquide, les fonctions de corrélation qui décrivent les arrangements de petits groupes de molécules (3 ou plus) : depuis un demi-siècle, nous sommes limités aux fonctions de corrélation de paires. Ils sont aussi dus à notre incapacité à simplifier correctement la description d'un liquide dans lequel les molécules forment des liaisons ayant un fort caractère orientationnel. Nous savons, bien sûr, décrire ces liaisons, et nous pouvons simuler numériquement les mouvements des molécules soumises à ces interactions et à l'agitation thermique : nous pouvons ainsi reproduire certaines propriétés du liquide (mais pas toutes à la fois !) Par contre, nous ne savons pas, actuellement, construire une théorie de l'eau en utilisant les outils de la physique statistique ■



par Jean Iliopoulos ¹

Comme toutes les sciences de la nature, la physique est, avant tout, une science d'observation et d'expérience. La démarche théorique est née de la volonté de dépasser le stade du simple catalogue des résultats de l'observation. Le stade de l'expérimentation, c'est-à-dire de la répétition du phénomène observé sous conditions contrôlées, présuppose déjà une analyse théorique. Dégager les régularités sous-jacentes entre les données de l'expérience, créer de nouveaux concepts et formuler les lois qui les expriment, construire des modèles et des théories avec une puissance prédictive, sont les buts de la démarche théorique.

Le 20^{ème} siècle fut celui des grandes révolutions scientifiques. Il a commencé par la théorie de la relativité et la mécanique quantique, qui ont inauguré l'ère de la physique microscopique. Durant ce siècle notre pouvoir de résolution a gagné plus de dix ordres de grandeur, nous offrant la vision d'un monde étrange. Ces progrès ont révolutionné nos idées sur la structure de la matière et celle de notre Univers. Plusieurs de nos anciens problèmes ont été résolus et, comme cela est toujours le cas en science, ces solutions nous ont permis de formuler de nouvelles questions que nous n'étions pas en mesure d'envisager auparavant. Ces bouleversements se sont étendus à tous les domaines de la physique et à toutes les échelles de la matière, du monde infiniment petit des particules élémentaires, à celui, infiniment grand, des sciences de l'Univers, ou celui, infiniment complexe de la matière macroscopique. Dans cette note, nous allons nous limiter à deux domaines intimement liés, celui de la composition de la matière au niveau le plus microscopique et celui de la structure de l'Univers et la cosmologie. A l'aube du 21^{ème} siècle les défis que la Nature semble nous poser dans ces domaines apparaissent comme les plus profonds et les plus fascinants jamais affrontés.

¹ Membre de l'Académie des sciences, directeur de recherche au CNRS, laboratoire de physique théorique, École normale supérieure, Paris

Les défis de la physique théorique

La Nature présente autour de nous une si incroyable diversité, que déjà dans l'Antiquité les hommes se demandaient si elle était fondamentale ou induite. Aujourd'hui nous connaissons la réponse : si la Nature est pléthorique en formes et en propriétés, elle est extrêmement économe en éléments de base et en forces fondamentales. A toutes les échelles de la matière, des particules microscopiques produites dans nos accélérateurs jusqu'aux amas de galaxies les plus lointains, et dans tous les degrés de complexité, de l'atome d'hydrogène le plus simple jusqu'aux macromolécules biologiques les plus compliquées, tous doivent leur structure à quatre forces fondamentales. Par ordre d'intensité croissante, ce sont : (I) Les interactions gravitationnelles, responsables de la chute des pommes sur terre et de la structure de l'Univers ; (II) les interactions faibles, responsables de désintégrations radioactives ; (III) les interactions électromagnétiques, responsables de la structure des atomes et des molécules et (IV) les interactions fortes, responsables de la cohésion de la matière nucléaire. La description théorique de ces interactions a longtemps présenté un grand défi pour les physiciens. Le progrès décisif fut accompli lorsqu'on a compris qu'elles sont toutes liées à un principe géométrique. Sous le titre Modèle Standard est connu un schéma théorique qui décrit avec une grande précision et dans un cadre unifié les trois dernières interactions. Son accord avec l'expérience est spectaculaire. Il fut élaboré autour de 1970 et continue à exercer une influence profonde dans notre vision de la physique fondamentale. Parmi les questions que cette théorie permet de formuler est celle de l'origine des masses dans la nature. Pourquoi certaines particules sont-elles massives ? Question étrange à première vue, tant le concept de masse nous semble primordial, mais après réflexion, la masse apparaît plutôt comme une irrégularité. Pourquoi, quand et comment, une partie de l'énergie de la grande explosion du Big Bang s'est-elle transformée en particules massives et n'est pas restée sous forme de radiation immatérielle ? Le Modèle Standard pro-

pose un cadre pour répondre à cette question. Nous pensons que l'origine des masses est due à une transition de phase survenue les premières fractions de seconde après le Big Bang. Un des buts du grand collisionneur LHC, en cours de construction au CERN à Genève, est justement l'étude de ce mécanisme. Sa compréhension détaillée sera un des grands défis de la physique théorique de la prochaine décennie.

Nos connaissances sur le nombre et l'identité des constituants élémentaires de la matière changent avec le temps, au fur et à mesure que nous explorons des distances plus courtes. Ainsi nous avons parcouru la chaîne molécules ? atomes ? électrons + noyaux ? électrons + protons + neutrons ? électrons + quarks ?? et nous ne savons pas s'il existe une fin à cette démarche, et encore moins laquelle. Les accélérateurs de la nouvelle génération, avec leur pouvoir de résolution accru, découvriront-ils une nouvelle couche de cet oignon fondamental ? Déjà avec les quarks nous sommes face à une nouvelle énigme : Les constituants découverts dans chaque étape précédente existent aussi en tant que particules libres. Ce n'est pas le cas des quarks. Ils forment les protons et les neutrons, qui sont les constituants des noyaux, mais nous n'avons jamais réussi à les extraire et les isoler. Les forces nucléaires entre protons et neutrons sont dérivées à partir des interactions fortes fondamentales entre quarks de la même façon que les forces de Van der Waals entre atomes et molécules sont dérivées à partir des interactions électromagnétiques entre les particules chargées. Cette interaction fondamentale entre les quarks semble avoir deux propriétés remarquables. La première est la liberté asymptotique ; l'intensité de l'interaction augmente avec la distance, faible à des distances très courtes, elle devient très forte aux alentours de 10^{-13} cm, la taille caractéristique des protons et des neutrons. La deuxième, qui est probablement une conséquence de la première, est la propriété du confinement ; les quarks n'apparaissent pas comme des particules libres. Seuls leurs états

liés, tels les protons, les neutrons, etc, peuvent être isolés. Démontrer cette propriété à partir des équations fondamentales de la théorie est un autre grand défi pour la physique théorique. C'est seulement lorsque nous aurons relevé ces deux défis que nous pourrons dire que le Modèle Standard a révélé ses secrets.

Malgré (ou à cause de ?) son énorme succès, le Modèle Standard laisse plusieurs questions sans réponse. Une des plus fondamentales est, sans doute, celle des interactions gravitationnelles, que le Modèle ignore totalement. Cela n'affecte pas son succès phénoménologique, parce que l'influence de ces interactions n'est pas mesurable à l'heure actuelle dans les expériences des particules élémentaires. Pendant plusieurs années les théoriciens ont essayé, sans succès, d'étendre les méthodes de la théorie quantique des champs, qui firent le triomphe du Modèle Standard, aux interactions gravitationnelles. Toutes ces tentatives sont restées infructueuses. Les deux grandes découvertes du début du vingtième siècle, la théorie de la relativité générale et la mécanique Quantique, semblaient inconciliables. Cet échec marqua la fin d'un chemin, celui des particules élémentaires ponctuelles. Il y a des physiciens qui hésitent encore à franchir le pas décisif, mais pour beaucoup d'entre nous la conclusion est inéluctable : à l'échelle microscopique, plus petite que tout ce qu'on a pu mesurer jusqu'à aujourd'hui, les constituants de la matière ne sont plus des particules ponctuelles mais des objets étendus. Les cordes, objets unidimensionnels, sont les plus simples des objets étendus. C'est sur la théorie quantique des cordes que les efforts des théoriciens se sont concentrés au cours des dernières années, mais cette théorie contient aussi des objets d'autres dimensionalités, tels les membranes etc. Sa structure mathématique est plus compliquée que celle de la théorie quantique des champs, objets ponctuels, sans extension spatiale. Pour les physiciens la théorie des cordes fut souvent l'occasion de rencontrer des problèmes mathéma-

tiques parmi les plus avancés. Comme toute théorie d'objets étendus, la théorie des cordes contient une longueur fondamentale, celle de la corde. Sa valeur naturelle est liée à la constante de Newton qui caractérise l'intensité des forces gravitationnelles. Exprimée en centimètres, elle est égale à 10^{-33} cm, bien plus faible que le pouvoir de résolution de tout appareil construit par l'homme. A titre de comparaison, les plus puissants des accélérateurs de particules actuellement en service, peuvent explorer des distances de l'ordre de 10^{-16} cm. D'après la théorie des cordes, à des distances de l'ordre de 10^{-33} cm la géométrie de l'espace-temps change. Tous les processus, qui dans le cadre théorique du Modèle Standard étaient ponctuels, acquièrent une extension spatio-temporelle. La théorie des cordes en est encore au stade de la recherche et n'a reçu aucune confirmation expérimentale. Même au plan théorique, nombreux sont les problèmes qui ne sont pas encore élucidés, mais il y a déjà plusieurs résultats importants. Certains peuvent être mis à l'épreuve expérimentale avec la nouvelle génération d'accélérateurs qui sont en construction. C'est le seul cadre théorique connu qui contient la gravitation quantique. Dans ce cadre les particules correspondent aux modes de vibration d'une corde. Ainsi, à chaque particule connue, décrite par le mode fondamental, correspondrait une tour d'états associés aux modes excités. Pour sa formulation cohérente la théorie des cordes nécessite l'introduction d'une nouvelle symétrie, appelée supersymétrie, qui relie des bosons, particules de spin entier, à des fermions, particules de spin demi-entier. L'existence d'une telle symétrie signifierait que la moitié du monde a échappé, jusqu'à maintenant, à notre détection. Ici encore, les résultats du collisionneur LHC seront d'une importance cruciale. La corde se déplace dans un espace-temps ambiant. Au niveau classique cet espace peut avoir n'importe quel nombre de dimensions. Un des résultats les plus inattendus de la théorie est que la cohérence au niveau quantique impose à l'espace ambiant une dimensionnalité fixe. Une corde quantique supersymétrique ne peut

Dossier

évoluer que dans un espace-temps à dix dimensions, neuf dimensions d'espace et une de temps. Un tel résultat ne peut être compatible avec notre expérience quotidienne que si les six dimensions supplémentaires sont compactes, plus petites que tout ce qu'on a pu mesurer. Quel sera l'ordre de grandeur de l'échelle de compactification ? Peut-on imaginer que la prochaine génération d'accélérateurs, en affinant notre pouvoir de résolution, découvre des dimensions supplémentaires d'espace ? Quelle sera la topologie de l'espace compact ? Quelle sera sa relation avec les symétries du Modèle Standard ? Toutes ces questions montrent que notre conception de l'espace est en train de subir une évolution

qu'aujourd'hui nous ne maîtrisons que très partiellement. Obtenir une théorie unifiée de toutes les interactions, le rêve de toute une génération de physiciens, et comparer ses prédictions avec les résultats de l'observation et de l'expérience, est, probablement, le plus grand défi de la physique théorique aujourd'hui. Défi que la faiblesse des interactions gravitationnelles sous conditions normales rend très difficile. Il n'y a guère que les premières fractions de seconde après le Big Bang où la gravitation quantique ait pu jouer un rôle important. Retracer l'histoire de l'Univers avec précision dépasse encore de très loin notre capacité d'analyse théorique et les questions encore ouvertes couvrent toute

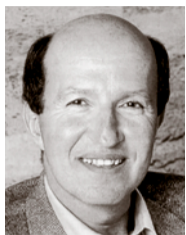
la cosmologie. Déjà le moment du Big Bang est un moment singulier que nous ne pouvons pas décrire par la gravitation classique. Quelle sera sa nature exacte dans le cadre de la théorie quantique unifiée ? Nous sommes certains que l'Univers primordial est passé par plusieurs transitions de phase, mais nous ignorons leurs mécanismes précis. Si nous analysons le contenu énergétique de l'Univers aujourd'hui, nous constatons que la matière visible ne correspond qu'à environ 5 %. 25 % semble être de la matière non encore identifiée, on parle de matière noire, et les 70 % qui restent seraient une forme d'énergie qu'on appelle énergie noire, ou constante cosmologique. Quelle est

l'origine de toutes ces composantes ? La matière noire est-elle liée au monde miroir prédit par la supersymétrie ? Serons-nous capables un jour de calculer la valeur de cette mystérieuse constante cosmologique ?

Toutes ces questions n'épuisent pas la problématique actuelle en physique théorique des particules élémentaires et de la cosmologie, mais en donnent une idée assez fidèle. Nous sentons tous le besoin urgent de nouveaux résultats expérimentaux pour nous aider à trouver notre chemin dans la pléthore de questions, et de nouvelles idées théoriques pour pouvoir formuler de nouvelles questions ■

*Toutes
ces questions
montrent
que notre conception
de l'espace
est en train
de subir une évolution
qu'aujourd'hui
nous ne maîtrisons
que très partiellement*

Le retournement temporel des ondes



Entretien
avec Mathias Fink¹

par Paul Caro²

Question :

Spécialiste de la physique des ondes acoustiques, vous avez participé à la réalisation du premier échographe donnant en temps réel des images médicales à haute résolution. Comment êtes-vous arrivé à ce résultat ?

J'ai commencé ma recherche en physique du solide sur l'étude de certains semi-conducteurs, puis, après ma thèse de 3ème cycle, j'ai décidé d'évoluer vers une physique plus appliquée. C'était l'époque où l'on commençait à s'intéresser aux nouvelles techniques de l'imagerie médicale, comme l'échographie ultrasonore ou la RMN. Mon intérêt s'est déplacé vers ces problèmes d'imagerie. En fait, j'étais intéressé par l'archéologie sous-marine qui manque d'outils pour voir les épaves au fond de la mer. J'ai travaillé dans un laboratoire de Paris VI à Saint-Cyr-l'École sous la direction de Pierre Alais pour tenter d'appliquer des systèmes acoustiques à l'exploration sous-marine, mais nous n'avons pas pu avoir des moyens financiers suffisants. Je me suis donc rabattu sur un autre type d'images : celles de l'intérieur du corps humain et nous avons réalisé pendant ma thèse d'État un échographe ultrasonore à haute résolution.

Construit dans les années 75 cet appareil marchait déjà bien, il donnait 50 images par seconde et on a vu les premières images de cœur, des images de fœtus, avec une résolution du millimètre. Les industriels se sont intéressés à cette technique et la mise au point des premiers prototypes s'est faite à l'Hôpital Cochin.

¹ Membre de l'Académie des sciences, professeur à l'université Denis-Diderot, directeur du laboratoire Ondes et acoustique, ESCPI

² Correspondant de l'Académie des sciences, directeur de recherche honoraire au CNRS

Un système d'imagerie comporte généralement trois parties : une source de rayonnement, un mode d'interaction avec la matière produisant des contrastes et un système de détection qui permet d'obtenir des images. Comment se combinent ces facteurs dans le cas de l'imagerie acoustique ?

On éclaire notre objet, le corps humain, au moyen de transducteurs piézoélectriques qui transforment un courant électrique en vibrations qui se propagent à distance. Le corps humain, c'est principalement de la matière molle, les ondes ultrasonores ne s'y propagent que sous la forme d'ondes de compression (longitudinales). On ne peut pas envoyer d'ondes de cisaillement aux fréquences ultrasonores car elles sont trop absorbées. Les ondes de compression avancent dans le corps humain à une vitesse de l'ordre de 1 500 m/seconde, ce qui est en gros la vitesse des ondes dans l'eau car le corps humain ressemble à de l'eau pour ces fréquences. Mais en fait, ce n'est pas tout à fait de l'eau, il y a partout de petites zones pour lesquelles le module de compressibilité change un petit peu autour de sa valeur d'équilibre. A ces endroits là, des échos prennent naissance mais les variations du module de compressibilité sont très faibles et les images ultrasonores sont très peu contrastées. On voit de très nombreux échos qui viennent de microstructures qui sont un peu moins compressibles que la structure de base. Les échos sont détectés par les transducteurs qui peuvent aussi fonctionner comme des microphones et il faut ensuite traiter les échos détectés pour créer une image, et je vais revenir là dessus.

L'échographie donne des images très rapidement, 50 images par seconde, on voit donc le mouvement dans le corps humain et c'est une information unique, mais le contraste est mauvais. En fait l'information obtenue n'est pas du tout celle que l'on a imaginé pendant des dizaines d'années. On pensait que le contraste observé était le même que celui que le médecin sent lorsqu'il palpe les organes. Une des méthodes de détection des cancers, en particulier pour le cancer du sein, consiste à pincer le sein et à rechercher des endroits plus durs. Mais quand le médecin pince les

tissus c'est une action mécanique, comme les ondes acoustiques, mais ce n'est pas du tout la même action parce que c'est une action mécanique très lente, de très basse fréquence. Et ce que le médecin ressent n'est plus le module de compressibilité des tissus mais c'est le module d'Young et dans la matière molle ce module est proportionnel à un autre module, le module de cisaillement. Le médecin sent donc des modules que ne perçoivent pas les ultrasons. Les ultrasons ne mettent pas en évidence la dureté des tissus. Le contraste d'une image échographique ne suffit pas à détecter toutes les pathologies des organes. Alors, une nouvelle technique d'imagerie ultrasonore a été mise au point depuis 5 ou 6 ans au laboratoire dans laquelle on rajoute aux ultrasons des ondes de cisaillement basse fréquence pour faire une image de ce module de cisaillement. C'est le domaine de l'élastographie transitoire et du Supersonic shear Imaging.

Quelle technique utilisez-vous pour faire les images ?

Les échos qui viennent de toutes les petites inhomogénéités du corps humain arrivent sous la forme d'ondes divergentes, des ondes qui divergent à partir de tous ces petits obstacles. La bonne façon de faire une image c'est d'utiliser un instrument qui transforme les ondes divergentes en ondes convergentes. Le plus employé c'est la lentille et les ondes convergent vers ce qui s'appelle l'image de l'objet. Mais en acoustique il n'est pas très pratique de faire des lentilles, alors on utilise un principe plus intéressant. Les échos qui reviennent sont captés dans des mémoires électroniques où ils sont répartis en fonction de leur temps d'arrivée. Pour transformer les ondes divergentes en ondes convergentes on fait une opération que l'on appelle le *renversement du temps*. Pour faire converger les ondes divergentes il suffit de repasser à l'envers le « film » de l'arrivée des échos. On utilise une propriété très particulière des ondes, ce sont en effet des phénomènes réversibles qui peuvent avancer dans un sens dans le temps ou dans le sens opposé. Une façon élégante de faire des images en acoustique, c'est de capter tout le champ qui vient d'un objet, de le stocker dans

des mémoires électroniques et ensuite de retourner le temps dans les mémoires. Tout ce qui est reçu en premier est renvoyé en dernier et tout ce qui a été reçu en dernier est renvoyé en premier. On peut émettre vers le milieu d'origine ce champ retourné temporellement, et les ondes vont reconverger exactement sur l'objet qui a donné naissance à l'écho, mais cela ne donne pas une image. Pour faire celle-ci on effectue le retournement temporel dans l'ordinateur suivi d'une phase de propagation. C'est le principe utilisé dans nos derniers appareils pour faire des images échographiques et on arrive à faire non pas 50 images par seconde, mais en stockant tout ce qui revient du corps humain 5 000 fois par seconde, on peut dans l'ordinateur retourner le temps 5 000 fois par seconde, et donc obtenir 5 000 images par seconde.

Le principe du renversement temporel des ondes est celui du « verlan ». L'opération n'est pas une opération mathématique complexe, elle est simple. Au lieu d'avoir à gérer dans un ordinateur des signaux et de faire beaucoup de traitement de signal, on a juste une option dans la lecture des mémoires électroniques. Quand les signaux rentrent dans une mémoire ils ont une adresse qui évolue au fur et à mesure de la réception. Il suffit de relire en inversant la séquence des adresses. C'est quelque chose de très facile, juste de la manipulation d'adresses mémoire. En fait, c'est une opération que ne coûte rien qui est excessivement simple à mettre en œuvre. Il n'y a aucune phase de calcul quand on fait du retournement temporel, les composants électroniques sont très bien adaptés à cette opération. Les mémoires électroniques sont bon marché, elles ont bénéficié de la Loi de Moore depuis les années 90 et on peut retourner temporellement des ondes de fréquences de plus en plus élevées y compris des ondes électromagnétiques...

Vous utilisez aussi cette technique pour des problèmes métallurgiques ?

Le corps humain se comporte comme un fluide vis à vis des ultrasons. Par contre lorsque l'on envoie des ultrasons dans un solide dur, comme une pièce d'avion ou une pièce de centrale nuclé-



aire ou des alliages compliqués, les ultrasons se propagent selon plusieurs modes, il y a des ondes de compression, (les ondes longitudinales), il y a des ondes de cisaillement. Les deux types d'onde se propagent en même temps et elles avancent à des vitesses différentes. Chaque fois que ces ultrasons rencontrent des obstacles, suivant la géométrie de ces obstacles il y a des conversions d'un type d'onde dans l'autre type d'onde et il en résulte une espèce de cacophonie. En particulier quand il s'agit d'un alliage formé de grains avec différentes propriétés cristallines. Les ultrasons cognent un grain, rebondissent, cognent un autre grain et il s'installe un régime de diffusion multiple, la propagation des ondes est très compliquée, se fait avec un grand désordre, et lorsque l'on écoute les échos qui reviennent de certains alliages on n'entend que du bruit et dans ce bruit peuvent être cachés des échos venant de structures indésirables comme des défauts. Le principe du retournement temporel peut être utilisé pour renvoyer les échos du milieu dans le milieu lui-même en changeant la marche du temps. En amplifiant les échos, en changeant leur intensité, on peut conduire une espèce de processus itératif où l'on éclaire un objet, on écoute tous les échos qui reviennent, on les stocke dans des mémoires électroniques, et une fois qu'ils sont captés, on retourne temporellement les mémoires et on recrache toute cette information dans le milieu lui-même. Puis on écoute à nouveau, et en itérant le processus on démontre que l'on fabrique des ondes qui, malgré la complexité du milieu, focalisent vers les défauts principaux. On peut donc découvrir les défauts dans un alliage métallique. Nous avons mené ce type d'étude avec la SNECMA et développé un appareil, qui est en phase d'industrialisation, pour détecter des défauts dans des pièces d'avion fabriquées dans des alliages de titane qui sont des milieux difficiles à explorer à l'heure actuelle par des méthodes classiques.

Quelles sont les autres applications du retournement temporel dans le domaine médical ?

Nous avons construit un appareil pour détruire les calculs du rein avec une grande précision. Il existe des instruments qui focalisent des ondes de choc dans le rein et qui détruisent un calcul, en plusieurs milliers de tirs. Le traitement est long, et pendant que ces ondes sont envoyées, les calculs rénaux bougent avec la respiration et les ondes les ratent trois fois sur quatre, d'où des dommages aux tissus du rein. Nous avons exploité le principe du retournement temporel de la façon suivante : on envoie une première onde ultrasonore dans le rein, on écoute tous les échos,

celui d'un calcul est bien plus fort parce que c'est un objet dur. On retourne temporellement les échos, et en itérant on apprend à créer un faisceau qui ne va que sur l'objet le plus dur, le calcul, et après on amplifie très fort le signal pour casser ce calcul. Testé à l'hôpital notre appareil marche très bien mais il a l'inconvénient d'être beaucoup plus cher qu'un lithotripteur classique...

Nous sommes en train d'étudier un autre appareil destiné, lui, à brûler les tumeurs du cerveau par ultrasons à travers le crâne. Le crâne est un obstacle terrible pour les ultrasons qui ne s'y propagent pas en ligne droite. Nous avons réussi, en utilisant la technique du retournement temporel, à focaliser des ultrasons à travers le crâne dans le cerveau grâce à un casque équipé de 300 petits transducteurs piézoélectriques. Nous avons traité 22 brebis à l'Institut Montsouris en collaboration avec des neurochirurgiens de l'Hôpital La Pitié-Salpêtrière. On a appris, sur des brebis vivantes, à focaliser des ultrasons dans une toute petite zone du cerveau à travers le crâne pour brûler cette zone. Lorsque l'on envoie des ultrasons de haute puissance pendant quelques secondes on élève la température des tissus jusqu'à 65° et on les détruit. Nous avons donc démontré la possibilité de brûler des volumes de quelques mm³ dans le cerveau dans une aire choisie à l'avance, en utilisant le principe du retournement temporel. Ces expériences peuvent être les prémices d'un outil de chirurgie extracorporelle qui, à distance, pourrait détruire des tissus dans le cerveau, un organe difficile à opérer puisque, habituellement, on est obligé de recourir à une craniotomie que l'on pourrait ainsi éviter.

Et dans le domaine des communications ?

Il y a beaucoup d'applications sous-marines. Les sons se propagent dans la mer avec une célérité qui varie avec la profondeur et quand la mer est peu profonde (100 m) les ondes acoustiques ricochent à la surface et sur le fond de la mer. Les ondes acoustiques se propagent très bien, très loin, mais le régime de réverbération qui apparaît dans les petits fonds crée une véritable cacophonie. Les sonars qui cherchent à détecter des mines ou des plongeurs par petits fonds sont très gênés. Une très belle application du retournement temporel, c'est d'éliminer toute la réverbération et d'autofocaliser sur les cibles. Cette technique s'est beaucoup développée aux États-Unis avec l'appui de la Navy qui a financé un grand nombre de recherches. Nous avons dernièrement fabriqué un premier sonar français à retournement temporel en cours de

tests à Brest. Il y a une deuxième application intéressante en télécommunication sous-marine. Les ondes électromagnétiques peuvent difficilement se propager dans la mer. Comment un petit sous-marin qui se déplace au fond de la mer peut-il envoyer beaucoup d'informations vers sa base ? Comment communiquer entre deux endroits dans la mer ? Le retournement temporel permet de compenser tous les défauts de la réverbération et nos collègues américains ont commencé à tester des systèmes de communication sous-marins à haut débit par retournement temporel. Je crois que ce sera la première application qui sera vraiment industrialisée.

Un autre aspect intéressant c'est le retournement temporel des ondes électromagnétiques. Un petit téléphone peut envoyer pour se faire repérer un bref signal électromagnétique de quelques nanosecondes de durée. Dans une ville, les ondes électromagnétiques ne vont pas en ligne droite, elles cognent les rues, les maisons, elles passent leur temps à ricocher d'une maison à l'autre et quand elles sont captées par une antenne de base, le signal capté dure des microsecondes à cause de la réverbération. Mais si ce long signal capté est retourné temporellement, envoyé en verlan, il « revit sa vie passée » et revient sur la petite antenne du téléphone sous la forme d'un signal qui dure quelques nanosecondes. On peut ainsi créer un canal de communication discret entre un téléphone et une base et la base peut envoyer un message quelconque qui ne se focalisera que sur le bon téléphone, en évitant ainsi de polluer toute la ville d'ondes électromagnétiques destinées à tous les utilisateurs. Il y a beaucoup d'équipes aux États-Unis qui travaillent là-dessus, dans l'idée d'envoyer beaucoup plus d'informations sur les téléphones mobiles, de façon à réaliser une communication à très haut débit. Nous

avons construit des miroirs à retournement temporel avec des mémoires électroniques très rapides qui permettent maintenant de retourner temporellement des ondes électromagnétiques dans la gamme de fréquences de 2 GHz. Aujourd'hui, les performances atteintes par les composants électroniques permettent de faire du retournement temporel sur des ondes radar ou sur le type d'ondes électromagnétiques utilisées pour les communications.

Il y a beaucoup d'autres applications potentielles du retournement temporel dans le domaine du sondage acoustique ou pour la domotique, mais aussi dans la sonochimie, en particulier pour le contrôle de la sonoluminescence dans l'espoir d'atteindre un seuil de confinement inertiel dans la compression acoustique des bulles à l'origine de l'émission lumineuse.

Quelles sont les ouvertures pour la recherche en physique fondamentale ?

Nous nous intéressons aux applications du retournement temporel mais aussi à la physique de base : que signifie remonter le temps pour une onde ? Il y a une observation curieuse, plus le milieu dans lequel se propage une onde est chaotique, plus il est facile de faire revivre à une onde sa vie passée, et plus le milieu a une structure compliquée moins le nombre de microphones qu'il faut pour faire l'opération du renversement du temps est grand et à la limite un seul microphone suffit. Pour les particules une petite erreur s'amplifie exponentiellement avec le temps et, aujourd'hui, il n'y a aucune chance de remonter le temps pour un système de particules. Les ondes sont infiniment plus robustes, même dans des géométries compliquées où elles réverbèrent dans tous les sens. Et cela pose la question de l'existence, ou pas, du « chaos quantique »... ■

L'Académie des sciences et l'Année mondiale de la physique Portraits de douze physiciens

Au cours de l'Année mondiale de la physique (2005), la DISC et le service des archives de l'Académie des sciences vont rendre hommage à de grands physiciens des siècles passés et souligner l'importance de leurs travaux pour la physique actuelle. Douze portraits de physiciens, ayant été Membres ou Associés étrangers de l'Académie, seront publiés sur le site Internet (www.academie-sciences.fr) chaque mois tout au long de l'année 2005. Ils se composent de leur biographie, leurs travaux scientifiques, notamment ceux publiés dans les Comptes rendus et les Mémoires de l'Académie des sciences et de documents d'archives numérisés pour cette occasion. Une mise en perspective de tout ou partie de l'œuvre scientifique de ces savants par un (ou plusieurs) Membre actuel, physicien ou historien des sciences, conclura cette réalisation.

Le challenge du Manchot antarctique :

comment réussir à se reproduire sans compromettre sa propre survie



par Yvon Le Maho¹

Cet article est dédié à Hubert Curien, grâce à qui ont pu être menées les recherches sur le mécanisme de conservation de nourriture dans l'estomac des manchots.

Un film récent visant à émouvoir la planète débutait par un apitoiement sur la triste condition du Manchot empereur qui a du, pour survivre, faire face à un épouvantable refroidissement climatique. Certes, le milieu est extrême. Le Manchot empereur est même le seul animal à se reproduire au cours du sévère hiver polaire. La température descend à $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ à 77°Sud , où se trouve la colonie de Cape Crozier à la latitude la plus élevée. Elle a été la première de l'espèce à être découverte en 1902 par Wilson, héros de l'exploration antarctique qui devait périr avec le capitaine Scott dans le tragique voyage de retour après un pôle Sud conquis quelques semaines trop tard. A 66°Sud , en Terre Adélie, dans la colonie de l'Archipel de Pointe Géologie découverte en 1950, les températures ambiantes sont rarement inférieures à $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ mais la vitesse du vent est souvent très élevée. Il s'agit de vents catabatiques, vents qui s'accroissent le long de la pente du grand continent antarctique (environ 28 fois la surface de la France, avec une altitude comprise entre environ 4000 m au centre et des falaises de glace de quelques

¹ Membre de l'Académie des sciences, directeur de recherche au CNRS, Centre d'écologie et physiologie énergétiques, CNRS et université Louis Pasteur, Strasbourg.



dizaines de mètres au niveau des côtes). Leur vitesse atteint souvent plus de 200 km/h et parfois dépasse même

300 km/h, comme lors de mon hivernage en 1972. L'extrême pouvoir de refroidissement qui en résulte vis-à-vis d'un

Léopard de mer venant de briser la glace sur laquelle se déplaçait un jeune Manchot Adélie avant de le happer. Au contraire du Manchot empereur, le Manchot Adélie se reproduit durant l'été austral. Le léopard de mer est également un prédateur du Manchot empereur.

organisme maintenant une température interne de l'ordre de $37\text{-}38\text{ }^{\circ}\text{C}$ est encore augmenté par les particules de glace transportées par le vent au cours des blizzards. Loewe a calculé que par un blizzard dense et un vent moyen de 125 km/h, une surface d'un m^2 perpendiculaire à la direction du vent est traversée par dix tonnes de glace en une heure. Qui plus est, les manchots empereurs jeûnent lorsqu'ils se reproduisent et le mâle, qui assure la totalité de l'incubation, doit vivre sur ses réserves corporelles pendant 4 mois pour mener cette incubation à son terme.

Mais loin de l'image de pauvres manchots surpris par un refroidissement climatique, le Manchot empereur est du point de vue évolutif l'aboutissement d'une colonisation active des mers du Sud. Les ancêtres des manchots actuels sont en effet originaires des latitudes subtropicales et tempérées d'Australie

Question d'actualité

et de Nouvelle-Zélande. Le manchot actuel le plus proche de cet ancêtre est le petit Manchot pygmée australien, que l'on peut notamment observer près de Melbourne. Les importantes ressources en proies (poissons, calmars) des mers du Sud ont sans aucun doute été le moteur de l'évolution. Parmi les 17 espèces actuelles de manchots réparties entre l'équateur, aux îles Galápagos, et les côtes du continent Antarctique, le Manchot empereur correspond donc du point de vue évolutif au stade le plus avancé des manchots dans l'adaptation au milieu polaire.

Quand on sait qu'un phénomène El Niño se traduit dans l'océan Pacifique par l'impossibilité de se reproduire pour des millions d'oiseaux de mer, ils n'arrivent au mieux qu'à survivre, l'adaptation des manchots empereurs pose de multiples questions. Leur principal challenge est en effet d'arriver à assurer l'investissement supplémentaire nécessaire pour assurer le bon déroulement de leur cycle reproducteur alors même qu'ils tolèrent des conditions apparemment peu compatibles avec la survie. Pour comprendre quel est le facteur décisif de cette adaptation, il est utile de comparer le Manchot empereur avec le Manchot royal, son plus proche parent dans la famille des manchots, car il vit dans les quarantièmes et cinquantièmes de latitude Sud, c'est-à-dire dans la zone subantarctique aux conditions climatiques moins rudes à terre. La température ambiante y fluctue en effet essentiellement entre 5 et 10 °C. L'anglais Bernard Stonehouse et le français Jean Prévost, pionniers de l'étude de la biologie du Manchot empereur dans les années cinquante et 60, ont très tôt compris que le « comportement thermorégulateur social » des manchots empereurs est ce facteur décisif. D'une masse corporelle initiale d'environ 30 à 40 kg au début du cycle reproducteur, les oiseaux se serrent les uns contre les autres en formations serrées, à raison de 10 individus au m². Ces formations ont été appelées « tortues » par analogie avec celles des légionnaires romains lorsqu'ils se regroupaient. Comme l'a montré Jean Prévost, les manchots empereurs maigrissent deux fois plus vite lorsqu'ils sont isolés dans la colonie et ne peuvent donc s'intégrer dans des tortues. Par contraste, les manchots royaux maintiennent un territoire correspondant à une distance « coup de bec/coup d'ailerons ». Ainsi, le Manchot empereur n'a pas de territoire au cours de sa reproduction, ce qui est très rare dans le monde animal et présente des inconvénients, une bousculade augmentant le risque de perte de l'œuf, notamment chez les couveurs inexpérimentés. La zone défendue se limite en fait à cette sorte de poche où se niche l'œuf, entre les pattes de l'oiseau et un repli de son abdomen dépour-

vu de plumes qui joue le rôle de plaque incubatrice, l'ensemble étant recouvert de plumes. Celles-ci, que l'oiseau imperméabilise grâce à l'huile secrétée par la glande uropygienne, sont exceptionnellement rigides, formant ainsi une protection mécanique contre le vent. A la base de chacune d'entre elles, deux duvets comparables au duvet d'oise jouent le rôle d'isolant thermique.

Mon premier objectif, lorsque j'ai hiverné en Terre Adélie au cours de l'année 1972, était donc d'essayer de déterminer l'économie d'énergie que réalisent les manchots empereurs en formant des tortues. Cependant, à cette époque, on n'avait pas encore le moyen de déterminer la dépense énergétique de manchots empereurs libres dans leur colonie. Comme on le faisait chez l'homme en milieu hospitalier, notamment pour détecter l'hyperthyroïdisme par le biais de l'augmentation du métabolisme, la seule approche possible était la mesure des échanges respiratoires d'un manchot pourvu d'un masque. L'animal étant maintenu à l'extérieur du laboratoire de biologie de la base Dumont D'Urville, l'air du masque était aspiré à débit constant de manière à ce qu'une fraction soit analysée du point de vue des concentrations d'O₂ et CO₂. Avec cette technique classique permettant de calculer le métabolisme de l'animal, j'ai montré que l'oiseau isolé maintient un niveau de dépense minimal jusqu'à une température aussi basse que -10 °C et que le vent n'a pas d'effet significatif jusqu'à environ 40 km/h. Mais en dessous de -10 °C, le métabolisme de l'animal doit augmenter pour que sa température interne soit maintenue à 37-38 °C. Or, comme on l'a vu, les températures ambiantes durant l'hiver sont nettement inférieures à cette limite de -10 °C et il faut prendre en compte la fréquente violence du vent et les blizzards. D'après la vitesse d'amaigrissement des oiseaux en tortues, j'ai montré que les manchots empereurs évitent ainsi au moins l'augmentation du métabolisme qui est induite en dessous de -10 °C chez l'oiseau isolé. Mais il fallut 25 ans pour comprendre qu'en fait ils sont alors encore plus performants dans l'épargne énergétique. En effet, notre groupe de recherche, grâce à l'utilisation d'isotopes stables, a réussi à déterminer le niveau de la dépense énergétique de manchots empereurs mâles tout au long de l'incubation et ainsi à montrer qu'en moyenne les oiseaux ont une dépense

inférieure de 25 % à la dépense minimale de l'individu isolé (c'est à dire à celle qu'il a au dessus de -10 °C). C'est donc ce qui permet aux mâles de jeûner pendant environ 4 mois. Nous nous attachons actuellement à comprendre par quel mécanisme la formation des tortues permet cet hypométabolisme si crucial pour la réussite du cycle reproducteur de l'oiseau puisqu'il explique notamment l'extraordinaire aptitude au jeûne des mâles.

Cependant, leur jeûne ne se termine pas nécessairement une fois atteint l'objectif fixé d'assurer l'incubation de l'œuf jusqu'à l'éclosion. En effet, les femelles peuvent être retardées et donc dans l'impossibilité d'assurer la relève à temps. Comme l'a montré Jean Prévost dès le début des années 60, les mâles sont alors capables de nourrir leurs poussins grâce à une substance secrétée par la muqueuse de leur jabot, substance qui a une composition voisine de celle du lait de pigeon ou de lapine car elle contient 59 % de protéines et 28 % de lipides en masse sèche.

Cependant, l'un des fondements de la biologie évolutive est l'étude du compromis entre l'investissement d'un animal pour se reproduire et la nécessaire limite à cet investissement qu'incombe la préservation de sa propre survie, celle-ci conditionnant d'ailleurs sa future reproduction. Or, précisément, l'intérêt d'un animal comme le Manchot empereur qui entreprend un jeûne d'une durée exceptionnelle n'est pas seulement dans son aptitude à le prolonger, mais aussi dans les mécanismes qui vont l'amener à l'interrompre avant qu'il ne soit trop tard. Nous avons montré que le Manchot empereur est induit à se réalimenter lorsqu'il atteint un seuil critique dans ses réserves corporelles. En apprenant à des Manchots empereurs à marcher sur un tapis roulant tout en portant un masque sur la tête (à nouveau pour mesurer les échanges respiratoires...), nous avons déterminé le coût énergétique de leur marche. Nous avons ainsi pu calculer qu'au seuil de leurs réserves corporelles déclenchant leur départ correspond une autonomie de 180 km. Or, sur une banquise hivernale bien ancrée entre les falaises de glace du continent Antarctique et les îles de l'Archipel de Pointe Géologie, ce qui la protège contre des tempêtes toujours susceptibles de la détruire (et donc de provoquer la perte des œufs et poussins...), la colonie de Manchots empereurs de Terre Adélie est loin de la mer libre. En étudiant les longues marches sur la banquise de mâles équipés de balises Argos miniaturisées à leur départ de la colonie, nous avons montré qu'ils trouvent des polynies, c'est-à-dire de grandes ouvertures dans la glace de mer, après avoir marché sur 130 à 150 km à environ à environ 2 km/h. Mais

quel signal induit les oiseaux à partir pour se réalimenter alors qu'ils ont par conséquent encore des réserves corporelles suffisantes pour couvrir la grande distance leur permettant d'atteindre leur nourriture ? Il était difficile à ce stade d'aller plus loin dans la compréhension chez les manchots, mais nous avons pu mettre en évidence un changement de comportement chez le rat à jeun lorsqu'il atteint, évidemment à une échelle de temps très différente, la même condition métabolique que le manchot abandonnant œuf ou poussin pour se réalimenter. L'étude de l'expression des gènes codant pour le neuropeptide Y au niveau de l'hypothalamus du rat nous a permis de mettre en évidence que la sécrétion de ce peptide très orexigène est alors augmentée, ce qui signifie vraisemblablement que le manchot atteignant le même seuil dans ses réserves corporelles est induit à se réalimenter tout simplement parce qu'il commence à avoir de plus en plus faim. Qui plus est, comme on le sait, le système digestif est atrophié après un long jeûne, ce qui présente alors des risques si la réalimentation est trop rapide. Or, nous avons également montré que la muqueuse du rat se restaure par anticipation au moment où le fameux seuil est atteint dans les réserves corporelles, à la fois grâce à une prolifération cellulaire dans les cryptes qui assurent le renouvellement des villosités intestinales et, ce qui est remarquable, à une interruption de l'apoptose, c'est-à-dire de la mort des cellules de l'extrémité des villosités. Mais qu'en est-il du Manchot royal, ce parent apparemment si fortuné du Manchot empereur puisque les contraintes climatiques ne sont pas suffisamment sévères pour l'empêcher de défendre son territoire dans la colonie à raison de 2500 coups de bec et d'ailerons par 24 heures, ce qui représente l'équivalent de 6 heures de bagarre par 24 heures. Le mâle n'assure pas seul l'incubation, les deux conjoints l'assurant à tour de rôle. C'est habituellement le mâle qui assure les trois dernières semaines de l'incubation et la femelle revient généralement nourrir le poussin à l'éclosion. Mais, en raison de changements climatiques interannuels liés aux effets d'El Niño qui se font sentir avec un certain délai jusque dans l'océan Austral, les poissons lanternes qui constituent la proie essentielle des manchots royaux (ce sont des spécialistes alimentaires) peuvent être à une distance encore plus grande des îles subantarctiques où se reproduisent les oiseaux : à 500 ou 600 km au lieu de 300-400 km. Il s'ensuit que la femelle partie alors en mer pour s'alimenter et ramener de la nourriture pour le poussin qui va éclore peut être retardée d'une semaine. Nous avons montré que le mâle est alors capable de nourrir le poussin avec de la nourriture

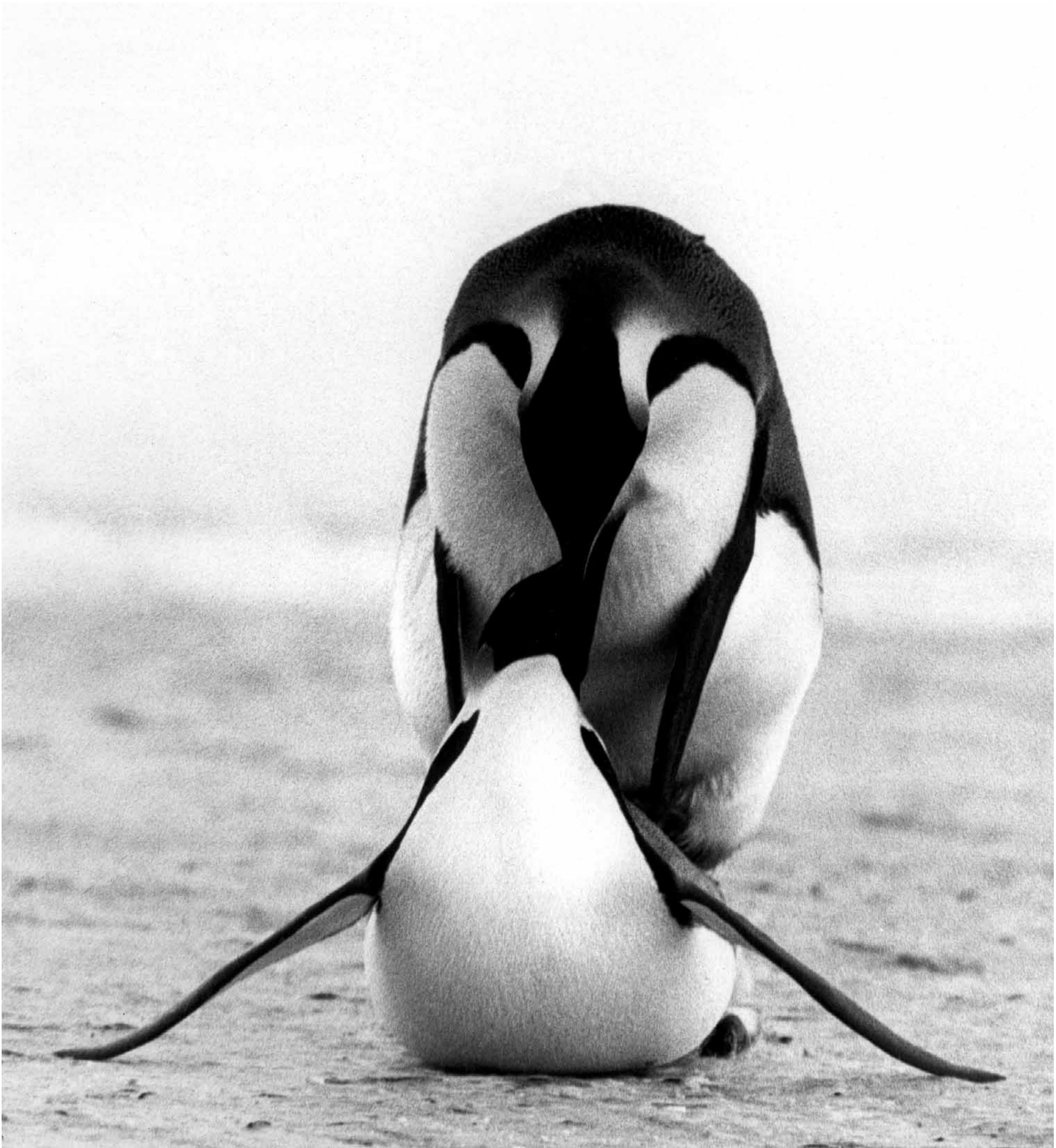
qu'il a conservée quasi-intacte dans son estomac pendant 3 semaines à 38 °C. Grâce à des systèmes d'acquisition de données ultra-miniaturisés que nous avons fait avaler à des manchots et récupérés sans les empêcher de mener à bien leur tâche d'incubation de l'œuf, nous avons découvert que la motilité de leur estomac est alors réduite et que son pH est moins acide, ce qui favorise la conservation des protéines du contenu stomacal. Qui plus est, les estomacs des manchots conservant de la nourriture

contiennent un peptide dont la concentration augmente au cours de l'incubation. Après identification de ce peptide, que nous avons appelé sphéniscine (à partir du nom latin de la famille des manchots : spheniscus), la molécule de synthèse correspondante s'est révélée comme une substance à forte activité microbienne et antifongique. Cette molécule provoque notamment la suppression des spores du champignon *Aspergillus*, notamment à l'origine d'affections nosocomiales.

En conclusion, les adaptations physiologiques et comportementales qui se sont développées chez les manchots au cours de l'évolution expliquent qu'ils aient pu coloniser l'une des régions de notre planète qui nous paraissent les plus inhospitalières. L'étude de ces adaptations nous révèle l'existence de mécanismes uniques, d'un intérêt qui au-delà des aspects fondamentaux ouvre éventuellement des perspectives biomédicales ■

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre des programmes scientifiques des Expéditions Polaires Françaises, puis de la Mission de recherche des Terres Australes et Antartiques Françaises et de l'Institut Polaire, avec le soutien du Comité Ars-Cuttoli de la Fondation de France et des laboratoires de Jules Hoffmann et Alain Van Dorsselaer pour les recherches sur le peptide antimicrobien. Ont contribué à ces travaux : A. Ance, F. Bertile, C. Bost, Ph. Bullet, G. Dewasmes, M. Gauthier-Clerc, R. Groscolas, C. Habold, Y. Handrich, J.-H. Lignot, G. Petters, T. Raclot, J.-P. Robin, L. Sabatier et C. Thouzeau

Accouplement de manchots empereurs sur la banquise de Terre Adélie



Pedro Vicente Maldonado

Un scientifique équatorien, multiple pionnier

par **André Capron** ¹

Le mardi 7 décembre 2004, à l'Institut de France, salle Bonnefous, a eu lieu une rencontre en hommage au tricentenaire de la naissance de Pedro Vicente Maldonado, organisée, sous le patronage de l'Académie des sciences de l'Institut de France, par l'Ambassade de l'Équateur en France et la Délégation aux Relations internationales.

Étienne-Émile Baulieu, Président de l'Académie des sciences, a accueilli les participants et leur a manifesté combien l'Académie était satisfaite de participer à cet hommage à Pedro Vicente Maldonado, scientifique et cartographe équatorien ayant collaboré à la mission menée par Charles-Marie de La Condamine, Joseph Bouguer et Louis Godin entre 1736 et 1744 à Quito afin d'y mesurer un degré de méridien terrestre et ainsi déterminer la forme de la terre. Il a également fait part de sa joie de posséder à l'Académie des traces du travail et de la contribution de Pedro Vicente Maldonado à la connaissance du globe terrestre, et n'a pas manqué d'affirmer l'amitié unissant la nation française et équatorienne.

¹ Membre de l'Académie des sciences, directeur honoraire de l'Institut Pasteur de Lille, délégué aux relations internationales de l'Académie

Son Excellence M. Juan Salazar Sancisi, Ambassadeur de l'Équateur en France, a manifesté qu'il est très symbolique que la réunion se tienne dans la salle "Bonnefous" de l'Académie des sciences de Paris, institution qui, il y a près de trois siècles, en parrainant l'envoi de la mission, a permis à la science universelle d'effectuer un grand pas en avant. Une Académie dans laquelle Maldonado a été élevé au rang de correspondant en mars 1747. Cet homme né à Riobamba avait compris l'importance et l'envergure des objectifs scientifiques de la mission géodésique. Il s'agit d'un scientifique qui a contribué, par ses connaissances techniques et même sa fortune personnelle, à assurer que la mission et ses protagonistes atteignent leurs objectifs. L'Ambassadeur a ajouté que « concrétiser cet événement au sein de cette prestigieuse et historique institution est la reconnaissance de la contribution de Maldonado, de même qu'une démonstration d'amitié et de coopération franco-équatorienne. Il est réjouissant de constater que, postérieurement à cette entreprise, de nombreuses missions scientifiques françaises ont travaillé, côte à côte, avec des scientifiques équatoriens, et de constater que le fruit de cet effort commun contribue à un monde meilleur. »

Son Excellence M. Daniel Parfait, Direc-

teur des Amériques et des Caraïbes au Ministère des Affaires étrangères a mis l'accent sur le fait que "... sans Maldonado, jamais cette expédition n'aurait pu avoir lieu. Mathématicien, ingénieur, cartographe, Maldonado était aussi un personnage influent. Il a ainsi pu apporter un soutien financier et logistique à l'expédition. Lorsque celle-ci fut terminée, il a tenu à accompagner son ami La Condamine jusqu'en Europe en passant par la route alors mal connue et pleine de dangers de l'Amazonie. Aussi, c'est à juste titre que l'on peut décerner à Maldonado le titre de précurseur dans l'établissement de cette relation d'amitié et de confiance entre la France et l'Équateur". Il a terminé en expliquant que "Les relations franco-équatoriennes doivent beaucoup à nos illustres ancêtres et il faut souligner l'importance particulière de la contribution du grand Pedro Vicente Maldonado."

Jean Poirier, Membre et représentant de l'Académie des sciences, a évoqué le contenu du dossier de l'Académie sur Pedro Vicente Maldonado, qui fut élu membre correspondant de l'Académie des sciences le 24 mars 1747 et sur son frère aîné, José. J. Poirier a retrouvé des extraits dans lesquels sont cités les frères Maldonado et a souligné que La Condamine en parlait avec chaleur.

Gonzalo Abad Ortiz, Conseiller régional

principal pour l'Amérique latine et les Caraïbes à l'Unesco, a retracé les relations de travail mais aussi d'amitié qui se sont instaurées entre les membres français de l'expédition et cette famille Maldonado, qui les a si chaleureusement accueillis et aidés dans leur entreprise. Il a déclaré que "l'amitié de ces jeunes hommes, Maldonado étant âgé de 31 et La Condamine de 35 ans, s'est forgée sur le terrain ; l'un riche d'une connaissance plus empirique de son pays, l'autre possédant l'atout des lumières, représentant la recherche de pointe de son époque". Abad Ortiz a ajouté que "cette rencontre des esprits s'est confirmée au long de la douzaine d'années que va durer leur relation d'amitié et de collaboration". Finalement, il a conclu en disant que "le renouveau de cette communauté de l'esprit, initié par Maldonado et La Condamine, est bien l'alternative indispensable pour la sauvegarde de nos identités et l'assurance de la construction d'un futur solidaire et harmonieux."

Gabriel Judde, co-fondateur du Centre d'études équatoriennes et ancien conseiller culturel et de coopération à l'Ambassade de France en Équateur, a mis l'accent sur l'aspect de précurseur de l'arpentage chez Maldonado.

Suzanne Débarbat, astronome titulaire honoraire de l'Observatoire de Paris,

membre de l'Académie internationale de l'histoire des sciences, en partant des textes de La Condamine a montré la contribution de Pedro Vicente Maldonado à la mesure d'un arc en Équateur. Il ne faut pas oublier que ce fait scientifique permettra, de plus, une grande avancée dans d'autres domaines, dont le fait qu'il a donné au mètre d'aujourd'hui sa longueur définitive.

Anne Collin-Delavaud, géographe et professeur des Universités, a brossé un rapide panorama de la recherche des géographes français en Équateur dans les trente dernières années. Elle a été relayée par Michel Portais, docteur en géographie, directeur de recherche à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), qui a retracé les liens entre l'IRD et la mission de La Condamine.

Florence Trystram, historienne, auteur de divers ouvrages dont le Procès des étoiles, a déclaré que Maldonado a offert aux scientifiques la possibilité matérielle de faire leurs observations. L'historienne a mis l'accent sur la difficulté de l'entreprise : "Les scientifiques ont mesuré une trentaine de triangles, ce qui signifie 90 stations au sommet desquelles ils ont dû hisser ces instruments, entre 3500 et 4000 mètres d'altitude, pour dominer les reliefs de la prétendue plaine de Quito". Elle a aussi montré combien les traces de l'expédition de l'Académie des sciences de France en Équateur tendaient à disparaître au fil du temps pour le plus grand détriment de la mémoire commune et a exprimé le vœu qu'équatoriens, français et espagnols s'efforcent ensemble de conserver les vestiges que l'histoire nous a laissés.

Anny Cazenave, membre de l'Académie des sciences, chercheur au Centre national d'études spatiales, a souligné combien cette expédition du XVIII^{ème} siècle avait ouvert la voie à l'étude de la forme de la terre, qui a évolué au cours des siècles en fonction des capacités techniques de mesures ; la mise au point des outils techniques de mesure dans cet objectif a ensuite permis d'effectuer d'autres mesures dont celle de l'eau, par les satellites en particulier.

Jean-Pierre Barriot, ingénieur expert en géodésie au Centre national d'études spatiales, a démontré combien les méthodes artisanales de mesure de la Terre au temps de Maldonado et La Condamine ont progressé pour atteindre maintenant, avec les mesures par satellites en orbite autour de la Terre, à une vision considérablement affinée. Et puisque l'on a mesuré la Terre, il est naturel de s'intéresser aux autres planètes : Vénus ou Mars ou de

tenter d'analyser d'autres objets spatiaux, tel le stéroïde Eros ou même une comète, Churry, dont on sera bientôt capable de révéler la structure... Avaient également été invités à cette manifestation : André Capron, Délégué aux Relations internationales de l'Académie des sciences, Eric Amblard, responsable Colombie, Équateur et Communauté andine des Nations à la Direction des Amériques et des Caraïbes du Ministère des Affaires étrangères, Marie-Simone Chandelier, responsable du bureau Amérique latine, Direction des relations internationales à l'Institut de Recherche pour le Développement. Jean-Paul Cadet, président de la Commission de la Carte géologique du Monde, David Yudilevitch Levy, professeur de la faculté de médecine à Santiago du Chili, Annie Molinié-Bertrand, directrice de l'Unité de Formation et de Recherche d'Études ibériques et latino-américaines à l'université Paris IV, Laurence Bobis, directrice de la bibliothèque de l'Observatoire de Paris, Florence Greffe, conservateur des Archives de l'Académie des sciences, Isabelle Richefort et Florence Watel, conservateur en chef du Patrimoine au Département des Archives historiques à la direction des Archives du Ministère des Affaires étrangères.

Ainsi de la Terre à l'Espace, de la France à l'Équateur, Pedro Vicente Maldonado a-t-il été un pionnier de bien des façons : dans la capacité à mesurer la terre, à en déterminer la forme puis celle de bien d'autres corps plus ou moins célestes, dans la manière d'accueillir des scientifiques étrangers et de leur apporter tout le soutien logistique dont ils avaient besoin pour mener à bien leur exploration, précurseur de la collaboration internationale qui sous-tend naturellement toute démarche scientifique, enfin dans l'appui financier et diplomatique, sponsor avant l'heure ■

Biologie Cellulaire Biologie du Développement¹

Depuis la découverte des gènes du développement — gènes « architectes », — une convergence fertile entre embryologie, génétique et biologie cellulaire s'est opérée. Ces gènes, qui s'expriment dans les cellules embryonnaires et adultes, participent à la construction de tous les organismes pluricellulaires. Comprendre le développement, c'est donc comprendre le code et la chorégraphie des interactions entre cellules, dans lesquelles ces gènes jouent un rôle clé.

Chez l'homme, près de 350 types cellulaires se mettent en place selon des principes généraux, mieux connus depuis que les biologistes cellulaires ont exploité les concepts et les méthodes de la biologie moléculaire.

Pour élucider les grandes fonctions cellulaires, très conservées durant l'évolution, plusieurs modèles multicellulaires enrichissent aujourd'hui les études faites sur des modèles unicellulaires simples.

Ainsi, non seulement dans leurs méthodes d'analyse mais plus encore dans leurs objectifs, la biologie cellulaire et la biologie du développement sont véritablement en train de s'unifier.

Ce rapport, structuré en dix chapitres, aborde de nombreux mécanismes génétiques, cellulaires et embryologiques dont l'étude doit permettre de saisir comment une cellule répond à son environnement local pendant le développement. Certaines cellules, en nombre limité, communiquent entre elles tout en s'orientant par rapport aux axes de l'embryon, migrent, ou encore disparaissent. Ces propriétés des cellules sont essentielles pour la construction harmonieuse d'un organisme complexe.

Des recommandations sont également présentées sur les voies scientifiques à explorer : notamment, l'étude de pathologies comme les cancers, l'utilisation de cellules souches en médecine réparatrice pour les maladies neurodégénératives, génétiques ou cardiovasculaires, l'identification des réseaux de gènes et des agents capables de les réguler, l'étude de la mémoire épigénétique, les interactions prometteuses entre physiologie et génétique. Le rapport souligne encore la nécessité d'accroître l'innovation technologique, de favoriser les interfaces entre disciplines scientifiques et de mutualiser les plates-formes technologiques. Les auteurs discutent également des obstacles à surmonter en matière de financement, d'enseignement, de recrutement et de fidélisation des compétences ■

¹ RST 19, sortie janvier 2005, Éditions Tec & Doc, 14, rue de Provigny 94 236 Cachan Cedex, <http://www.Lavoisier.fr>

Par Dominique Meyer ¹

Hostile ou accueillante, la nature cache aux hommes ses mystères, ne leur offrant à admirer que sa beauté. Mais les scientifiques, insatiables et fous du désir d'en violer les secrets, nous dévoilent sans cesse de nouvelles raisons d'être séduits.

Autour de nous, il n'y a pas de plus simples, de plus parfaites leçons d'harmonie qu'une rose, le vol d'un oiseau ou le mouvement des vagues, mais c'est en biologiste que j'aimerais vous parler d'autres accords de la nature, aux charmes plus austères.

Chacun de nous, l'éphémère, l'olivier millénaire, naît d'une seule cellule, fruit de tant d'attirance. Un miracle qui représente, aux yeux de François Jacob, « le phénomène le plus stupéfiant, l'histoire la plus étonnante qu'on puisse raconter sur cette terre. »

Cette histoire commence avec l'espoir de toute cellule : se diviser. Encore faut-il qu'elle le fasse au bon moment, au bon endroit, de bonne façon, comme l'exige la construction réussie d'un organisme vivant. Cette aventure risquée suppose un enchaînement parfaitement harmonieux entre – nombre à peine croyable – des centaines de milliers de réactions inscrites dans le programme génétique de chaque cellule, réactions qui se suivent, se chevauchent, se croisent en un ballet d'une formidable complexité.

Un défi pour les biologistes du développement qui vont pas à pas proposer les clés de cette organisation *a priori* inextricable. Ils découvrent que des gènes régulateurs, innombrables architectes, induisent et maîtrisent par de multiples combinatoires hiérarchisées la destinée topographique et fonctionnelle des cellules embryonnaires. Cellules ainsi conduites, après migration, à se différencier de façons très variées pour constituer les divers organes, chef-d'œuvre de conception et de réalisation, de rigueur et de précision.

Les plus fameux de ces gènes régulateurs ont eu le privilège d'enchanter les généticiens. Avec stupéfaction, ils ont découvert que les gènes de la famille Hox, mettant en place le plan d'organisation d'un embryon humain, étaient extrêmement proches de gènes jouant un rôle comparable chez un ensemble d'animaux et de végétaux. La souris côtoie ici la célèbre mouche drosophile, mais aussi *Caenorhabditis elegans*, petit ver devenu la coqueluche des biologistes, et même une plante à fleurs, *Arabidopsis thaliana*. Ainsi, merveille de l'unité du monde vivant, nous partageons ces gènes rescapés de l'évolution avec nos ancêtres communs d'il y a plus d'un milliard d'années.

Hélas, le chaos menace à tout instant l'harmonie du développement. On le découvre lorsque l'un des exécutants de la fragile partition fait une fausse note : la moindre mutation, le plus petit décalage dans l'expression d'un gène peuvent alors être redoutables. Les drosophiles n'échappent pas à ce péril et nous leur devons ainsi, depuis Thomas Morgan, beaucoup de clarté sur l'embryogenèse ; transformées en monstres par fantaisie de la nature ou manipulation génétique, elles ont des pattes au lieu d'antennes, elles n'ont plus d'ailes ou en ont trop. Il serait toutefois injuste de discréditer à l'excès les fausses notes, car c'est aussi le hasard d'heureuses mutations qui a façonné l'évolution.

Plus tard dans la vie, l'apoptose va connaître des égarements : défaillante, elle épargnera d'indésirables cellules cancéreuses ; excessive, elle détruira de précieux neurones.

Enfin, surprise, mais confirmation de l'unité du monde vivant, ce phénomène concerne aussi les plantes et leur permet de se protéger de leurs ennemis en créant dans leurs feuilles ces trous qui nous intriguent, vraie stratégie de la terre brûlée.

Chez un très grand nombre d'êtres vivants, le développement conduit à un organisme qui frappe par sa symétrie. Le sentiment d'harmonie inspiré par les symétries de la nature a vraisemblable-

ment un trouble dans tout l'ensemble. » Pour asseoir sa thèse, il invente le concept de « milieu intérieur », entité groupant sang et liquides organiques, sorte de mer intérieure protectrice qui baigne les cellules et s'efforce de les mettre à l'abri des tempêtes de l'environnement ; c'est ce qu'on appellera plus tard l'homéostasie.

Dès lors, les physiologistes vont penser autrement.

Ils comprennent que chaque organisme vivant doit être considéré comme un tout fonctionnel, véritable société formée de cellules très diversement spécialisées, mais unies dans l'harmonie d'une aventure commune. Processus aussi vrai pour le petit ver aux neuf cent cinquante

La Nature, leçon d'harmonie

Claude Bernard a écrit : « La vie c'est la création », tout en ajoutant : « La vie c'est la mort », montrant ainsi combien construction et destruction sont complémentaires dans la nature. Développant cette idée, ici même, il y a quelques mois, Nicole Le Douarin soulignait, dans un exposé captivant, à quel point la destruction cellulaire programmée, dénommée apoptose, compense la prodigalité de la nature et fait partie de l'embryogenèse. Cette apoptose, en assurant la survie des cellules les plus utiles, représente donc pour l'organisme une forme d'harmonie mais, osons la contradiction, une funeste harmonie, fondée sur l'existence, dans chaque cellule, d'un programme génétique léthal.

L'hécatombe est particulièrement lourde pour les cellules nerveuses embryonnaires. Les infortunés neurones qui ont développé peu de connexions ou les ont mal conduites sont éliminés au profit d'une sorte de darwinisme neural, autrement dit d'une sélection bénéfique.

De même, certains d'entre nous ignorent peut-être qu'en souvenir de quelque ancêtre aquatique, leurs mains et leurs pieds étaient palmés à un stade de leur développement, et qu'ils doivent la liberté de leurs doigts à une destruction cellulaire opportune.

ment accompagné l'homme dès ses origines, probablement aussi contribué à son sens esthétique. L'importance de la notion de symétrie dans les sciences ne se limite pas aux êtres vivants. Pierre Curie fit une étude de la symétrie des états physiques et postula que pour un phénomène, « les éléments de symétrie des causes doivent se retrouver dans les effets produits. » Très récemment, Édouard Brézin a pu écrire : « la symétrie détermine le monde. »

Mais la nature aime aussi nous jouer des tours et cacher derrière une apparence symétrique de remarquables asymétries. Non seulement notre cœur n'est pas au milieu de la poitrine mais, à la suite de Pasteur, les biologistes ont découvert que les molécules constitutives du monde vivant étaient, comme la main, non identiques à leur image dans un miroir, et cette chiralité s'est révélée universelle ; ainsi, les hélices d'ADN tournent dans le même sens chez tous les êtres vivants. Cette différence avec la matière inerte reste l'une des énigmes concernant l'origine de la vie.

Construits avec tant de rigueur, tant de raffinement mais tant d'aléas, les êtres vivants émerveillent par la richesse de leurs fonctions, fonctions éparées que Claude Bernard aura le génie de rapprocher. Et il l'exprime ainsi : « Tous les phénomènes du corps vivant sont dans une harmonie réciproque telle qu'il paraît impossible de séparer une partie de l'organisme sans amener immédiate-

neuf cellules que pour l'homme qui en compte plus de cent mille milliards.

C'est par de gigantesques réseaux de signaux régulateurs que sont coordonnés ces ensembles de cellules. Ce rôle revient au système neuro-hormonal, en particulier à son maître d'œuvre, le cerveau, constitué de différentes structures échelonnées, souples hiérarchisées, vestiges des étapes de l'évolution. Bien qu'intimement connectées, ces structures n'ont pas toutes la même mission : les plus anciennes ont essentiellement des fonctions vitales, en grande partie automatiques et inconscientes, tandis que les plus récentes ont des activités beaucoup plus élaborées. Ainsi, c'est essentiellement grâce à une structure ancienne, l'hypothalamus, que nous pouvons maintenir l'équilibre dynamique de notre milieu intérieur, succession de déséquilibres naturellement compensés. Les messagers sont ici les voies neuro-végétatives et neuro-hormonales qui illustrent l'étonnante symphonie entre système nerveux et système endocrinien, ces deux inséparables, comme en témoigne la découverte par Étienne-Émile Baulieu d'une production d'hormones stéroïdes dans le cerveau.

Structure plus récente, le néocortex est si développé qu'il a dû se replier pour tenir dans la boîte crânienne. C'est particulièrement au néocortex frontal, symbole de l'hominisation, explosif dans son expansion, que nous devons nos facultés cognitives et relationnelles. C'est pourquoi cette

¹ Membre de l'Académie des sciences, professeur à la faculté de médecine de l'université Paris-Sud Orsay.

région du cerveau a pu être appelée l'« organe de la civilisation ».

Les extraordinaires performances du cerveau humain sont moins dues à l'abondance des neurones qu'à l'extrême richesse de leurs connexions, d'une efflorescence telle qu'un très jeune enfant en construit deux millions à chaque minute, encore un grand nombre, pardonnez-moi. Pour assurer ces connexions, la nature a inventé la synapse, passionnante structure de rapprochement entre neurones, ou entre neurone et muscle, lieu où le signal chimique du neuromédiateur rejoint son récepteur. La diversité et l'activité nuancée des neuromédiateurs, la souplesse des récepteurs confèrent aux

Ainsi, l'expérience individuelle mémorisée structure en permanence l'organisation neuronale et le jeu du cerveau. C'est de cette construction personnelle que dépend la manière dont nous vivons nos représentations, nos anticipations, aussi nos actions et bien entendu nos relations avec l'autre.

À l'évidence, il y a peu d'activités cérébrales sans une part d'émotion et tous nos comportements sont simultanément influencés par nos désirs, nos plaisirs ou nos aversions, le rôle joué ici sélectivement par les neuromodulateurs étant de mieux en mieux compris.

Rien n'est donc figé, et les neurobiologistes nous ont appris que le cerveau fonctionnait en réseaux flexibles qui se

« non-soi » a été découverte chez l'homme par Jean Dausset. Baptisée complexe HLA, elle est faite de caractères génétiques offrant une telle multiplicité de combinaisons qu'il n'existe sans doute pas sur la terre deux humains porteurs du même code HLA, mis à part les vrais jumeaux. Il s'agit donc d'une véritable carte d'identité et chacun sait son importance pour le choix d'une greffe compatible, comme son rôle déterminant en anthropologie, pour la recherche de paternité ou la détection d'un criminel.

Ainsi, maître des armes et de l'état civil, le couple lymphocytes-molécules HLA représente, par ses extraordinaires facultés de mémoire et d'adaptation à

sans fantaisie ce que leur dicte leur programme génétique, avec, pour seul objet, la reproduction de l'espèce ;

- harmonie trahie : les mitochondries de nos cellules et les chloroplastes des végétaux, structures précieuses, étaient, dans un très lointain passé, des bactéries vivant en symbiose, qui ont ultérieurement été annexées au détriment de leur individualité ;

- harmonie pittoresque : « La Vanille et la Mélipone » pourrait être le titre d'une fable de La Fontaine. Elle raconterait comment des plants de vanille mexicains, introduits à la Réunion, n'avaient pu s'y reproduire. Que leur manquait-il ? Tout simplement leur compagne américaine pollinisante, l'hyménoptère méli-



synapses une plasticité remarquable qui détermine la subtilité d'un cerveau perpétuellement inventif. On a même pu écrire, formule plutôt hardie : « Nous sommes ce que sont nos synapses. »

Par sa fameuse phrase : « Apprendre, c'est éliminer », Jean-Pierre Changeux souligne que l'apprentissage, lié à cette plasticité, représente un choix qui sélectionne et stabilise certaines connexions au détriment d'autres, illustration de la prodigieuse épigénèse, cette création de chacun qui complète l'apport génétique. Un apprentissage en harmonie avec le milieu, à son maximum dans l'enfance, avec l'acquisition du langage et de l'écriture, mais une aptitude qui va durer pendant toute la vie et nous aider à être libres.

font et se défont au gré des tâches engagées, en une continue dynamique d'adaptation.

Malheureusement, ces belles constructions vivent sous la menace permanente de microbes, de virus ou de parasites, et ont dû progressivement développer au cours de l'évolution des moyens de défense qui supposent deux types d'accords. En premier lieu, un lien entre les défenseurs, les soldats, essentiellement des lymphocytes, qui doivent coordonner leur lutte en s'échangeant des informations et des ordres d'action. En second lieu, une marque de reconnaissance, commune à l'ensemble des cellules, qui aide à dépister l'ennemi et à le combattre.

Cette marque distinctive du « soi » et du

l'adversité, l'ensemble fonctionnel le plus subtil de notre organisme, après le système nerveux.

Mais l'immunologie réserve parfois des surprises et plus elle a progressé, plus a été stupéfiante l'absence, chez les humains et les autres vivipares, de réaction immunologique de la mère vis-à-vis du fœtus, bien que celui-ci soit étranger par l'apport génétique paternel. Cette tolérance mystérieuse autorise la plus belle des harmonies.

C'est dans une toute autre forme d'interdépendance que vivent beaucoup d'animaux et de végétaux. En voici trois exemples très courts :

- harmonie trop parfaite : les colonies de fourmis répètent inlassablement et

pone, qu'aucun insecte réunionnais ne pouvait remplacer.

Ces exemples d'interdépendance nous conduisent à évoquer notre place dans le monde vivant. Privilégiés de l'évolution, nous ne sommes pourtant que l'un des éléments de l'immense chaîne de solidarité des mondes animal et végétal, tributaires, nous aussi, des cycles de l'azote, du carbone et de l'oxygène, donc de la providentielle photosynthèse placée sous la tutelle du Soleil.

Dans les *Nouvelles Nourritures*, Gide dit à Nathanaël : « Tu n'admires pas comme il le faudrait ce miracle étourdissant qu'est ta vie. » Écoutons-le et goûtons ces harmonies : ce sont nos vies, nos actions, nos plaisirs ■

« Quel avenir pour la recherche pharmaceutique en France? »

Par Jean-Charles Schwartz¹

Une réunion d'une journée sur l'avenir de la Recherche pharmaceutique en France, organisée par l'Intersection de l'application des sciences de l'Académie à l'initiative de A. Carpentier, G. Le Fur, P. Potier et J-C. Schwartz, s'est tenue le 12 octobre 2004 dans le grand amphithéâtre de la Maison de la Chimie devant une nombreuse assistance. Elle a été ouverte par É-É. Baulieu, président de l'Académie.

J-C. Scharz a dressé un tableau assez sombre de l'évolution récente de la recherche en matière de nouveaux médicaments dans notre pays. En effet, le nombre de nouvelles molécules introduites en thérapeutique et qui voient le jour en France a été en décroissant au cours des dernières décennies, plusieurs centres de recherche pharmaceutique y ont récemment été fermés et le nombre d'essais cliniques de médicaments qui y sont réalisés diminue nettement.

Les causes de ce déclin ont été analysées par les divers intervenants et des propositions émises pour y remédier.

Le rôle insuffisant des organismes publics de recherche (CNRS et INSERM) a été souligné par P. Potier tandis que les directeurs généraux de ces organismes ont exposé leurs actions et projets de collaboration industrielle dans ce domaine.

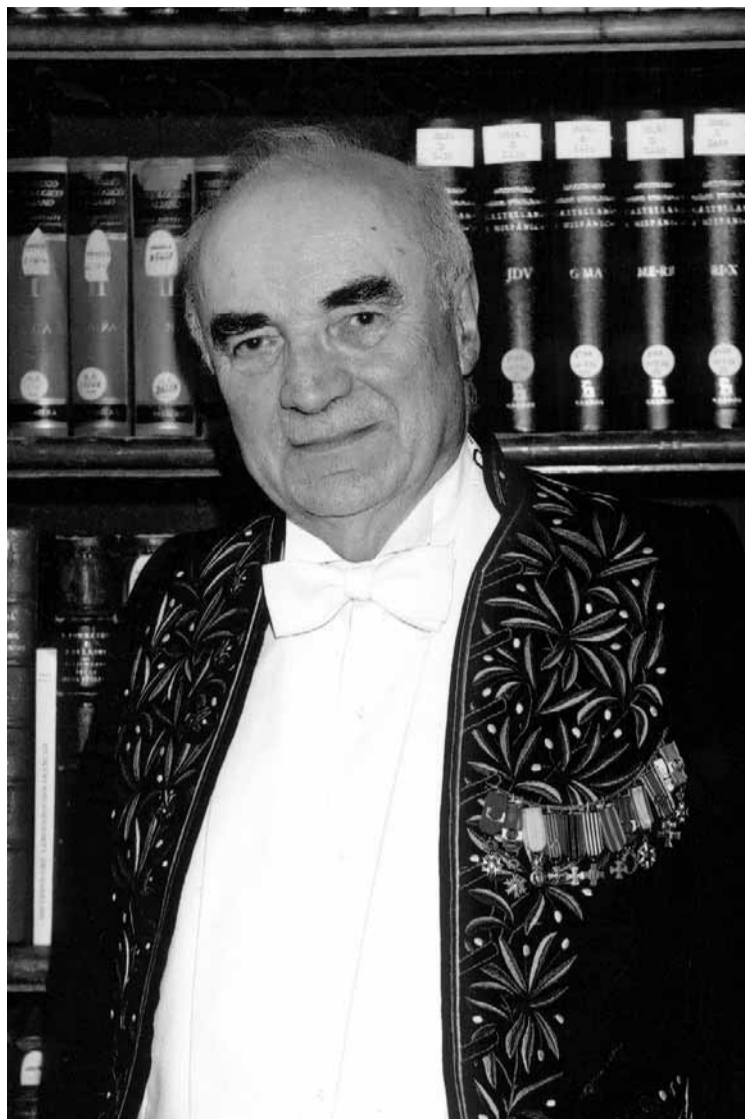
Les stratégies de recherche et développement d'un grand groupe, Sanofi-Aventis, d'un groupe de taille moyenne, Ipsen, et d'une petite entreprise, Bioprojet, ont

été exposées et comparées entre elles par G. Le Fur, J-P. Moreau et J-M. Lecomte, respectivement. Dans tous les cas, le rôle essentiel de l'innovation, soutenue par un tissu dense d'acteurs de qualité dans la recherche fondamentale et dans les laboratoires industriels, susceptibles d'interagir entre eux, a été souligné.

La grande insuffisance de création d'entreprises de biotechnologie en France, à un moment où les médicaments dérivés de protéines recombinantes ou d'anticorps monoclonaux voient le jour en nombre rapidement croissant à l'étranger, a été décrite par P. Pouletty. Un des facteurs du retard réside dans l'insuffisance des crédits mis à la disposition des créateurs de ces entreprises, en raison du risque élevé des investissements (P. Deroux) et en dépit des aides publiques, notamment celles qui proviennent de l'ANVAR (M. Guibaud).

E. Abadie (AFSSAPS) a souligné le caractère de plus en plus international des pré-requis scientifiques et cliniques pour l'approbation des dossiers de nouveaux médicaments.

F. d'Aubert, Ministre délégué à la recherche, a insisté sur l'importance que les pouvoirs publics attachent au développement de l'innovation pharmaceutique en France et a décrit les mesures en cours d'implémentation dans ce but tels que les aides à la création d'entreprises innovantes ou l'extension du crédit impôt-recherche ■



Hubert Curien

(1924 – 2005)

Hubert Curien nous a quittés le 5 février 2005 dans les premières années de ce siècle qu'il avait appelé de ses rêves et de ses vœux. Il représentait la parfaite figure du savant citoyen guidé par cette éthique de conviction qui anime les grands hommes comme Carnot et Arago qui furent à la fois des scientifiques et des politiques. Il les a rejoints dans les pages du Petit Larousse, « ce dictionnaire, dit-il, [qui] aura joué un rôle essentiel dans ma vie. La municipalité de Cornimont reconnaissante de ma première place au Certificat d'études m'en avait offert un en 1936. C'est une consécration pour moi d'y figurer à mon tour. » Un témoignage émouvant que l'innocente fierté de cet homme modeste que la pratique du pouvoir a laissé miraculeusement indemne. De Cornimont dans les Vosges où son père est receveur municipal et sa mère directrice d'école, à l'Académie des sciences dont il a été le président admiré et écouté (2001-2003) la vie d'Hubert Curien a suivi une trajectoire droite et lumineuse comme celle de la fusée Ariane dont il assume la paternité.

Au départ, un engagement fort dans la résistance qui donnera une

impulsion morale à ses engagements successifs : le choix de Normale supérieure où il s'initie à la physique sous la direction d'Yves Rocard - il deviendra un chercheur de premier plan dans le domaine de la cristallographie - le professorat à l'université de Paris ; la direction générale du Centre national de la recherche scientifique ; la présidence du Centre européen de recherche nucléaire où s'affiche sa détermination à faire exister une Europe à la science ; la présidence du Centre national de la recherche spatiale ; pour accepter les fonctions de Ministre de la recherche de 1984 à 1986 puis de 1988 à 1993 qui auront été les dernières années glorieuses de la science française aujourd'hui en crise.

Il est frustrant de réduire à une simple énumération de titres et fonctions la vie d'un homme pour qui on a eu admiration et affection. Hubert Curien a signé le premier éditorial de la « Lettre de l'Académie des sciences » qu'il a encouragé en effaçant les obstacles qui auraient pu freiner son effort. Au nom de cette publication et de ses collaborateurs je tiens à leur exprimer notre profonde reconnaissance ■



la lettre n° 15 / printemps 2005
de l'Académie des sciences

Publication de l'Académie des sciences

23, quai de Conti 75006 PARIS
Tel: 01 44 41 43 68
Fax: 01 44 41 43 84
http: www.academie-sciences.fr

Directeur de publication :
Nicole Le Douarin

Directoire :
Nicole Le Douarin
Jean Dercourt

Rédacteur en chef :
Jean-Didier Vincent

Secrétariat général de rédaction :
Marie-Christine Brissot

Conception graphique
Nicolas Guilbert

Photographies :
p.p. 1, 5, 10, 19, 20, photos N. Guilbert
pp. 4, 7, 20, photos (DR)
pp. 13, 15, photos Y. Le Maho.

Comité de rédaction :
Brigitte d'Artemare,
Jean-François Bach,
Roger Balian, Édouard Brézin,
Pierre Buser, Paul Caro,
Jules Hoffmann, Alain Pompidou,
Pierre Potier, Erich Spitz,
Jean-Christophe Yoccoz

Photogravure & impression :
Edipro/Printreference™
01 41 40 49 00

n° de C.P. : 0108 B 06337

¹ Membre de l'Académie des sciences, professeur émérite à l'université René Descartes, directeur scientifique de Bioprojet