

la lettre n° 6 / hiver 2002
de l'Académie des Sciences



Matière
&
Univers

Sommaire

Éditorial

Esquisse de bilan pour
deux années académiques

Hubert Curien
page 2

Dossier

De la Physique

Édouard Brézin
page 3

De la micro-électronique
aux composants quantiques

Emmanuel Rosencher
page 6

Les dimensions de l'Univers

Entretien avec Pierre Binétruy par Paul Caro
page 10

Frustration, désordre, systèmes
complexes : la physique
statistique hors des murs

Marc Mézard
page 13

La manipulation
de molécules isolées

Jean-François Allemand, Vincent Croquette,
David Bensimon
page 14

Questions d'actualité

Les anticorps monoclonaux humains :
de la souris... à la vache

Dominique Bellet
page 15

Mémoire et apprentissage
chez l'abeille

Minh-ha Pham-Delegue
page 16

La vie des séances

Les enjeux scientifiques et techniques
de la gestion durable des
écosystèmes forestiers

Yves Birot
page 17

Aimants et supraconducteurs :
un nouveau champ d'action
pour la chimie supramoléculaire

Peter Day
page 18

La vie de l'Académie

Rapport RST 13 : Les plantes
génétiquement modifiées

page 18

Le sommet de Johannesburg
et la Science

Yves Quéré
page 19

27^{ème} Assemblée générale
de l'ICSU à Rio

François Gros
page 19

Carnet

page 20

Éditorial

Au terme du mandat bisannuel de Président que mes confrères de l'Académie des sciences m'avaient aimablement confié, il me paraît de bon aloi de présenter une rétrospective synthétique de l'activité de notre compagnie en 2001 et 2002.

L'événement le plus marquant concernant notre fonctionnement est le succès de l'action initiée et menée par mes deux prédécesseurs, Jacques-Louis Lions et Guy Ourisson, en vue d'une modification significative de nos statuts. Nous pourrions ainsi, sur une période de cinq ans, passer d'un effectif de 120 membres

(âgés de moins de 80 ans) à 250 membres (âgés de moins de 75 ans). Dès l'année 2002, nous avons disposé de 25 postes et les élections sont en cours. Nous avons pu, grâce à cette ouverture, réserver 9 postes à des disciplines encore trop peu représentées dans notre compagnie. La formulation des intitulés de tels postes pour l'année 2003 est préparée par notre Comité consultatif élargi et sera soumise pour décision au Comité secret. Cette procédure va de pair avec une réflexion d'ensemble sur le mode de partition de nos divisions en sections.



par Hubert Curien

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

L'Académie dispose, pour mener son programme de relations avec l'étranger, d'une très active Délégation aux Relations Internationales animée avec une grande efficacité par notre confrère Yves Quéré. Notre compagnie est représentée au meilleur niveau dans les instances internationales telles que IAP (Inter Academy Panel), IAC (Inter Academy Council), ALLEA (Alliance européenne des Académies). Nous sommes aussi très présents à l'ICSU (Conseil International pour la Science) grâce à François Gros et nous assumons la responsabilité du COFUSI (Comité Français des Unions Scientifiques Internationales) présidé par Ivan Assenmacher. Nous avons reçu mandat du ministre de l'Éducation nationale pour établir un rapport sur l'intérêt de l'ICSU pour la science française. Cette étude a été remise aux ministres. Elle conduira à une nouvelle définition de la participation française de l'ICSU.

Esquisse de bilan pour deux années académiques

La mise en place au sein de l'Académie des sciences d'une Délégation à l'Information Scientifique et à la Communication est chose faite. La responsabilité de cette DISC est assumée par Madame Dominique Meyer. Les moyens nécessaires à son fonctionnement ont été dégagés. Nous pourrions ainsi beaucoup mieux faire connaître les positions scientifiques de notre Académie, ses initiatives et ses réalisations. Le site Internet sera modernisé.

Le jour traditionnel de réunion de l'Académie a glissé du lundi au mardi. Ce changement était motivé par des raisons de planification de l'ensemble des activités de l'Institut en conformité avec les règles de sécurité. Je suis bien conscient de la gêne que peut apporter, pour quelques membres, ce changement de calendrier. Il semble cependant que la date du mardi permette à nos confrères qui ne résident pas en région parisienne une organisation plus confortable de leur emploi du temps.

L'enseignement des sciences est intimement lié à la recherche. L'Académie accroît ses actions dans cette direction, en soutenant le programme « La main à la pâte » mené avec vigueur et succès

par plusieurs de nos confrères. La réunion annuelle des classes lauréates choisies par cette association a lieu dans la grande salle des séances : ce rendez-vous, dans nos murs, d'une jeunesse enthousiasme est un bon moment pour tous.

Nos Comités ont été fort actifs au cours de ces deux dernières années. Le Comité de l'Espace a repris vie : il est vrai que les programmes spatiaux suscitent tout naturellement intérêt et discussion. Nous sommes, d'autre part, convaincus de l'instance nécessité de développer les réflexions académiques sur les rapports entre science et société. Nous allons donc proposer formellement au Comité secret de conférer le statut de Comité à notre Groupe Science et Société, présidé par Jean-François Bach, qui aura ainsi un pouvoir de proposition et d'action renforcée.

L'Académie poursuit sans faiblir son activité de rédaction de rapports sur les questions d'actualité. Neuf études sont en cours et cinq ont été publiées au cours des deux années 2001 et 2002, marquant le début d'une nouvelle série après la publication d'une douzaine de rapports pour la série précédente qui prenait fin en 2000.

Nous avons organisé cinq colloques en 2001 et cinq autres en 2002 traitant de sujets actuels en biologie, physique, géologie et météorologie. L'organisation de telles réunions est aussi pour nous l'occasion de sympathiques et fructueuses coopérations avec d'autres académies françaises et étrangères.

L'Académie des technologies issue de notre comité CADAS (Comité Académique des Applications de la Science) s'est mise en place et a déjà pris un bon nombre d'initiatives très utiles. Les relations entre l'Académie des sciences et l'Académie des technologies sont étroites et confiantes.

Ce mini-bilan est publié dans la Lettre de l'Académie des sciences : excellente occasion qui m'est donnée de remercier son rédacteur en chef, Jean-Didier Vincent qui a bien voulu, depuis 2001, se charger de la mise sur pied de cette publication qui nous fait honneur.

L'Académie des sciences a l'ambition de promouvoir la science et de représenter dignement et utilement les acteurs de la recherche. Avec humilité et confiance, nous nous en remettons à votre appréciation ■

Préfendre évoquer la physique d'aujourd'hui en quelques phrases, condamne inévitablement à la superficialité ; le propos ne vise donc ici qu'à situer, à travers quelques exemples, le climat intellectuel d'aujourd'hui.

Nous avons vécu un vingtième siècle marqué par la mécanique quantique.

Des plus petites distances accessibles dans les mondes atomiques, nucléaires, subnucléaires, jusqu'aux confins de l'univers (pour qui veut, par exemple, comprendre les premiers instants après le big bang ou la formation des galaxies), cette mécanique s'est imposée. Elle est même devenue la

P de la Physique

grande science à la base de la technologie, puisqu'elle est présente des semi-conducteurs jusqu'aux lasers et aux nanotechnologies émergentes. Il ne faut pas croire que le transistor CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) par exemple, dont l'impact sur notre vie de tous les jours peut se comparer à celui de la distribution de l'électricité, soit né du travail inspiré d'un bricoleur de génie dans son garage. Cette découverte est bien le fruit de la compréhension progressive et fondamentale de la nature quantique des propriétés électroniques des solides.



Par **Edouard Brézin**¹

Ce monde quantique est pourtant bien étrange, comme cela a été souvent souligné. C'est Einstein et ses collaborateurs qui ont soulevé les ques-

tions les plus délicates en montrant que si l'on suivait cette mécanique jusqu'au bout, il devait exister des états quantiques "intriqués" impliquant plusieurs corps, dans lesquels la mesure était une opération "non séparable" dans l'espace. Signe certain d'une théorie incomplète pour Einstein, cela a conduit quelques-uns à proposer des descriptions alternatives du monde qui, croyait-on, avait les mêmes conséquences expérimentales que la mécanique quantique, mais une "interprétation" distincte en termes de paramètres qui nous resteraient cachés. Or aujourd'hui théorie et expérience ont tranché : la description quantique de la non-séparabilité de la me-

sure, est devenue un fait d'expérience. Ce qui était paradoxe est aujourd'hui réalité, et a même conduit récemment à des dispositifs de "cryptographie quantique". Le domaine lié des "qu-bits", éléments quantiques susceptibles de calculs plus riches que la simple logique binaire usuelle, dont nul ne sait encore s'il conduira effectivement à des ordinateurs révolutionnaires, fait l'objet d'intenses recherches de base, sous le signe de l'intrication quantique et de la cohérence. De même les nanosciences sont entrées dans un monde où les comportements quantiques n'ont plus rien de commun avec celui de la matière ordinaire.

¹ Membre de l'Académie des sciences, professeur à l'université Pierre et Marie Curie et à l'École polytechnique.



Mais la route est encore bien longue pour comprendre toutes les implications de cette mécanique des fluctuations quantiques. La deuxième moitié du vingtième siècle a été marquée, au plan théorique, par la compréhension à l'échelle quantique de toutes les interactions fondamentales, à l'exception de la gravitation. L'électromagnétisme, les interactions nucléaires faibles, responsables de la radioactivité beta, les interactions fortes qui confinent les quarks à l'intérieur des neutrons et protons, ont été comprises à toutes les échelles accessibles à l'expérience qui descendent jusqu'à des distances d'exploration de la matière de 10^{-18} m environ. C'est le grand succès de

la théorie quantique des champs, qui s'est construit dans le troisième quart du vingtième siècle. Les objets de base y sont les champs quantiques associés à des particules ponctuelles, quarks, électrons, etc., ainsi que les champs qui les lient, tels le champ électromagnétique et ses compagnons. (Il manque une pièce à cet édifice, "le boson de Higgs", qui devrait ne pas échapper au futur collisionneur du CERN en construction, le LHC).

Quant à la gravitation, la version post-newtonienne d'Einstein s'est imposée, non seulement par son impressionnante cohérence, mais par des expériences aujourd'hui nombreuses. Il faut savoir par exemple que, sans la compréhens-

sion par Einstein de l'influence du champ gravitationnel de la terre sur le rythme des horloges, le positionnement par GPS serait inutilisable. Cette théorie implique, comme pour les ondes hertziennes de l'électromagnétisme, la possibilité d'émission et de propagation d'ondes de gravitation, dont l'observation terrestre fait l'objet d'intenses recherches actuelles (en Europe projet franco-italien Virgo). Or une simple analyse dimensionnelle, révèle que les fluctuations quantiques devraient se manifester pour la gravitation à des échelles de distance qui sont encore inférieures de plus de dix ordres de grandeur à celles aujourd'hui accessibles à l'expérience. La transposition de

la théorie quantique des champs à la gravitation s'est progressivement révélée infructueuse, peut-être même impossible. La seule issue aujourd'hui envisageable, la théorie des supercordes, implique des révisions considérables sur toute notre vision du monde. Il faut d'abord renoncer à l'idée du point matériel idéal sans extension avec laquelle nous vivons depuis les géomètres grecs. En effet les objets élémentaires sont "étendus", extension certes encore invisible puisque nous sommes dans des domaines bien inférieurs à 10^{-30} m, mais néanmoins les particules usuelles n'y apparaissent que comme des excitations de cette corde vibrante. Cette théorie



Et, mesurant les cieux sans bouger d'ici-bas, Il connaît l'univers et ne se connaît pas.

Démocrate et les Abdéritains - Jean de La Fontaine - Les Fables

implique aussi que nous renoncions aux trois dimensions de l'espace, seules accessibles à nos sens et aux mesures actuelles. Comment cela est-il possible ? Le mystère est encore bien épais. L'hypothèse la plus simple est d'imaginer que "l'extension" des objets usuels dans ces directions inexplorées est si faible, qu'elle échappe à nos mesures, de même que l'épaisseur d'un film monomoléculaire n'est appréciable qu'avec des instruments qui explorent des distances inférieures au nanomètre. Mais ce n'est pas le seul scénario envisagé. Dans d'autres en effet, notre univers pourrait n'être que la "surface" d'un monde à plus de dimensions dans lesquelles vibrent ces cordes, dont seules les extrémités sont confinées à notre monde visible. Enfin selon certains, il pourrait exister des dimensions supplémentaires dans lesquelles l'extension des objets usuels pourrait être détectable, dès demain au LHC par exemple, mais c'est à ce stade un pari risqué. Cette théorie implique aussi un monde de particules élémentaires nouvelles, non encore observées, complètement symétrique de celui que nous connaissons (à l'électron est associé un sélectron, au photon un photino, etc.). Ajoutons que dans cette théorie toutes les constantes sans dimension de la nature sont dynamiquement calculables, mais certes non encore calculées, et qu'elles n'ont plus de raison d'être d'immuables constantes ! Pour clore ce chapitre, il faut ajouter qu'il est vraisemblable que plus de 90 % de la matière de l'univers reste noire, c'est-à-dire cachée à nos instruments, et que la nature de cette matière noire est parfaitement inconnue. Enfin les observations récentes sur l'accélération de l'expansion de l'univers, indiquent la nécessité, prévue par Einstein, puis rejetée par lui, d'une "constante cosmologique", une forme d'énergie qui étire l'univers. La théorie des fluctuations quantiques des champs n'a aucun mal à expliquer l'origine de cette constante, mais le résultat qu'elle produit est trop grand par rapport aux observations toutes récentes d'un facteur 10^{120} ! La construction d'une théorie quantique de la gravitation, indispensable pour décrire la singularité initiale, le big bang, présente dans les solutions des équations d'Einstein, est donc très loin d'être achevée et elle nous entraînera sans doute dans bien des révisions sur la nature de l'espace-temps aux très courtes distances aussi bien que dans sa globalité.

La physique d'aujourd'hui est loin de se

résumer à ces questions conceptuelles fondamentales. A côté du réductionnisme intense de la physique de l'élémentaire, elle ambitionne, depuis Boltzmann à la fin du 19^{ème} siècle, de comprendre la matière composée d'un nombre gigantesque de constituants, puisque c'est ainsi qu'elle est. Les succès de la physique des solides, dont sont issues les technologies de l'information, ont été bâtis sur des modèles simples d'électrons quasi-indépendants les uns des autres. Or à la suite de découvertes récentes, telles fin 1986 celle de matériaux qui restent supraconducteurs loin du zéro absolu, il est devenu manifeste que de nouveaux états électroniques ne pouvaient pas s'expliquer si l'on négligeait les corrélations entre électrons. Mais dès lors, les problèmes deviennent bien difficiles... De nombreux progrès ont été obtenus grâce aux techniques de confinement quantique, qui permettent de localiser les électrons dans des couches bi-dimensionnelles par exemple. Des effets spectaculaires sont alors observés, tels qu'une variation par paliers successifs de la conductivité Hall, et le transport de charge électrique s'opère même parfois comme si les charges étaient fractionnaires. On réalise aujourd'hui des petites boîtes quantiques à l'intérieur de ces couches bi-dimensionnelles, dont l'extension latérale est de l'ordre de 100 nanomètres. Dans ces systèmes très petits la nature discrète des niveaux d'énergie des électrons se manifeste, comme s'il s'agissait de gros atomes. Les propriétés de ces systèmes sont loin d'être bien comprises, mais de nombreux travaux tentent de préserver la cohérence quantique de ces états pour arriver peut-être à l'ordinateur quantique tant recherché. On peut attendre également des progrès importants d'une nouvelle électronique qui utilise non seulement le transport de charge de l'électron, mais également celui de son spin. Les têtes de lecture des disques durs de nos ordinateurs utilisent déjà un phénomène de cette nature découvert depuis peu dans un laboratoire d'Orsay, la magnétorésistance géante de multicouches magnétiques, qui permet de détecter de toutes petites variations de champ. Il serait fastidieux de poursuivre cette énumération, mais l'activité, tant au plan fondamental que dans les perspectives d'application de cette science, est d'une impressionnante vigueur.

Enfin, dans le peu de place impartie, il me faut évoquer toutes les directions nouvelles dans lesquelles la physique

s'est engagée depuis une trentaine d'années. À côté de l'élémentaire et du solide idéal, l'étude des propriétés de milieux désordonnés, beaucoup moins idéaux, tels les verres, qui ne sont jamais à l'équilibre, s'est révélée fort riche dans ses méthodes et ses capacités à décrire toute une variété de situations. C'est ainsi que les réseaux de neurones formels, sans prétendre à un réalisme biologique quelconque, ont eu le mérite de démontrer que des comportements complexes, tels l'apprentissage et la mémorisation, pouvaient résulter d'éléments simples répétés en grand nombre. D'autre part à côté de la physique des solides, l'étude de "la matière molle", qui doit tant à l'impulsion de de Gennes (cristaux liquides, polymères, colloïdes, gels, pâtes, milieux granulaires...) a lancé toute une génération de physiciens vers des objets nouveaux, parfois à la frontière de la mécanique du solide, et maintenant de plus en plus souvent tournés vers la physique du vivant. L'irruption de la masse considérable de données issues du séquençage, la possibilité d'études de molécules biologiques uniques, les moyens techniques de manipulation et d'imagerie qu'offre la physique d'aujourd'hui, ont attiré beaucoup de jeunes scientifiques vers ces disciplines. Il est clair que leur culture les conduit parfois à poser des questions un peu différentes, par exemple à interroger la robustesse du système en réaction aux modifications physico-chimiques de l'environnement. Ces questions sont-elles pertinentes pour comprendre la matière vivante telle qu'elle est ? C'est sans doute loin d'être toujours le cas, mais je ne jurerai pas que cet effort est vain.

Les belles certitudes de la fin du 19^{ème} siècle se sont donc écroulées. Nous ne connaissons pas les réponses à des questions centrales qui concernent l'espace-temps et l'élémentaire, la cosmologie ou la matière reconstruite. Les objets d'étude sont aujourd'hui souvent complexes et bien éloignés de ce qu'ils étaient il y a trente ans. Certes, l'imagerie actuelle, aux niveaux microscopiques aussi bien que pour l'observation de l'univers, offre une extraordinaire moisson de résultats sur notre univers. C'est ainsi que les astrophysiciens "voient" aujourd'hui le trou noir de quelques centaines de millions de masses solaires qui est au centre de notre galaxie, ou ont observé depuis peu déjà une centaine d'exoplanètes. Mais combien nous sommes loin encore de comprendre l'univers et le monde qui nous entoure ■

De la micro- aux composa



par Emmanuel Rosencher¹

Peu de découvertes ont eu plus d'impact sur notre vie de tous les jours que celle d'un composant électronique : le transistor CMOS (Complementary Métal-Oxyde-Semi-conducteur). Il faut remonter au début de l'Électricité pour qu'une série de découvertes bouleverse aussi profondément l'organisation sociale. Internet, les ordinateurs, les téléphones portables, l'imagerie médicale... tous ont été rendus possibles par les performances exceptionnelles du CMOS. La physique est au cœur de ce bouleversement qui, après la mécanisation du travail manuel, a vu apparaître l'automatisation du travail intellectuel.

La particularité de la découverte du CMOS est qu'elle n'est pas le fruit du hasard. Entre 1920 et 1930, plusieurs physiciens (les prix Nobel W. Schottky, N. Mott, A. Pohl) découvrent que l'on peut repousser les électrons de la surface de

certains matériaux (les semiconducteurs) en y appliquant un potentiel électrique : c'est la zone de charge d'espace qui s'étend sur une distance de l'ordre du micromètre. Cet ordre de grandeur est essentiel : c'est lui qui permet de comprendre pourquoi l'électronique d'aujourd'hui est micro-électronique.

Dès cette première découverte, la communauté des physiciens prend conscience que cet effet physique a le potentiel de bouleverser l'électronique de l'époque qui était alors fondée sur les volumineux tubes à vide : il suffirait (tout est dans ce conditionnel!) de placer cette zone de charge d'espace entre deux contacts électriques et l'on pourrait contrôler le courant qui passe entre ces deux contacts, comme un pied (la grille) qui écrase un tuyau et contrôle le flux entre le robinet (la source) et le jardin (le drain). Cette zone de charge d'espace occupant (à l'époque) des volumes de l'ordre du 100 micron cube (10^{-6} cm^3), les physiciens envisageaient un gain en volume de l'ordre de 1 million par rapport aux tubes pour la même fonction ! La réalisation de cette valve électronique va devenir une quête qui ne s'achèvera

que vers les années 1960, avec la mise au point aux Bell Labs de l'oxydation du silicium qui isole électriquement la grille des contacts drain et source : le premier transistor MOS est alors réalisé. Même s'ils comprenaient l'importance que pourrait revêtir la réussite d'une telle quête, les physiciens n'avaient pourtant pas conscience du bouleversement profond que cette découverte allait avoir sur les structures de nos sociétés.

Il faudra encore 10 ans de compétition, de recherches acharnées au niveau mondial pour que la société IBM mette finalement au point la combinaison de deux transistors métal-isolant-semi-conducteur complémentaires (le CMOS) et démontre les vertus de cette structure : très faible consommation d'énergie (le composant ne consomme pas d'énergie s'il n'est pas interrogé), un facteur d'échelle extrêmement favorable. Plus précisément, une diminution d'un facteur α de la dimension de cette structure conduit à une augmentation de α^3 de ses performances, par exemple d'un facteur 8 pour une diminution de taille d'un facteur 2. Sans ce progrès, l'unité de calcul qu'il aurait fallu réaliser vers 1978 pour mettre au point l'imagerie médicale IRM aurait eu un volume de l'ordre de celui de l'Arc de Triomphe et serait tombée en panne toutes les millisecondes !

Depuis lors, la filière à transistors CMOS est la seule filière de la microélectronique industrielle. Comme il a été annoncé, sa réalisation n'a pas été le fruit du hasard mais a été la mise à contribution de façon consciente et cohé-

rente de tous les secteurs de la physique :

- la physique quantique du solide
- la physique des matériaux
- la physique des surfaces
- l'optique
- la physique du calcul, ...

et a été par là même une force motrice des progrès de la physique depuis 50 ans. On estime à plusieurs centaines le nombre de publications clés à l'origine de sa maîtrise et de sa compréhension. Le nombre de chercheurs et techniciens qui y a participé est de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers. Le chiffre d'affaire de l'industrie des seuls semi-conducteurs est de l'ordre de 150 milliards d'euros par an et l'industrie électronique qui en est directement issue représente 1 026 milliards d'euros en 2001. Les conséquences sociétales sont incommensurables : Internet et la société de l'information en sont un exemple. Il y en a d'autres moins bien chiffrés mais tout aussi impressionnants : sans les progrès de la micro-électronique, il n'y aurait jamais eu d'imagerie RMN, pas de monitorages médicaux, ... La part de la microélectronique dans l'augmentation de l'espérance de vie dans les sociétés industrielles n'a pas encore été estimée mais c'est certainement en terme de plusieurs années que l'on devrait compter.

¹ Directeur scientifique de la branche physique à l'ONERA, professeur à l'École polytechnique.

électronique nouveaux défis quantiques

Le CMOS: Une révolution permanente

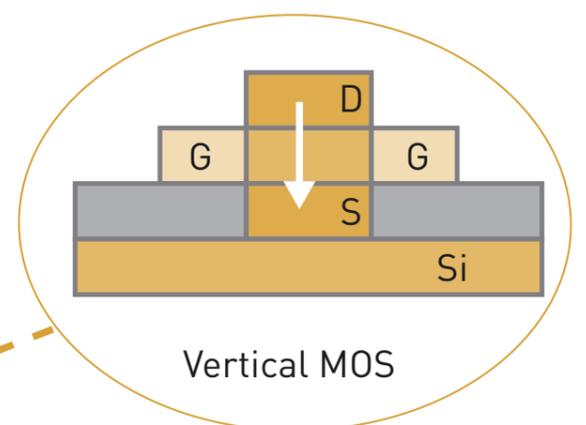
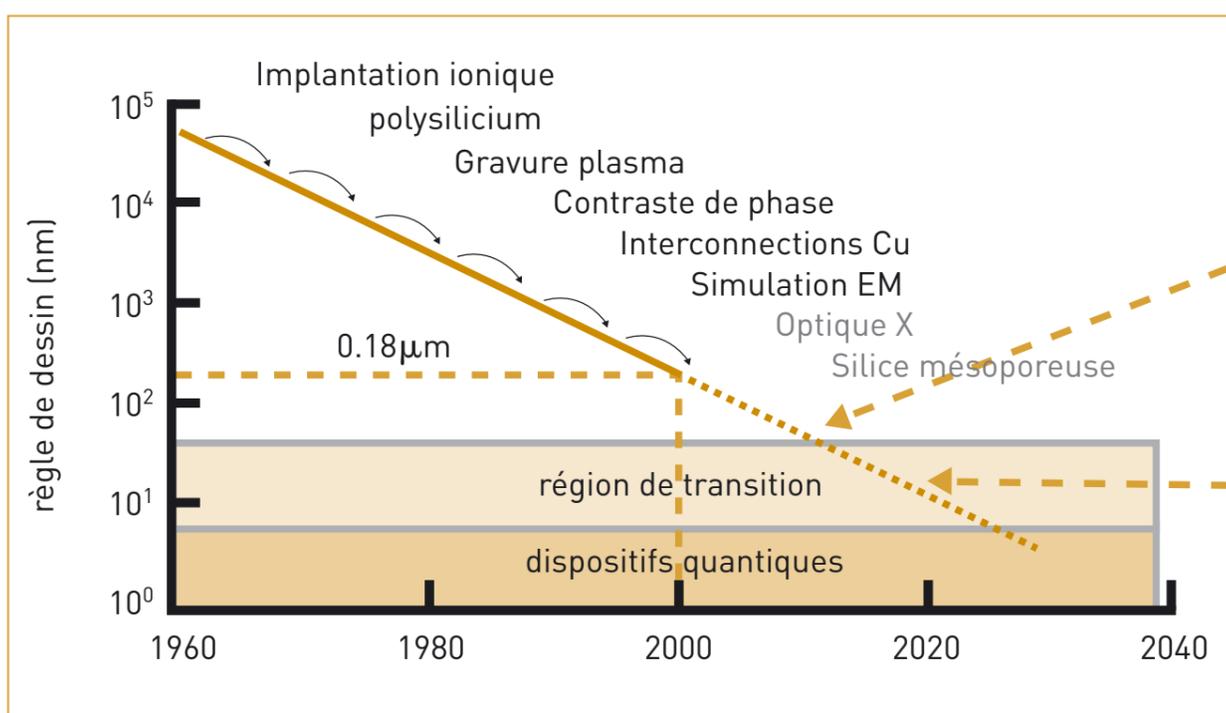
Comme on l'a déjà dit, l'une des vertus cardinales du transistor CMOS est son facteur d'échelle extrêmement favorable. Les gains compétitifs obtenus par l'industrie lors de la diminution de taille des CMOS sont telles que les efforts énormes de recherche demandés pour cette diminution n'ont jamais été ni ralentis ni reportés : aucune pause n'a été jusqu'ici constatée. Il faut réaliser que chaque gain dans les performances des circuits intégrés conduit à des percées de type révolutionnaire que tout le monde peut constater : des fonctions qui étaient impensables dans certaines

filiales technologiques (exemple : battre un grand Maître aux échecs, prévoir la météo à long terme, ...) deviennent réalisables dans la filière suivante, grâce aux apports concomitants des autres domaines des sciences, comme la logique, l'algorithmique, les mathématiques appliquées, Cette tendance s'exprime de façon quantitative par une loi (dite loi de Moore du nom d'un des directeurs d'Intel) : la taille des composants CMOS diminue d'un facteur 2 tous les 18 mois. Aucun autre domaine de l'activité humaine ne présente de telles augmentations de performance (facteur 8 en puissance logique tous les 18 mois) avec

une telle constance (depuis 20 ans). Cette loi de Moore est en fait une loi économique, imposée par les cycles et équilibres économiques. Néanmoins, à chaque fois la physique a été au rendez-vous : les ruptures scientifiques et technologiques ont été réalisées. La Figure 1 illustre cette loi de Moore avec les principales percées que la physique et la technologie ont dû réaliser au cours des 20 dernières années pour se soumettre à cette loi empirique. Ainsi, la loi de Moore se présente comme une force motrice de la recherche, une attitude librement consentie par les acteurs industriels et gouvernementaux, qui devrait, comme l'indique la Figure 1, se prolonger jusque vers 2015 ■■■

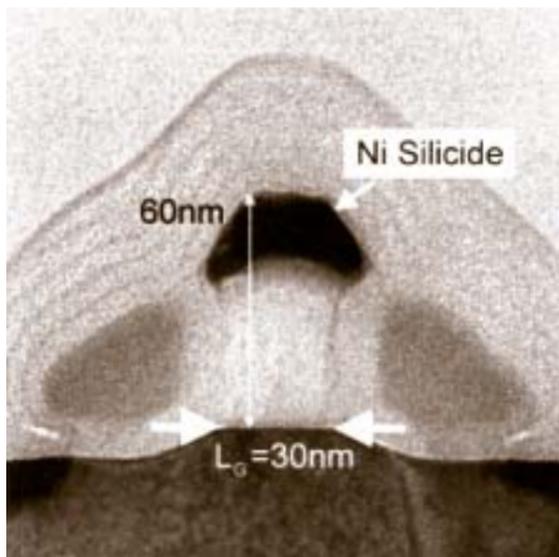
Figure 1: Évolution de la taille des grilles de transistor dans les circuits intégrés (CI) depuis l'invention du CMOS. Chaque fois qu'une limitation physique semblait devoir éloigner l'évolution des CI de l'extrapolation de la courbe de Moore, une nouvelle avancée scientifique et technique a permis de recoller à cette courbe.

La loi de Moore

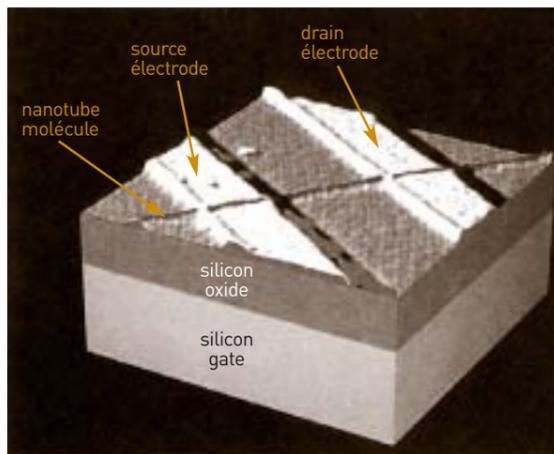


valve de spin?
jonction tunnel magnétique?
mémoire à 1 électron?
...

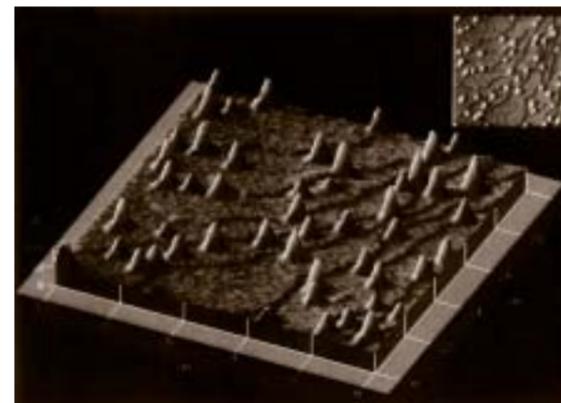
De la micro-électronique aux composants quantiques



a



b



c

Figure 2:

- a Transistor MOS de 50 nm de grille (microscopie électronique par transmission, Filière 90 nm, Intel, 2002).
- b Transistor à base de nanotubes (microscopie électronique, Cees Dekker, Delft Institute of Technology, the Netherlands).
- c Boîtes quantiques réalisées par croissance auto-organisée (Microscopie à Force Atomique, J.-M. Moison et J.-M. Gérard, CNRS/LPN).

■ ■ ■
Parmi les percées majeures en physique qu'il sera nécessaire de réaliser pour satisfaire à cette loi, nous citons :

- **les nouvelles sources optiques pour la lithographie :** il faudra contrôler les dimensions des composants à des échelles de l'ordre de quelques nanomètres sur des distances de plusieurs dizaines de centimètres. Déjà, un effort de recherche à l'échelle mondiale a débuté pour réaliser des sources optiques très lumineuses dans le domaine des ultra-violets lointains et des rayons X. Parmi les sources les plus prometteuses, celles obtenues par interaction entre des lasers de très forte énergie et des cibles rayonnantes (agrégats d'atomes, vapeurs métalliques, ...) constituent une force motrice indéniable pour la recherche sur les lasers et les interactions plasma-laser,
- **les nouveaux matériaux :** la microélectronique a toujours nécessité des efforts de recherches importants dans le domaine des matériaux. Les enjeux des années à venir seront l'obtention de matériaux présentant des résistances électriques très faibles (mieux que le cuivre actuel), des isolants présentant au contraire une résistance aux fuites des électrons plus importante que la silice actuelle (diminution de l'effet tunnel), des permittivités électriques plus faibles (silice mésoporeuse, ...),
- **la crise de l'interconnexion :** La richesse des opérations logiques effectuées par les circuits intégrés réside dans la complexité de l'agencement (l'interconnexion) des composants CMOS entre eux. Dans les circuits intégrés actuels (200 millions de transistors), les concepteurs utilisent déjà 11 niveaux d'interconnexions métalliques, chaque niveau étant aligné à mieux que 0,05 µm par rapport aux autres. Un

cauchemar technologique ! Le problème pour connecter entre eux des milliards de transistors sur une même puce sera un des problèmes majeurs de la micro-électronique. C'est l'un des seuls pour lequel on ne voit pas encore de solutions crédibles se mettre en place. Rappelons comment la Nature a résolu très élégamment ce problème immense : dans le cerveau humain, les neurones ne sont pas interconnectés à la naissance. Cette interconnexion se fait spontanément et en 3 dimensions sous l'influence des stimuli extérieurs (les axones poussent comme des branches d'arbres et s'interconnectent) pendant les phases de développement initial du cerveau.

Les composants quantiques : une chance ou une malédiction...

Comme on le voit sur la Figure 1, la loi de Moore pousse le composant CMOS dans les cordes des dimensions nanométriques qui seront atteintes vers 2010. Sur de telles dimensions, le comportement ondulatoire des électrons prend le pas sur leur comportement corpusculaire.

Ce peut être une source de problèmes : par exemple les oxydes perdent leur caractère isolant, les électrons les traversant par effet tunnel (un effet purement quantique). Les composants se mettent à consommer de l'énergie même lorsqu'ils ne commutent pas, ce qui condamne à terme la filière CMOS. Ce problème génère une activité de recherche intense, les chercheurs tentant de développer des isolants moins transparents aux ondes électroniques.

Ce peut être au contraire une source de nouveaux effets et donc de nouvelles opportunités. Depuis deux décennies, l'aspect quantique des électrons est d'ailleurs mis en œuvre dans un composant présent dans nos lecteurs de disque laser et les systèmes de télécommunications : les lasers à semiconducteurs. Dans ce dernier cas, le contrôle de la dimension nanométrique est obtenu par un dépôt, couche atomique après couche atomique, de matériaux semiconducteurs différents : on parle d'hétérostructures, qui ont valu à Mrs H. Stormer et D. Tsui leur prix Nobel en 1998 et à H. Kroemer et Z. Alferov celui de 2000. Ces structures nanométriques se comportent vis à vis des électrons comme des puits de potentiel bidimensionnel. Le mouvement des électrons est quantifié dans la direction des couches de dépôts : sous l'effet d'un courant électrique, les électrons effectuent des transitions entre les différents niveaux quantiques dans les puits de potentiel quantique (on parle de puits quantiques)

et émettent leur lumière laser. De nombreux autres composants opto-électroniques utilisent cette quantification du mouvement des électrons dans une dimension : les détecteurs infrarouge à puits quantiques (QWIP), les lasers à cascade quantique, les diodes tunnel, les transistors à gaz d'électrons bidimensionnels (TEC-FET)... Tous ont trouvé des niches technologiques importantes dans les secteurs de la téléphonie mobile, la Défense, l'environnement...

En route vers les nanotechnologies

La fabrication réussie d'objets quantiques bidimensionnels a bien sûr suscité de nombreuses vocations de recherches vers la production d'objets de dimensions inférieures : des fils puis des boîtes quantiques. Pour cela de nombreuses voies ont été développées.

- **La voie lithographique :** poursuivant la course à la réduction de dimensions latérales, de nombreux laboratoires utilisent les technologies de lithographie pour fabriquer des composants nanométriques. Des CMOS de 50 nm de long ont été ainsi réalisés dès la fin des années 1980 (Figure 2a). Néanmoins, de par la rugosité naturelle des objets produits par ces technologies, peu d'effets quantiques purs associés à cette réduction de taille y ont été effectivement observés. En revanche, des effets plus subtils ont été trouvés tels que le blocage de Coulomb dans lequel la variation de charge due à un seul électron bloque le passage du courant électrique dans un îlot nanométrique. La technologie lithographique reste pour l'instant la seule technique permettant de réaliser un contact individuel entre l'objet quantique fabriqué et le monde extérieur (un circuit électrique par exemple).

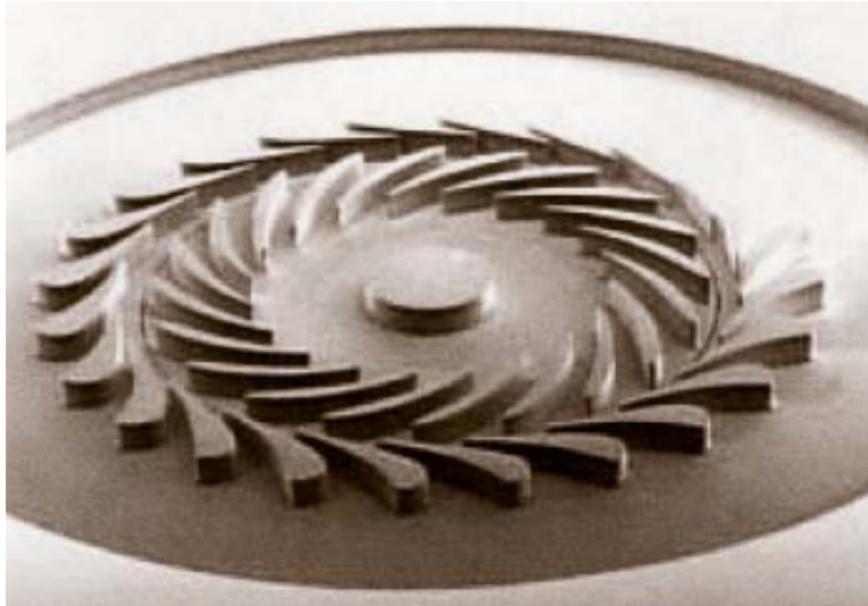


Figure 3:
Un chef-d'œuvre de microtechnologie : la microturbine (pensez à la taille d'un turboréacteur!) réalisée par l'équipe du MIT destinée à fournir de la puissance électrique. La taille de la microturbine est de quelques centaines de μm !

L'après CMOS

Déjà, les jours de la structure CMOS actuelle sont comptés. Sa mort est présente dans les années 2015 (voir Figure 1). Après 10 ans de recherches programmées (programme cadre européen IST, SEMATECH, MITI, ...) une structure intermédiaire (le CMOS vertical) semble se dégager et est étudiée dans de nombreux laboratoires. Bien qu'un peu décevant au point de vue conceptuel (pas d'effet quantique majeur), cette structure représente néanmoins un nombre considérable de défis physiques et technologiques à résoudre. Au delà de 2025, de nombreuses technologies ont été proposées (électronique de spin, moléculaire, les nanotubes, ...). Ces filières ont en commun l'exploitation d'un phénomène physique de commutation mais aucune n'a dépassé, dans la démarche globale qu'a été celle des physiciens du CMOS, le stade où en était la valve électronique en 1930. La succession du CMOS est sans doute l'un des plus grands défis lancé à la Science.

L'augmentation des performances de circuits intégrés continuera dans la logique de cette révolution permanente: avec l'aide d'autres secteurs de la science, des progrès majeurs pour l'humanité seront réalisés, comme les puces à traduction simultanée, l'intelligence artificielle des robots sur lesquels une immense industrie se construira, ...et la recherche en physique restera la discipline moteur de ce progrès.

Un avatar de la micro-électronique : les micro et nano- mécanismes

La mise au point des technologies de la micro-électronique a nécessité la connaissance et le contrôle absolu de

toutes les étapes du façonnage du silicium et de ses collatéraux (oxydes, nitrures, siliciures, ...). Petit à petit, les physiciens ont pris conscience qu'ils pouvaient mettre à profit cette connaissance pour réaliser des objets microscopiques ayant des applications autres que celle du traitement de données. Il s'agit alors de micro- ou nano-machines intégrant des mécanismes microscopiques et des circuits de traitement de l'information : des injecteurs pour la séparation isotopique, des accéléromètres pour déclencher les airbags, ... utilisent déjà ces technologies. La micro-opto-mécanique (MEOMS) a permis la réalisation d'une matrice de millions de micro-miroirs (voir Figure 3) qui équipent déjà de nombreux systèmes de vidéo-projecteur. Des laboratoires microscopiques (lab-on-chip) sont développés dans de nombreux laboratoires, intégrant des fonctions complexes (filtration, électrophorèse, séquençage, ...) et mettront à la disposition de tous des outils de diagnostics médicaux très sophistiqués. Les micro- et nano- technologies sont un des domaines les plus actifs de la recherche en physique actuelle. Grâce à la maîtrise de ces tech-

nologies, on pourra réaliser des nano-robots capables d'intervenir à l'intérieur du corps humain, réaliser des organes artificiels (d'abord œil puis foie, reins, pancréas,...). Des micro-drones présentant des tailles comparables à de gros insectes, capables de faire du vol statique, emporteront des moyens d'observation radar et/ou optiques pour les besoins en environnements difficiles.

En dehors de ces retombées immédiates qui bouleverseront profondément les techniques médicales et l'industrie, de nouvelles frontières physiques seront bientôt abordées que rendent possibles ces relais vers le nano-monde. Des expériences par la pensée comme le démon de Maxwell, séparant des molécules rapides des lentes, ou le chat de Schrödinger, pont entre les mondes quantique et classique, deviendront réalisables. Très récemment, des mesures que l'on pensait irréalisables ont été effectuées comme la mesure des (nano!) - forces de Casimir-, force infime due à la fluctuation du vide dans une cavité, grâce à l'utilisation de ces micromachines. Déjà des réflexions sont en cours pour tester les lois de l'attraction universelle en deçà du millimètre.

L'avènement de ces nanotechnologies a libéré le silicium du champ clos de l'électronique. Toutes les disciplines (optique, fluide, aérodynamique, biologie, mécanique, acoustique...) sont avides des possibilités offertes de mesurer, contrôler, décider et agir au niveau micro puis nanoscopique. La lecture des revues scientifiques se fait l'écho de ce débriement de l'esprit d'innovation, fruit de la fertilisation croisée. Seule l'imagination semble pouvoir limiter les développements liés à ces nouvelles technologies ■

- **La croissance cristalline :** lors de dépôts d'un semiconducteur sur un autre, des îlots de très faibles dimensions peuvent se former (figure 2b). C'est une sorte de réaction de rejet d'un des matériaux vis à vis de l'autre pour des raisons de structure cristalline trop différente : on peut alors parler d'atomes artificiels, la structure de ces îlots présentant toutes les caractéristiques quantiques tridimensionnelles des atomes. Leur utilisation dans des lasers à semiconducteur est déjà envisagée.

- **La Chimie :** La Nature produit spontanément des objets quantiques sous forme de molécules, protéines, ... Les propriétés électriques des molécules d'ADN sont déjà en cours d'études ! Les possibilités de synthèses se sont de plus enrichies récemment avec la découverte de nouvelles formes du carbone comme les fullerènes puis les nanotubes. L'étude de ces objets nanométriques ne fait que commencer mais, à mi-chemin entre la molécule et le composant, ils offrent déjà des possibilités extrêmement originales : on peut réaliser des contacts électriques (au hasard bien sûr puisqu'ils sont réalisés en vrac), on peut y inclure des molécules ou atomes magnétiquement actifs, ... (figure 2c)



Les dimensions de

Entretien avec Pierre Binétruy¹

par Paul Caro²

Question :
Qu'entendez-vous par "dimensions de l'Univers" ?

Pierre Binétruy :
Les dimensions dont nous parlons sont assez similaires à celles que nous concevons quand nous décrivons l'espace à trois dimensions, ou si nous rajoutons le temps, l'espace-temps à 4 dimensions. Elles sont quelquefois plus abstraites, comme des paramètres dans

un problème de physique utilisant des espaces formels "multidimensionnels", mais en général ce sont vraiment des dimensions de type spatial qui appartiennent à la géométrie de l'espace. Elles ne sont pas directement accessibles pour le moment à nos instruments de mesure. Le but est de faire à terme des expériences qui permettent de les observer, directement ou indirectement.

Votre travail semble s'appuyer sur deux extrêmes, d'une part sur l'infiniment

petit, d'autre part sur les espaces astrophysiques ?

La motivation vient des deux extrêmes. Puisque nous n'observons pas ces dimensions supplémentaires avec nos moyens ordinaires, a priori elles ne sont pas infinies (ou très grandes), comme le sont les trois dimensions spatiales habituelles. Donc, si elles existent, elles sont vraisemblablement microscopiques. Mais, bien que petites, ces dimensions modifient l'espace et donc on peut s'attendre à ce

¹ Professeur des universités, laboratoire de physique théorique, université Paris XI.

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



l'exemple du fil-de-fériste. Celui-ci se déplace le long de son fil selon une seule dimension spatiale, mais le fil a lui-même une épaisseur non nulle. Une fourmi qui se déplacerait sur le fil aurait à sa disposition les deux dimensions de la surface du fil : celle utilisée par le fil-de-fériste et celle finie (nous disons "compacte") correspondant à un chemin autour du fil.

Quelle est la taille maximale de ces dimensions supplémentaires ? A priori on n'en a observé aucun signe jusqu'aux plus petites distances observées expérimentalement dans les accélérateurs de particules, soit quelques fractions de fermis (un milliardième de milliardième de millimètre), ce qui donnerait la taille maximale de ces dimensions. Mais tout ceci nécessite de réfléchir un peu sur la nature de nos instruments de mesure.

On observe avec les yeux, avec des photons, et si ces dimensions ne sont pas accessibles aux photons, on ne peut les "voir". Les mesures dans les accélérateurs de particules se font à partir de traces chargées électriquement ou à partir d'interactions microscopiques (les interactions dites faible et forte qui ne sont opérantes qu'à des échelles microscopiques). Si les dimensions supplémentaires ne sont sensibles ni à la force électromagnétique, ni aux forces faible et forte, on manque alors d'instruments de mesure pour les sonder et elles peuvent être plus grandes qu'on ne l'avait imaginé. Ces dimensions sont alors accessibles à la seule force gravitationnelle, qui n'a été testée que jusqu'à des distances à peine inférieures au millimètre. La taille de ces

supplémentaires ne seraient-elles sondées que par la gravité ; la "sonde" serait dans ce cas l'équivalent du photon pour la gravité, c'est-à-dire le graviton.

N'est-il pas difficile de vérifier expérimentalement la loi de la gravitation en dessous du millimètre ?

Il est effectivement difficile de mesurer l'attraction gravitationnelle entre deux grosses boules, ou plaques, séparées d'un millimètre, la mesure étant perturbée par un certain nombre d'effets comme les effets électrostatiques, plus puissants que la gravitation, ou même les forces de Van der Waals, ou l'effet Casimir, c'est à dire les fluctuations quantiques du champ électromagnétique. Parmi tout cela il est difficile de faire la part des forces gravitationnelles. Des tentatives expérimentales ont lieu actuellement, et la loi de Newton (la proportionnalité des forces à l'inverse du carré des distances) est confirmée jusqu'à des distances de l'ordre de quelques centaines de microns. La loi de Newton change si l'on s'écarte des trois dimensions habituelles. Avec quatre dimensions d'espace, la force varierait comme l'inverse du cube de la distance et ainsi de suite. Ces expériences ont connu un regain d'intérêt justement à cause de l'hypothèse de l'existence de dimensions qui ne seraient "vues" que par la force gravitationnelle.

Envisage-t-on d'utiliser d'autres "sondes" ?

Le test expérimental le plus direct des

supplémentaires ayant une taille finie sont assimilables à une boîte et depuis de Broglie, nous savons associer une onde à une particule (association onde-corpuscule). Ces modes de Kaluza-Klein sont recherchés activement avec les collisionneurs de haute énergie.

Dans le cas de scénarios de branes, on recherche aussi des effets de "fuite" dans ces dimensions supplémentaires. Dans une collision de haute énergie entre particules (qui restent confinées à la brane), on peut libérer de l'énergie sous forme gravitationnelle qui va alors pouvoir s'échapper de notre brane (et disparaître de nos instruments de mesure). De même, en astrophysique, l'explosion de supernova qui résulte de l'effondrement gravitationnel d'une étoile libère une forte quantité d'énergie sous forme d'ondes gravitationnelles et de particules comme les neutrinos. Si l'Univers a plus de trois dimensions, l'énergie est aussi relâchée dans ces dimensions supplémentaires sous forme d'ondes gravitationnelles. En conséquence, la supernova se refroidit plus rapidement. De telles considérations permettent d'obtenir des contraintes fortes sur la taille de ces dimensions.

A-t-on observé des ondes gravitationnelles provenant de supernova ?

On n'a jamais observé directement d'ondes gravitationnelles. Je parlais ici du refroidissement des supernovae qui est compatible avec ce que l'on peut imaginer, relâcher dans les trois dimensions de l'espace sous forme d'ondes

l'Univers

qu'elles jouent un rôle important dans l'évolution de l'Univers, un rôle cosmologique.

Dire que ces dimensions supplémentaires sont petites laisse entendre qu'elles ont une taille. La notion de taille est associée à celle de périodicité : si nous avançons le long d'une de ces dimensions, nous revenons au bout d'un certain temps au même endroit, la distance parcourue mesure la taille de la dimension. On peut penser au déplacement le long d'un cercle.

Pour être plus explicite, prenons

dimensions supplémentaires pourrait alors quasiment atteindre le millimètre ! L'image que nous avons alors en tête serait celle d'un univers à 3 dimensions spatiales dans lequel seraient confinées la matière, la lumière (ou plus généralement les ondes électromagnétiques, c'est-à-dire le photon) et les particules responsables des interactions faible et forte. On parle dans ce contexte de brane, par référence à une membrane pour traduire le fait que matière et interactions non-gravitationnelles seraient "scotchées" sur cette brane à 3 dimensions. Les dimensions

supplémentaires est la recherche de ce qu'on appelle les modes de Kaluza-Klein. Ces modes de Kaluza-Klein sont des répliques lourdes des particules usuelles. Le spectre de masse correspondant est très précisément fixé par la taille de la dimension supplémentaire : la différence de masse entre deux niveaux successifs est inversement proportionnelle à la taille des dimensions supplémentaires. Ceci est à rapprocher de la loi qui fixe les niveaux d'énergie d'une onde stationnaire dans une boîte. Après tout, les dimensions

gravitationnelles et de neutrinos. La meilleure preuve indirecte des ondes gravitationnelles est fournie par la mesure de la période d'un pulsar double ; il s'agit de deux étoiles à neutrons en orbite l'une autour de l'autre : l'accélération due à la rotation induit une dissipation d'énergie sous forme gravitationnelle qui entraîne une diminution constante de la période orbitale, diminution qui est très précisément mesurée. La détection expérimentale directe des ondes gravitationnelles fait l'objet en France et en Italie de la construction ■■■



Les dimensions de l'Univers

■■■ de l'interféromètre Virgo. Pour le futur, vers 2010, on prévoit de lancer un système de satellites formant un interféromètre dans l'espace, baptisé LISA. Il est basé sur des masses placées dans trois satellites qui se déplacent "en formation" à grandes distances les uns des autres. Un tel dispositif devrait permettre de mesurer les ondes gravitationnelles issues de la coalescence de deux trous noirs massifs et on essaie d'observer des interférences correspondant à la déformation de l'espace au passage d'une bouffée d'ondes gravitationnelles.

Le graviton paraît au cœur de votre problème... et le "gravitino" ?

Pour en parler, il faut aborder les théories "supersymétriques". Elles essaient d'expliquer la physique fondamentale en allant au-delà du modèle actuel qui marche très bien, le "Modèle Standard". Toutefois ce modèle ne répond pas à un certain nombre de questions, en particulier de nature cosmologique. Par exemple : savoir pourquoi il y a plus de matière que d'anti-matière dans l'Univers ? Pourquoi est ce que "l'énergie du vide", en fait celle de l'état fondamental de l'Univers, a une valeur si faible ? On se heurte à des problèmes qui font penser que la vision que nous avons de l'Univers est incomplète.

Le "vide", l'état fondamental, est une notion très riche en mécanique quantique parce qu'il est le siège de fluctuations qui sont intimement liées à la nature du système considéré. En physique d'ordinaire, on ne se préoccupe pas de la valeur absolue de l'énergie de l'état fondamental d'un système, on ne s'intéresse qu'aux différences d'énergie. C'est uniquement lorsque l'on couple ce système à la gravité que la valeur absolue de l'énergie joue un rôle. D'où la question concernant la valeur absolue de l'énergie du vide. Cette valeur intervient en fait dans les équations d'Einstein qui décrivent l'évolution de l'Univers. Einstein avait dans un premier temps ajouté dans ses équations un terme de type énergie du vide, baptisé "constante cosmologique" pour obtenir un Univers statique. Les travaux de Hubble ont ensuite montré que l'Univers était en fait en expansion. La "constante cosmologique" est alors tombée en désuétude jusqu'à ce que

l'on fasse des progrès dans l'étude des interactions fondamentales et que l'on s'aperçoive que cette énergie du "vide" devait être très importante. Si elle est non nulle en tout cas, elle introduit une accélération de l'expansion de l'Univers. Or, les observations récentes semblent indiquer une réaccélération tardive dans l'expansion ; cette accélération serait due à la présence d'une troisième composante à côté de la matière visible et de la matière noire, une composante appelée énergie noire qui ressemble étrangement à cette "constante cosmologique" ou énergie du "vide" ! Notons à ce propos que la valeur qui en est déduite pour la constante cosmologique est en désaccord avec ce que prédisent les théories fondamentales par de nombreux ordres de grandeur. Un mystère total ! Pourquoi cette énergie du vide serait-elle non nulle mais beaucoup plus petite que notre connaissance de l'état fondamental de la théorie ne nous le laisse entendre ? C'est sans doute le signe qu'au niveau de la description des interactions fondamentales, il y a quelque chose de central que nous ne comprenons pas.

Pour revenir au gravitino et à la supersymétrie, la physique du dernier quart de siècle aime bien expliquer les choses en terme de symétrie. Il y a une symétrie qui nous assurerait que la constante cosmologique est nulle, c'est une symétrie entre bosons (particules de spin entier) et fermions (particules de spin demi-entier) qui est précisément la supersymétrie dont je parlais. A chaque fermion un boson est associé et vice versa. Au graviton serait associé un fermion baptisé "gravitino". Cette supersymétrie conduit à une énergie du vide nulle, ce qui en première approximation n'est pas une mauvaise chose, mais elle nous dit aussi que la masse d'une particule et celle de son partenaire supersymétrique sont égales. Cette prédiction est en contradiction avec les observations. On fait alors appel à la notion de "symétrie brisée spontanément", un concept qui a montré toute sa richesse dans l'étude des interactions fondamentales. Malheureusement dès que la supersymétrie est brisée spontanément, la constante cosmologique retrouve une valeur beaucoup trop grande et on revient au point de départ ! Par contre la supersymétrie, même spontanément brisée, a tendance à bien contrôler les fluctuations quantiques et à permettre une stabilisation des paramètres du Modèle Standard. A ce titre, elle reste très précieuse et les particules supersymétriques sont activement recherchées avec les collisionneurs de haute énergie.

Qu'est ce que cette matière cachée ou "noire" ?

Certains pensent que le gravitino, tout

dépend de sa masse et de la manière dont la supersymétrie est brisée, pourrait en expliquer une partie. On a besoin de matière cachée à plusieurs niveaux. Au niveau des galaxies, la distribution de la vitesse des étoiles montre qu'il y a plus de masse dans la galaxie que ce que l'on observe de lumineux. On pourrait songer à une modification des lois de la gravité à cette échelle, mais il faudrait le faire à des échelles très différentes car on a besoin aussi de cette "matière noire" à l'échelle des amas de galaxies, et en fait à celle de tout l'Univers puisque l'on met en évidence dans le bilan d'énergie de l'Univers un déficit de matière. On peut noter que la particule supersymétrique la plus légère (qui généralement n'est pas le graviton mais serait plutôt du type du partenaire supersymétrique du photon ou "photino") représente un très bon candidat pour le constituant de la matière noire.

Quel rapport avec le "trou noir" ?

Le trou noir est un objet particulièrement intéressant, c'est une singularité inobservable de l'espace-temps, inobservable parce que cachée par un "horizon" : tout ce qui tombe à l'intérieur de l'horizon du trou noir disparaît dedans à jamais et ne peut donc revenir nous dire ce qu'il a observé. La plupart des spécialistes pensent que l'on a observé des trous noirs, de façon indirecte en voyant la matière y tomber. Par exemple au centre de notre galaxie, en mesurant la vitesse des étoiles proches du centre galactique et en déterminant les quantités de matière présentes, on a identifié la présence d'un trou noir très massif. Il y a d'autres trous noirs, dits primordiaux, qui auraient été formés dès les premiers instants de l'Univers dans une sorte d'écume d'espace-temps où apparaissent des concentrations de matière dans une petite région qui s'écroule gravitationnellement. Pourquoi ne les observe-t-on pas ? Stephen Hawking a montré qu'ils ne sont pas stables, ils peuvent "s'évaporer" par des processus quantiques comme la création près de l'horizon du trou noir de paires de particules dont l'une s'échappe. Il est donc peu probable que la matière noire soit formée de trous noirs. La proximité n'est que sémantique.

Quelle importance a le rayonnement fondamental pour le problème des dimensions ?

Le rayonnement cosmologique est la trace du rayonnement primordial au moment du découplage des photons de la matière. A partir de ce moment-là, les photons se propagent sans interaction et l'Univers devient transparent. Les photons ne sont plus sensibles qu'à l'expansion de l'Univers qui les refroidit. La découverte par le satellite COBE de fluc-

tuations de température dans ce gaz de photons nous donne des renseignements précieux sur la structure de l'Univers primordial au moment du découplage. La précision s'est beaucoup améliorée depuis COBE notamment avec des expériences en ballon stratosphérique. Dans les années 2007, devrait être lancé le satellite européen PLANCK qui va faire une cartographie de l'ensemble du ciel pour ce rayonnement primordial.

La manière dont les fluctuations du rayonnement cosmologique ont évolué dépend a priori du nombre de dimensions de l'espace. Plus on dressera une carte précise des fluctuations dans l'ensemble du ciel, plus on peut espérer atteindre des informations capitales qui feront évoluer notre perspective. Pour l'instant, on observe une structure assez précise de fluctuations qui permet déjà d'avoir des informations quantitatives sur la densité de matière visible et cachée dans l'Univers, ainsi que sur la constante cosmologique (un des facteurs qui permet de penser qu'il y a une ré-accélération récente de l'Univers). Les données observationnelles vont être de plus en plus précises et infirmer certains modèles et en confirmer d'autres. Par exemple, les données actuelles confortent plutôt la "théorie de l'inflation", une évolution explosive de l'expansion de l'Univers très primordial.

Et la théorie des cordes ?

C'est la seule théorie qui fournisse un cadre cohérent à la description simultanée des interactions fondamentales (électromagnétisme, interactions faible et forte) et de la force gravitationnelle. L'idée est de remplacer des objets ponctuels (particules) par des objets microscopiques à une dimension (cordes). Cette théorie fournit alors une sorte d'échelle de longueur fondamentale associée à ces "cordes", extrêmement faible, ultramicroscopique, encore inaccessible aux accélérateurs de particules. Elle est aussi liée intimement à la supersymétrie et aux dimensions spatiales supplémentaires, neuf ou dix selon les couplages choisis. Notons d'ailleurs que la notion de brane dont nous parlions tout à l'heure est d'abord apparue dans le contexte des théories de cordes.

De façon intéressante, la question des dimensions supplémentaires d'espace est liée depuis le début aux tentatives d'unification des interactions fondamentales et de la gravitation. Dès les années vingt, T. Kaluza et O. Klein ont tenté une unification géométrique de l'électromagnétisme et de la gravité en introduisant une dimension supplémentaire. C'est dans ce contexte qu'ils ont introduit les modes que nous appelons maintenant de Kaluza-Klein ■

Frustration, désordre, systèmes complexes : la physique statistique hors des murs

par Marc Mézard¹

Comment émergent les phénomènes collectifs dans des systèmes comprenant beaucoup d'atomes ? Comment peuvent-ils donner lieu à des comportements qualitativement nouveaux, impossibles à deviner à partir de ce que l'on connaît sur un atome isolé ? Comment développer les différents niveaux de description, du microscopique au macroscopique, et les relier l'un à l'autre ? Ces questions, posées dès l'origine de la physique statistique, suggèrent un projet extraordinairement ambitieux. En effet, si l'on considère déjà le champ traditionnel de cette discipline, on y voit aborder des problèmes aussi divers que

la structure des étoiles à neutrons, la thermodynamique classique ou les condensats de Bose. Or voici que la physique statistique commence à s'intéresser à des sujets sortant de son périmètre habituel : il n'est pas rare de rencontrer des physiciens travaillant sur les codes de correction d'erreur pour la transmission d'information ou sur des modèles de marchés financiers fondés sur l'analyse du comportement d'agents en interactions. Une des origines de cette évolution se trouve au cœur même du domaine. Longtemps concentrée sur des systèmes homogènes, ou comportant peu de défauts (c'est l'étude du fluide simple,

ou bien celle du cristal), la physique statistique s'est attaquée depuis une bonne vingtaine d'années aux systèmes en interactions fortement désordonnés, ou chaque atome voit un environnement différent de celui vu par les autres atomes : c'est le cas des phases vitreuses, verre de spin (où des moments magnétiques se figent dans des directions "imprévisibles") et verres structuraux (où ce sont les positions relatives des atomes qui se figent). Ce caractère désordonné, qui empêche toute approche fondée sur la description d'un "atome représentatif" interagissant de manière autocohérente avec le milieu

effectif dû aux autres atomes est bien souvent associé à un effet de frustration : l'existence de contraintes antagonistes interdit de trouver une configuration d'énergie minimale par une simple optimisation des énergies locales. De tels systèmes vont donc posséder génériquement de nombreux "états métastables", minima locaux de l'énergie qui ralentissent considérablement l'évolution dynamique, d'où les temps de relaxation extraordinairement longs souvent observés dans les systèmes vitreux, qui continuent de vieillir des années après leur fabrication...

Dès lors que l'on étudie des comportements collectifs d'atomes qui sont tous distincts, ou dans des environnements distincts, il devient naturel de s'intéresser aux cas où les "atomes" sont de nature différente. Par exemple il pourra s'agir d'agents en interaction sur un marché, chacun suivant sa propre stratégie. Dans le domaine du traitement et transfert d'information, ou de certains problèmes d'optimisation combinatoire et d'inférence statistique, l'atome sera un "bit" d'information. La frustration crée de nombreux états collectifs possibles (des "attracteurs" de la dynamique de ces systèmes) que l'on cherche suivant les cas à éliminer ou contourner (optimisation, codes de correction d'erreurs) ou à contrôler pour les exploiter (mémoires associatives). C'est par ce type de démarche qu'ont été conçus des algorithmes d'optimisation radicalement nouveaux, ou que l'on a développé certains cadres conceptuels pour l'étude des réseaux de neurones, (qu'il s'agisse d'analyser des données de neurobiologie, ou bien d'imaginer de nouveaux modes de fonctionnement des ordinateurs).

C'est donc un vaste monde qui s'ouvre à la physique statistique. Discipline "de service", elle ne doit pas perdre de vue qu'on ne peut se dispenser ni de l'expertise déjà acquise, ni de l'étude détaillée de chacun des problèmes qu'elle va y rencontrer. En échange, elle peut offrir certains concepts, certaines techniques analytiques ou numériques, exploitant les simplifications apparaissant en présence d'un grand nombre de degrés de liberté, et parfois l'idée neuve suggérée par l'expérience acquise sur des problèmes similaires rencontrés dans un cadre différent. C'est donc probablement l'un des maillons indispensables à l'épanouissement de la science moderne vers cet état baptisé par E.O. Wilson de "consilience", où l'on saura vraiment construire les ponts entre les analyses à différentes échelles, et donc entre les disciplines ■

¹ Directeur de recherche CNRS, UMR 8626, Orsay

La manipulation de molécules isolées

par Jean-François Allemand¹, Vincent Croquette² et David Bensimon³

En manipulant des molécules isolées, les biophysiciens sont aujourd'hui capables d'étudier leurs structures et leurs interactions avec d'autres molécules.

Il y a 25 ans la neurophysiologie était révolutionnée par l'invention d'une méthode nouvelle d'enregistrement de l'activité électrique de canaux ioniques isolés dans une membrane. Cette technique astucieuse, connue sous le nom de patch-clamp, valut à ses inventeurs, Bert Sakmann et Erwin Neher, le prix Nobel de médecine. L'analyse statistique du courant passant à travers un seul canal, tel un signal télégraphique bruité, donne accès à la dynamique d'ouverture et de fermeture de ce canal et à la conductivité de ses différents états dynamiques. Elle permet donc une compréhension plus fine et détaillée de son activité. Cette information était cachée jusque-là dans la mesure du courant

moyen passant à travers un grand nombre de canaux. La biophysique passe actuellement par une révolution similaire, grâce au développement de nouveaux outils pour manipuler, visualiser et étudier des molécules isolées (ADN, ARN et protéines) et sonder leurs interactions. Ces nouvelles techniques - pinces optiques ou magnétiques, microfibres, microscope à force atomique, etc. (Fig. 1) - permettent d'appliquer des forces de l'ordre du piconewton (10^{-12} N) sur des molécules isolées et de mesurer leur extension ou leur déplacement avec une résolution de l'ordre d'1 nm. Le signal résultant ressemble souvent à une fonction monotone croissante de paliers bruités. C'est le cas par exemple pour les moteurs moléculaires : des protéines (telles les kinésines ou les hélicases) qui utilisent l'énergie chimique obtenue par l'hydrolyse de l'ATP pour effectuer un travail mécanique (transporter des objets le long de microtubules pour les kinésines ou ouvrir les deux brins de

l'ADN pour les hélicases). Dans ces exemples les transitions entre paliers correspondent au pas élémentaire du moteur. L'analyse statistique de ces signaux permet donc la mesure de ce pas, la description dynamique des diverses étapes du cycle enzymatique et une estimation du travail élémentaire fourni. Ces résultats, inaccessibles aux mesures biochimiques habituelles effectuées en volume sur un grand nombre de molécules, ouvrent la voie à une meilleure appréhension du fonctionnement de ces enzymes. Hormis les deux exemples déjà cités, des progrès très importants ont ainsi été réalisés ces dernières années dans la compréhension des enzymes responsables de la contraction musculaire (la myosine), de la génération d'énergie chimique (la F1-ATPase), de la réplication de l'ADN (ADN-polymérase), de sa transcription (ARN-polymérase) et de son désenchevêtrement (topoisomérase). De plus, la possibilité d'appliquer à des molécules isolées des forces suffisamment importantes pour induire des déformations structurales offre aux biophysiciens un levier de contrôle nouveau pour étudier leur structure et aborder la question fondamentale du repliement des biomolécules dans leur état natif (ARN, protéines). De nouvelles structures moléculaires métastables de

l'ADN sous contraintes mécaniques (tension ou torsion) ont été découvertes. On a révélé l'existence d'une corrélation entre la séquence de l'ADN et le signal obtenu en tirant sur ses brins comme sur une fermeture éclair, avec comme objectif le séquençage éventuel d'un seul ADN. Finalement, la dénaturation de protéines sous tension a été observée, mettant en évidence le dépliement successif de motifs sous-jacents. Une confrontation de ces résultats et de leurs simulations numériques devrait permettre d'affiner les modèles de repliement des protéines ■

Références

-T.R. Strick, J.-F. Allemand, D. Bensimon and V. Croquette, *Physics Today*, (October 2001), 46-51.
-“Frontiers in Chemistry: Single Molecules”, *Science*, (mars 1999), 283: 1667-1695.

¹ Maître de conférences des universités, LPS, ENS, UMR 8550 CNRS, 24 rue Lhomond, 75005 Paris

² Directeur de recherche, LPS, ENS, UMR 8550 CNRS

³ Directeur de recherche, LPS, ENS, UMR 8550 CNRS

Les anticorps monoclonaux humains : de la souris... à la vache



Par **Dominique Bellet**¹

Peu de temps après leur découverte comme molécules essentielles dans nos défenses naturelles, les anticorps ou immunoglobulines ont été utilisés comme médicaments (sérothérapie) injectés pour lutter contre diverses maladies (tétanos, rage, déficits immunitaires...), et dès 1906, l'immunologiste Paul Ehrlich les imaginait comme des "boulets magiques" (Figure 1). De plus, leur capacité de reconnaissance fine d'une structure moléculaire (site antigénique ou épitope) les a fait également utiliser comme réactifs de laboratoire pour la détection et le dosage de nombreuses molécules (bactéries, virus, hormones, cellules normales ou tumorales...) considérées alors comme des antigènes. A partir de 1975, avec la découverte des anticorps monoclonaux par Georges Kohler et Cesar Milstein, les anticorps ont été plus largement utilisés en diagnostic et en thérapeutique. Ces anticorps sont produits par hybridation cellulaire entre des plasmocytes, cellules productrices d'anticorps et une lignée tumorale de plasmocyte. La cellule hybride (ou hybridome) a les propriétés des deux cellules mères, la prolifération illimitée prodiguée par la lignée tumorale et la production continue d'anticorps conférée par le plasmocyte. Réalisée initialement chez la souris, la technique d'hybridation cellulaire qui allait valoir en 1992 le prix Nobel à Georges Kohler et Cesar Milstein est une remarquable application des travaux sur l'hybridation de cellules somatiques publiés à partir de 1961 par un français, Georges Barski. Si les anticorps monoclonaux allaient être rapidement de formidables outils de diagnostic, leur intérêt en thérapeutique allait être limité par plusieurs facteurs dont leur origine murine. En effet, injectés à un(e) patient(e), les anticorps monoclonaux murins provoquent

chez l'hôte la formation d'anticorps humains anti-immunoglobulines de souris (ou AHAM, anticorps humains anti-murins), limitant leur effet thérapeutique. De plus, les anticorps d'origine murine, sont peu efficaces pour stimuler les cellules du système immunitaire humain (macrophages, cellules T...) nécessaires pour éliminer les complexes antigènes-anticorps. Pour pallier à cet inconvénient majeur, les scientifiques ont élaboré diverses stratégies pour rendre "plus humains" les anticorps murins. Avec l'échec relatif des hybridomes produits avec des cellules humaines, les années 80 allaient être marquées par la réalisation d'anticorps chimériques et d'anticorps humanisés (Figure 2). Les anticorps chimériques, telle la figure de la mythologie,



Figure 1 : Les "anticorps" vus par Paul Ehrlich

ont une tête humaine (les parties variables des immunoglobulines) et un corps murin (les parties constantes). Utilisés en thérapeutique, (cinq sur les onze anticorps approuvés comme médicaments par les autorités fédérales américaines sont des anticorps chimériques produits par génie génétique), ces anticorps chimériques sont encore responsables de la production d'AMAM chez plus de la moitié des patient(s).

Les anticorps "humanisés" sont eux encore plus "humains" puisque seules les régions qui se lient à l'antigène (ou régions CDR pour Complementary Determining Region) sont d'origine murine. Cependant, il a encore fallu aller plus loin puisque ces anticorps monoclonaux "humanisés" (cinq sont approuvés comme médicaments) provoquent également la formation d'AMAM. La meilleure solution était donc de produire des anticorps monoclonaux entièrement humains.

Les premiers anticorps monoclonaux humains ont été produits en 1990 par une technique dite de présentation par des bactériophages, ces virus qui se multiplient dans les bactéries et qui sont capables d'exprimer à leur surface, après manipulation génétique, des fragments d'anticorps très variés. Plus de dix ans après leur découverte, les premiers anticorps monoclonaux humains rentrent en essais cliniques. Cependant, cette technique reste difficile et de nouvelles manipulations génétiques réalisées par inactivation des gènes murins et transfert des gènes humains dans des cellules embryonnaires aboutit

utilisant de nouveaux vecteurs, les chromosomes artificiels humains (ou CAH), il a été possible de transférer le répertoire entier des chaînes lourdes et des chaînes légères lambda humaines dans des oocytes bovins pour aboutir à des clones de vaches produisant des anticorps polyclonaux humains. Ces anticorps seraient susceptibles de remplacer les immunoglobulines intraveineuses (ouIVI) largement utilisées en médecine pour le traitement de maladies auto-immunes ou de maladies inflammatoires telles que le purpura thrombopénique idiopathique et le syndrome de Guillain-Barré. Jusqu'à alors

Les différents types d'anticorps monoclonaux

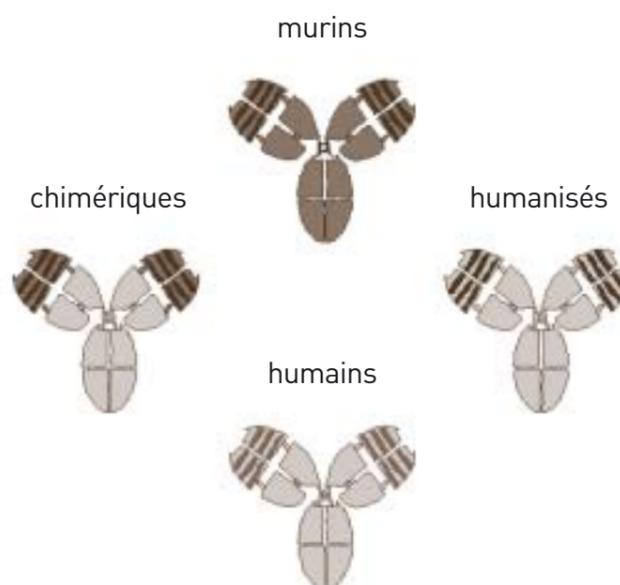


Figure 2 : Les différents types d'anticorps monoclonaux

à la création de souris transgéniques ou "transchromosomiques" qui produisent des immunoglobulines entièrement humaines. Un premier anticorps monoclonal humain produit par des souris transgéniques est entré en essai clinique.

Pourtant, cette dernière stratégie présente de nouvelles limites. En particulier, les vecteurs utilisés (YAC pour Yeast Artificial Chromosome), pour transférer le large répertoire des gènes humains ne permettent que le transfert d'une partie limitée de ce répertoire (environ 1 Mb sur les plus de 3 Mb constituant le répertoire des chaînes lourdes et des chaînes légères des immunoglobulines). Une nouvelle étape vient d'être franchie avec la production d'un large répertoire d'anticorps humains... par la vache. En

préparés à partir de milliers de donneurs, les IVI posent de difficiles problèmes de contrôle, récemment, exacerbés par le retrait de lots contenant des plasmas de sujets à risque pour la maladie de Creutzfeldt-Jacob. Bien entendu, de nombreuses questions se posent avant que ces anticorps humains soient utilisables en thérapeutique : Comment purifier les anticorps humains d'origine bovine ? Quelle sera l'équivalence entre les IVI et ces nouveaux anticorps humains ? Finalement, ces anticorps humains d'origine bovine sont-ils sans effets adverses ?

Finalement, l'histoire des anticorps monoclonaux ou polyclonaux humains montrent que toutes nouvelles manipulations génétiques apportent de nouvelles solutions et posent de nouvelles questions. Avant d'utiliser des anticorps humains produits par nos amies les vaches, continuons tout simplement à boire leur lait ! ■

¹ Professeur d'Immunologie, Faculté des sciences pharmaceutiques et biologiques de Paris, université René Descartes-Paris 5, chef du Département de Biologie clinique, Institut Gustave Roussy

² Un antigène est par définition, une molécule reconnue par un anticorps

Mémoire et apprentissage chez l'abeille



Par Minh-Hà Pham-Delegue¹

On admet que des Vertébrés tels que les Primates, les chiens, ou même les pigeons, sont capables de présenter des capacités cognitives. Mais l'aptitude d'insectes à intégrer des informations complexes et à présenter des comportements adaptatifs résultant de leur expérience, est moins connue. L'abeille constitue une exception, car depuis les fameux travaux de Karl von Frisch au début du XX^{ème} siècle qui ont permis de comprendre le code des danses, elle a constitué un modèle d'étude en biologie du comportement.

Les abeilles forment de véritables sociétés, dont l'organisation repose sur une division du travail. Ainsi, la fonction reproductrice est limitée aux reines, seules femelles fertiles, et aux mâles, tandis que les ouvrières qui constituent la très grande majorité de la colonie, assurent les autres tâches : alimentation des larves et de la reine, construction des rayons de cire, défense de la colonie contre les prédateurs, récolte de nourriture.

Au cours de ces différentes tâches, l'abeille fait appel à de remarquables capacités d'apprentissage. Ces capacités ont surtout été révélées par le fait que les butineuses visitent avec constance une même espèce de fleur pendant une période donnée. Ainsi, une butineuse qui

découvre une fleur, y prélève de la nourriture (nectar ou pollen). Ce faisant, elle associe à la présence de nourriture les caractéristiques de la fleur, et les mémorise. De retour à la ruche, elle communique à ses congénères, par les danses, la direction et la distance de la source de nourriture, et elle les informe sur la nature des odeurs diffusées par la fleur grâce aux molécules odorantes piégées sur son corps et que les autres abeilles détectent grâce à leurs antennes. De plus, elle donne des informations sur la qualité de la nourriture en cédant du nectar aux abeilles qui suivent les danses. Celles-ci vont alors rechercher la source de nourriture indiquée par la première butineuse. Chacune apprend à son tour les caractéristiques de la fleur, et danse à son retour à la ruche pour inciter de nouvelles recrues à visiter cette espèce de fleur, tant que celle-ci délivre de la nourriture. Parmi les signaux associés à une fleur, les signaux odorants sont les mieux appris par l'abeille.

L'aptitude des abeilles à se servir de signaux odorants pour se guider vers une source de nourriture a été montrée en dressant les abeilles à visiter un nourrisseur diffusant un parfum. Les abeilles choisissent ensuite un site diffusant ce parfum plutôt qu'un site diffusant un autre parfum, même si il n'y a pas de nourriture. En règle générale, les odeurs florales sont mémorisées plus rapidement que les autres odeurs. Toutefois, n'importe quelle odeur associée à de la nourriture, peut être mémorisée, y compris des odeurs initialement répulsives, comme l'odeur putride de l'acide butyrique.

L'apprentissage des odeurs a été étudié de façon particulièrement détaillée en utilisant une méthode permettant de conditionner des abeilles immobilisées. L'expérience consiste à déclencher une réponse réflexe d'extension du proboscis (langue de l'abeille) en touchant les

organes qui assurent la détection du goût, situés sur les antennes, les pièces buccales ou les pattes. Si on envoie simultanément une odeur, et qu'on laisse l'abeille se nourrir, on obtient ensuite une extension du proboscis lorsqu'on présente l'odeur seule. L'ensemble de la procédure ne prend que six secondes. Cette forme d'apprentissage est appelée conditionnement classique ou pavlovien. Ce conditionnement entre en jeu lorsque l'abeille se pose sur une fleur à la recherche de nourriture : dès que les récepteurs du goût situés sur les pattes ou les antennes entrent en contact avec le nectar, elle étend son proboscis pour prélever la nourriture. Ce faisant elle mémorise le parfum de la fleur, et elle utilise ce souvenir pour retrouver la fleur lors de visites ultérieures. Le conditionnement olfactif de l'abeille en conditions de laboratoire a permis de montrer que l'abeille pouvait apprendre une odeur en un seul essai où odeur et nourriture sont associées, et qu'elle pouvait mémoriser cette information toute sa vie. On sait aussi qu'elle peut apprendre successivement différentes odeurs, dès lors qu'elles sont associées à de la nourriture. Dans ce cas, elle cesse de répondre

aux odeurs apprises précédemment pour ne répondre qu'à la dernière odeur associée à de la nourriture, mais cela ne signifie pas pour autant qu'elle ait oublié les odeurs précédentes. En effet, si celles-ci sont à nouveau présentées avec de la nourriture, l'abeille les reconnaîtra beaucoup plus vite que lorsqu'elles ont été présentées la première fois. Ce type de comportement permet de comprendre que l'abeille visite une espèce florale tant qu'elle y trouve une nourriture satisfaisante, mais que dès que la ressource s'épuise, elle est capable de s'orienter très vite vers une nouvelle fleur en apprenant le nouveau parfum diffusé par celle-ci.

La procédure de conditionnement olfactif a permis de déterminer précisément les structures nerveuses impliquées dans la mémoire. Dans les minutes qui suivent l'apprentissage, on a appliqué des refroidissements de différentes zones du cerveau de l'abeille, et on a montré que la zone où se déroulait la mise en place de la mémoire se déplaçait à mesure qu'augmentait le temps écoulé depuis l'apprentissage. Dans les deux premières minutes, la mémorisation est perturbée si le refroidissement est appliqué au ■■■■

Réflexe conditionné d'extension de la langue chez l'abeille



¹ Directeur de recherche INRA, laboratoire de neurobiologie comparée des Invertébrés, INRA, Bures-sur-Yvette



niveau du lobe antennaire, partie du cerveau qui reçoit les informations venant de l'antenne stimulée par l'odeur. Puis, dans les deux minutes qui suivent, c'est le refroidissement d'une autre partie du cerveau, le lobe alpha des corps pédonculés qui se trouve du côté de l'antenne stimulée, qui affecte la mémorisation. Enfin, l'information est traitée dans une autre partie des corps pédonculés, le calice. A ce niveau, les deux côtés du cerveau sont sensibles au refroidissement, ce qui signifie qu'après quatre minutes, les deux antennes peuvent réagir à l'odeur de conditionnement et entraîner une réponse d'extension du proboscis. Six minutes après l'apprentissage, plus aucune structure du cerveau n'est sensible au refroidissement : la consolidation est achevée et l'information est stockée dans la mémoire à long terme.

La même procédure de conditionnement olfactif a également permis de comprendre comment l'abeille utilisait une odeur de fleur, qui est un mélange de plusieurs dizaines de produits. La composition de ce mélange varie selon les espèces florales, et pour une même espèce florale au cours de la floraison ou au cours de la journée. En conditionnant des abeilles avec un extrait de fleur contenant tous les composés, on leur propose ensuite les composés individuellement. Les composés auxquels elles répondent en étirant le proboscis peuvent être considérés comme représentatifs du mélange appris par l'abeille. Il apparaît que très peu de composés (environ 10 %) sont reconnus parmi ceux qui composent les mélanges floraux, et pourraient être considérés comme une sorte de signature de la fleur. Le fait de mémoriser un petit nombre de constituants caractéristiques du parfum de la fleur est un moyen économique pour identifier avec certitude la fleur sur laquelle l'abeille a trouvé de la nourriture. De plus, des composés qui varient en fonction de l'état de la plante pourraient renseigner l'abeille sur l'abondance du nectar associé à la présence de tel ou tel composé, et lui permettre de visiter la fleur au moment le plus favorable de la journée ou de la floraison. La prédominance des signaux odorants répond bien à la variabilité des fleurs dans la nature. En effet, l'odeur est un critère spécifique d'une grande fiabilité, alors que la couleur est beaucoup plus changeante d'une fleur à l'autre au sein d'une même espèce florale. De plus, la couleur peut changer en fonction de la lumière ambiante, du fond sur lequel la fleur se détache. Quant à la forme, non seulement il existe des variations naturelles d'une fleur à l'autre, mais la forme varie aussi en fonction de l'angle d'observation, de l'ouverture de la fleur et de son stade de floraison, et des dommages divers causés par le vent ou les herbivores ■

Les enjeux scientifiques et techniques de la gestion durable des écosystèmes forestiers¹

Par Yves Birot²

Les écosystèmes forestiers ont été, notamment en Europe, profondément influencés par l'homme à travers ses actes de gestion directe, ses modes d'occupation des sols et ses effets induits (pollution atmosphérique, changements climatiques). Ils restent toutefois moins artificialisés que nombre d'autres écosystèmes, à tel point qu'ils sont souvent même considérés comme des refuges ou réservoirs de naturalité. Les écosystèmes forestiers, qui couvrent 28 % des terres émergées de notre globe, contribuent par leurs échanges avec l'atmosphère (évapo-transpiration, photosynthèse, respiration) et par leurs sols (nutrition, altération) aux cycles biogéochimiques majeurs. Le rôle des écosystèmes forestiers à l'interface lithosphère-atmosphère est donc crucial car il intervient dans l'évolution du système terre : cycle du carbone, de l'eau, de l'azote. En retour, les écosystèmes forestiers subissent les changements de leur environnement local ou planétaire, qui peuvent affecter leur stabilité. Les écosystèmes forestiers constituent enfin l'habitat naturel d'une fraction très importante de la diversité biologique (flore, faune, vertébrés et invertébrés, insectes et micro-organismes). Ces écosystèmes ont aussi vocation à procurer aux sociétés de manière durable, c'est-à-dire sur une échelle de plusieurs siècles, des ressources, biens et services de nature variée. La production ligneuse (et son

utilisation sous forme de matériau, matière première, énergie) est bien sûr la plus connue mais ce n'est pas la seule, même si jusqu'à aujourd'hui, ses recettes ont payé pour assurer la fourniture des autres biens et services.

Gérer rationnellement ces écosystèmes sur le long terme nécessite de disposer d'une base de connaissances large, couvrant des domaines très variés, très au-delà des seules sciences forestières classiques : écologie, biologie des populations, génétique, physiologie, biologie intégrative, science du sol, géographie, climatologie, biométrie, modélisation, économie, sciences sociales, etc. Ces connaissances doivent être organisées et reliées entre elles, pour pouvoir être ensuite valorisées au niveau de la gestion. Il paraît aujourd'hui tout à fait important de se placer au croisement de domaines liés à la diversité biologique (du gène aux communautés) et au fonctionnement à une échelle plus macroscopique décrit par des modèles plus physico-chimiques. Il s'agit là d'un enjeu tout à fait majeur pour la compréhension du fonctionnement des écosystèmes forestiers dans une vision plus intégratrice. L'objectif est de coupler les connaissances biologiques associées à la diversité, avec une approche plus fonctionnelle, fondée sur des modèles simples liés aux cycles de matière et d'énergie entre biosphère et atmosphère.

C'est pour cette raison que cette séance conjointe a été concentrée sur la connaissance de la diversité et du fonctionnement des écosystèmes forestiers comme fondement de leur gestion durable. Les exposés ont illustré : 1) l'importance de la connaissance de la diversité biologique, du gène aux communautés, dans ses aspects spatiaux et temporels par Antoine Kremer³, 2) le problème des interactions entre forêts et milieu physique pour l'eau, objet d'échange entre forêt et atmosphère, à des niveaux allant de la feuille au continent, et ressource susceptible d'être affectée par les forêts et leur gestion par Serge Rambal⁴ et Vazken Andréassian⁵, 3) le fonctionnement des sols forestiers dans leurs aspects physiques : cycles biogéochimiques et biologiques : écologie de la rhizosphère par Jacques Ranger et Francis Martin⁶. Les conclusions ont été tirées par Henri Décamps⁷ : gérer durablement les écosystèmes forestiers requiert la maîtrise de processus qui relèvent de multiples échelles d'espace (et de temps). Ceci soulève la question de la connexion de ces échelles entre elles. L'échelle du paysage apparaît aussi, et de plus en plus, comme une échelle à privilégier, impliquant l'adoption d'une gestion véritablement évolutive. A son tour, celle-ci nécessitera la création des conditions de l'adhésion sociale. Enfin, le choix de l'échelle du paysage fait émerger de nouveaux besoins en termes de système d'information forestière⁸ ■

¹ Lors de la Séance commune Académie des sciences et Académie d'agriculture de France qui s'est tenue le 13 novembre 2002 à l'Académie d'agriculture de France

² Membre Correspondant de l'Académie d'agriculture de France, chargé de mission auprès de la direction du département forêts et milieux naturels de l'INRA

³ Directeur de recherche INRA, unité de recherches forestières, Cestas

⁴ Ingénieur de recherche CNRS, centre d'écologie fonctionnelle et évolutive, Montpellier

⁵ Ingénieur au Cemagref, Antony

⁶ Directeurs de recherche INRA, Nancy

⁷ Correspondant de l'Académie des sciences et de l'Académie d'agriculture de France, président du GIP ECOFOR

⁸ Les résumés sont consultables sur le site de l'Académie des sciences

Aimants et supracon- ducteurs : un nouveau champ d'action pour la chimie supra moléculaire

Par Peter Day¹

Les vingt dernières années ont vu une croissance remarquable de l'influence apportée par la chimie dans quelques domaines qui étaient traditionnellement ceux de la physique à l'état solide. En particulier des propriétés électroniques collectives comme le ferromagnétisme et la supraconductivité ont été observées dans une grande variété de composés moléculaires organiques et métal-organiques, et de nombreux phénomènes nouveaux ou inattendus ont été mis en évidence (ferromagnétisme d'électrons de type-p, supraconducteurs de basse dimension, transitions spin-Peierls etc...). Pour le chimiste entrant dans ce territoire, la préoccupation principale est surtout d'essayer de faire la liaison entre les propriétés et la structure cristalline (disposition spatiale des molécules) et plus de comprendre les influences qui déterminent cette disposition. Cet exposé utilisera des exemples nombreux, choisis pour la plupart parmi nos travaux, pour illustrer l'extrême sensibilité de ces propriétés collectives aux plus minimes modifications chimiques. Entre autres thèmes, sera abordée l'influence de faibles liaisons intermoléculaires sur l'échange magnétique et celle de molécules-hôtes sur la supraconductivité. Ceci annonce l'ouverture de nouveaux défis pour la chimie supramoléculaire² ■

¹ Professeur au Davy Faraday Research Laboratory, The Royal Institution of Great Britain

² Lors de la Conférence Humphry Davy, organisée dans le cadre d'échanges entre la Royal Society et l'Académie des sciences, le 19 novembre 2002

Les plantes génétiquement modifiées

Par Jean-Yves Chapron²

Pour accomplir la mission qui lui a été confiée le 15 juillet 1998 par le Comité interministériel de la recherche scientifique et technique, l'Académie des sciences produit, selon un rythme bienal, une série de rapports sur l'état de la science et de la technologie en France (RST).

C'est dans ce cadre que l'Académie présente un ouvrage de synthèse et de propositions sur la question des plantes génétiquement modifiées.

La responsabilité de cette étude a été confiée au professeur Roland Douce, qui avait coordonné le rapport "Le monde végétal, du génome à la plante entière" (RST 10, octobre 2000) et qui s'est entouré ici d'un groupe composé de membres de l'Académie et de spécialistes issus des grands organismes de recherche compétents sur cette question.

Le groupe de travail a centré sa réflexion sur le rôle de la recherche fondamentale, sur les apports de la transgénèse végétale à l'agriculture, sur les risques et la réglementation, sur les perspectives offertes aux pays en développement et sur les levures transgéniques, en tant qu'outils pour l'agroalimentaire, l'industrie chimique et la pharmacie. L'ouvrage comporte également un chapitre destiné à expliciter les notions scientifiques de base en la matière.

¹ RST 13, décembre 2002

Éditions Tec & Doc,
14 rue de Provigny 94236 Cachan Cedex,
<http://www.Lavoisier.fr>

² Chargé de mission à l'Académie des sciences

Pour répondre aux problèmes émergents — augmentation prévisible de la population, réduction des terres arables, satisfaction des besoins alimentaires des pays les plus déshérités — l'agriculture devra évoluer tout en préservant impérativement l'environnement : des pratiques polluantes devront être abandonnées et des ruptures techniques deviendront nécessaires.

L'un des moyens, mais ce n'est pas le seul, est l'utilisation de plantes génétiquement modifiées par l'insertion d'un ou plusieurs gènes qui confèrent à ces dernières un trait particulier présentant une très haute valeur ajoutée pour l'agriculture et l'environnement.

Cette recherche de nouvelles méthodes a abouti au cours des années 1980 à l'élaboration des techniques de transgénèse végétale et, plus récemment, à la culture de variétés transgéniques.

Si les outils de la transgénèse permettent déjà d'optimiser les pratiques culturales, ils permettent également de produire des protéines d'intérêt thérapeutique (anticorps, vaccins, produits dérivés du sang, etc.) ou industriel (matières plastiques biodégradables, biocarburants, etc.). Ces outils ont également permis de faire progresser de façon spectaculaire nos connaissances sur le fonctionnement et le développement des végétaux.

Il reste que l'utilisation des OGM soulève des questions d'ordre scientifique — effets liés à la position du transgène dans le génome, transfert du transgène d'une plante à l'autre, effets toxiques ou allergiques liés à l'apparition d'une protéine nouvelle, impact sur la biodiversité, etc. — mais également d'ordre sociologique — expression emblématique d'une certaine façon de pratiquer

l'agriculture, mise en concurrence sauvage d'agricultures totalement différentes, contrôle de l'agriculture mondiale par les grands groupes multinationaux de l'agroalimentaire, etc. La non-maîtrise des réponses à ces questions conduit à une forme de violence se traduisant par un refus des technologies modernes.

Pour éviter que la désinformation ne prenne le pas sur l'argumentation, le débat public autour des plantes génétiquement modifiées doit être considéré comme porteur de questions de fond sur la gestion de cette innovation, questions auxquelles le scientifique devra clairement répondre : c'est l'objectif de cet ouvrage, qui est destiné aux pouvoirs publics, aux décideurs et d'une façon générale à toute personne s'intéressant à la question des organismes génétiquement modifiés ■

La science au sommet de Johannesburg

Par Yves Quéré¹

Le sommet de Johannesburg (WSSD: *World Summit on Sustainable Development*) s'est tenu du 26 août au 4 septembre, regroupant les représentants de près de 200 pays et des dizaines de milliers de personnes représentant Associations, Groupements, ONG... Comme il est normal, il a satisfait les uns, déçu les autres. On ne s'intéressera, dans ce qui suit, qu'à la place qu'y a tenue la Science.

Ici également, satisfaction et déception.

Satisfaction pour la référence qui est faite à la Science et à la Technologie (S & T) au plus haut niveau. Le Secrétaire général de l'ONU les mentionne régulièrement comme facteurs décisifs du développement et de la lutte contre les fléaux naturels et contre la pauvreté. C'est ainsi qu'il a accepté la proposition que se tienne, avant la réunion au sommet des 2, 3 et 4 septembre, un Forum scientifique dont l'organisation a été confiée à l'ICSU, à la WFEO (World Federation of Engineering Organizations) et à la TWAS (Third World Academy of Sciences). Ce forum a regroupé plusieurs sessions, ateliers... dont un Symposium de l'IAP (Inter Academy Panel) de deux demi-journées (dont le thème était: "Science Academies: a tool for sustainable Development"), et qui, pour l'essentiel a été organisé à l'Académie des sciences, par la DRI.

Mais aussi déception face à l'extraordinaire inattention que portent, à la Science, la plupart des délégués présents aux débats. Un exemple très significatif (car reproduit en d'autres circonstances) en donnera l'idée. Diverses sessions plénières, regroupant, devant une audience d'un millier de personnes, 190 délégations nationales, une quinzaine de représentants des "parties prenantes" (stakeholders) – entreprises, agriculteurs, femmes, collectivités locales, ONG, monde autochtone, jeunesse, S & T – ainsi que quelques orateurs, traitaient, durant trois heures, d'un thème comme "Santé", "Agriculture"... Représentant les S & T, je participai ainsi à la Session "Énergie". Il me vint à l'idée, au début, de noter au fur et à mesure des discours, interventions (une soixantaine au total) le nombre de fois que seraient cités les mots de Science et de Technologie (ou tout mot qui en dérivât). Compte non tenu de ma propre intervention (qui ne devait pas excéder 3 minutes), le résultat du comptage fut éloquent: 0 pour Science et 1 (d'un Ministre africain) pour Technologie. S'agissant donc d'un débat sur l'énergie, dont on a quelque mal à ne pas voir le rapport intime qu'elle entretient avec les S & T, ces mots, et bien sûr ce qu'ils recouvrent, étaient totalement absents.

Pendant un peu plus de trois heures, il ne fut question que de financements, de prêts, d'énergies "propres", d'énergies "renouvelables", de la nécessité que ces dernières représentent 10 % de l'ensemble mondial en 2010 (sans un mot sur le pourquoi du 10 % plutôt que d'un 15 % ou d'un 5 %), de gaspillages et d'économies, de subventions, de partenariats, de mises en réseau, etc.; tous discours éminemment sympathiques, mais ignorant strictement la nécessité, en amont, d'une recherche théorique, expérimentale, appliquée, industrielle...

sans laquelle ils ne sont à coup sûr que paroles abstraites et, bien souvent, incantatoires.

Il resterait à analyser si ce silence sur les S & T résulte d'une sorte de foi du charbonnier dans la capacité qu'elles auraient de résoudre instantanément tous les problèmes techniques, à ce point qu'il est inutile d'en parler; ou s'il est le signe d'un rejet d'une science associée plus aux méfaits qu'on lui attribue qu'aux bénéfices qu'on en retire; ou plus probablement s'il révèle une profonde ignorance de la taille de ces problèmes et de la nécessité d'un rigoureux effort de recherche pour, peu à peu, en venir à bout.

Quelle qu'en soit la raison, ce silence est frappant. C'est à coup sûr un des rôles des Académies des sciences, de par le monde, que de ré-occuper une partie du terrain ainsi vacant et d'affirmer, face aux opinions publiques et, lorsque cela est nécessaire, face aux pouvoirs politiques, qu'il n'y aura pas de développement des pays pauvres, et encore moins de durabilité de ce développement sans que la recherche scientifique dans ses diverses composantes, en devienne une partie prenante majeure, et qu'elle soit stimulée en ce sens ■

27^{ème} Assemblée générale de l'ICSU à Rio

Par François Gros¹

La 27^{ème} Assemblée générale de l'ICSU a rassemblé du 24 au 28 septembre 2002, comme les fois précédentes, de nombreux représentants des diverses Unions scientifiques, Comités interdisciplinaires et des Académies des sciences. Elle a donné lieu à de nombreuses séances (colloques, tables rondes) consacrées aux thèmes s'inscrivant dans les grandes priorités de l'ICSU (environnement et développement durable; dissémination de l'information scientifique et technique; capacité d'impulser la Science, notamment dans les pays en développement; éducation; etc.). L'action de notre Académie (COFUSI) a été exposée en séance plénière et le projet qu'elle avait élaboré de concert avec le Conseil scientifique du Japon (JSC), sur le thème "Énergie et Société" a été adopté avec enthousiasme et fera l'objet d'un nouveau programme de l'ICSU. L'Assemblée a procédé aux élections des membres de son nouveau Bureau exécutif où figurent deux scientifiques français (Marie-Lise Chanin et Michel Denis). La présidence de l'ICSU est désormais assurée par le Docteur Jane Lubchenko (spécialiste américaine des écosystèmes) en remplacement du Professeur Yoshikawa dont le mandat venait à expiration.

La politique générale de l'ICSU s'oriente vers des évaluations plus approfondies et plus rapprochées des Comités interdisciplinaires dont les activités de certains n'ont pas été reconduites (COSTED, CSFS, SCOWAR, ACOGEB) mais seront reprises sous d'autres formes. En outre, le Comité de Planification et d'Évaluation (CSPR) est chargé d'étudier des modalités nouvelles pour aider au fonctionnement des Unions, élargir leur consultation et leur faire jouer un rôle plus important dans les propositions d'actions et le choix des thèmes liés aux domaines émergents ■

¹ Membre de l'Académie des sciences

¹ Secrétaire perpétuel honoraire de l'Académie des sciences, professeur honoraire au Collège de France

Laurent Schwartz

Ancien élève de l'École normale supérieure, le mathématicien Laurent Schwartz, premier Français à avoir obtenu la prestigieuse médaille Fields, a apporté une contribution fondamentale dans plusieurs domaines mathématiques, notamment en établissant la célèbre théorie des distributions. Mais Laurent Schwartz ne s'est pas contenté d'être cet exceptionnel scientifique, il a également pris une part majeure dans la défense des droits de l'homme ainsi que dans la réforme des universités et des grandes écoles.

Né en 1915, il a profondément influencé les mathématiques du XX^{ème} siècle par l'invention de la théorie des distributions (1944). En généralisant la notion classique de fonctions, il a formulé clairement et mis au point un concept nouveau permettant d'utiliser la dérivation et la transformation de Fourier dans des situations inaccessibles au calcul différentiel de Newton et Leibniz. La pureté, la simplicité et la généralité étonnantes de ses idées nouvelles leur ont assuré une fécondité incomparable. La théorie des distributions pour laquelle il a reçu la médaille Fields en 1950 des mains d'Harold Bohr est devenue un outil essentiel dans des domaines aussi variés que la théorie des équations aux dérivées partielles – où ses élèves J.-L. Lions et B. Malgrange ainsi que L. Hörmander l'ont merveilleusement illustrée – en physique et en particulier dans la théorie des champs quantiques où elle joue un rôle essentiel, en géométrie différentielle et dans la théorie des représentations des groupes, et même en théorie des nombres où joue un rôle clef l'analogue de l'espace de Schwartz dû à F. Bruhat, un autre de ses élèves. La découverte en mathématique d'un concept nouveau alliant à ce point simplicité, ubiquité et fécondité est un phénomène rare qui donne à l'œuvre mathématique de Laurent Schwartz un éclat difficile à égaler.

Son œuvre, son talent légendaire de conférencier et d'enseignant, son engagement incessant pour la qualité de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique, font de Laurent Schwartz l'un des plus grands mathématiciens de son époque. Il restera un modèle pour nous tous ■

A. C.

L'histoire des êtres vivants revisitée : la contribution d'André Adoutte (1947-2002)

"Evolution is the single most important theme in biology. It can be studied at several levels, using a variety of methodologies. But evolution is primarily the evolution of genomes".

Ainsi s'exprimait notre confrère André Adoutte, professeur de génétique à l'université d'Orsay et directeur du CGM, dans un article introductif à un numéro consacré à *"Genomes and Evolution"*¹.

Il ajoutait plus loin que l'évolution biologique est aussi l'évolution du développement et des stratégies du développement. En effet soulignait-il *"aucun génome ne peut être transmis durablement si l'organisme correspondant n'est pas capable de passer par le goulot d'étranglement que constitue l'embryogenèse"*. A l'époque *"du post-génome"*, de nouveaux moyens sont disponibles pour tenter de reconstituer l'histoire de la vie. Évolution et développement, si étroitement associés à la fin du XIX^{ème} siècle par l'anatomiste allemand Ernst Haeckel pour qui *"l'ontogenèse récapitule la phylogenèse"*, se trouvent à nouveau réunis dans une démarche de recherche dite: EVO-DEVO. André Adoutte n'est pas pour rien dans la réémergence de cette discipline.

Après avoir fait ses premières armes en génétique mitochondriale de la levure, inspiré qu'il était par la découverte des premiers marqueurs génétiques des mitochondries par l'équipe de Piotr Slonimski, il décida de s'attaquer à un organisme plus complexe, la Paramécie. Comme l'avait montré Janine Beisson auprès de qui il a effectué ses premiers travaux, ce Cilié, bien qu'unicellulaire, est le site de processus morphogénétiques, liés à l'organisation des rangées ciliaires, qui sont étonnamment complexes. Les travaux d'André Adoutte ont clairement montré que leur dynamique obéit aux mêmes lois que celle qui est à l'œuvre dans la morphogenèse des métazoaires. On y retrouve: centre

organisateur, vagues morphogénétiques, territoires présomptifs et gradients.

Ainsi André Adoutte se préparait-il à aborder la 3^{ème} partie de sa carrière de chercheur, dramatiquement écourtée par sa mort subite à l'âge de 55 ans, le 19 mars de cette année. Elle devait en effet être consacrée à des recherches sur l'évolution basées sur l'étude de "gènes du développement".

Les débuts de la phylogénie moléculaire (que l'on peut situer à l'article de Field et al. en 1988)² s'appuyaient sur la comparaison de la séquence de gènes communs à toutes les cellules comme ceux qui codent l'ARN ribosomique.

Ces travaux pionniers avaient fait entrevoir la puissance euristique de cette nouvelle méthode. Alors qu'ils confirmaient la composition du groupe des Deuterostomes* (auxquels appartiennent les Chordés et les Echinodermes), ils jetaient un doute sur le reste de la classification des métazoaires notamment celle des Protostomes* qui avait prévalu pendant tout le XX^{ème} siècle et qui reposait sur des critères morphologiques.

Les recherches menées par André Adoutte et ses collaborateurs ont apporté des clarifications au problème de la parenté des espèces et permis de proposer une nouvelle phylogénie qui présente une cohérence largement reconnue. Les gènes étudiés par A. Adoutte, appelés gènes *Hox* car ils possèdent une séquence de 180 bases (ou homeobox) codant pour un homéodomaine de 60 acides aminés qui, se liant au promoteur d'autres gènes, en règle le fonctionnement. Par ce contrôle qu'ils exercent sur l'activité d'autres gènes, les gènes *Hox* jouent un rôle déterminant dans la mise en place du plan d'organisation du corps au cours de l'embryogenèse. Ils ont été extraordinairement conservés au cours de l'évolution. André Adoutte a montré qu'ils existent chez tous les organismes à symétrie bilatérale (les Bilateria) c'est-à-dire chez tous les animaux (à l'exception des plus simples d'entre eux, les éponges et les

Cnidaires). Ainsi, la régulation d'un des processus fondamentaux de l'embryogenèse semble avoir été *"inventé"* une seule et unique fois au cours de l'histoire de la vie. La comparaison des séquences de l'homeobox et des régions flanquantes de l'ADN chez tous ces organismes a permis de classer les Bilateria en trois grands groupes, les Deuterostomes (auxquels nous appartenons) et les Protostomes et à supprimer des phyla *"intermédiaires"* comprenant des formes dont la position dans l'arbre phylogénétique avait de longue date suscité des incertitudes (Figure 1).

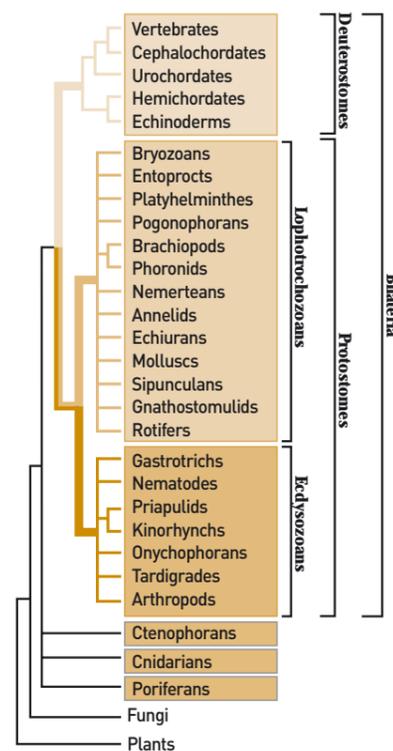


Figure 1 : La nouvelle phylogénie PNAS, 25 avril 2000, vol. 97 N°9

On assiste ainsi à la renaissance de la zoologie et on réécrit l'histoire des espèces. Tous les Bilateria semblent bien dériver d'un unique ancêtre commun, baptisé Urbilateria dont l'organisation était déjà fort élaborée. De plus, la topologie de l'arbre phylogénétique, tel qu'il se présente aujourd'hui, suggère une nouvelle interprétation de la fameuse explosion cambrienne. Au lieu d'une seule grande radiation, il y en a sans doute eu au moins trois, correspondant à la diversification des Lophotrochozoaires, des Ecdysozoaires et des Deutérostomes, à partir d'un lignage commun probablement peu diversifié. Ces *"révolutions génétiques"* et notamment la séparation entre Protostomes et Deutérostomes se sont donc produites avant le Cambrien suggérant une longue histoire antécambrienne des métazoaires restée jusque là insoupçonnée ■

N. L. D.



la lettre de l'Académie des Sciences n° 6 / hiver 2002

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
Direction artistique
Nicolas Guilbert

Photographies :
p.p. 1, 3, 4, 10, 12, 20 photos N. Guilbert
pp. 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 15, 16 (DR).

Comité de rédaction :
Jean-François Bach, Roger Balian, Jack Blachère, Édouard Brézin, Pierre Buser, Paul Caro, Jules Hoffmann, Alain Pompidou, Pierre Potier, Éric Spitz, Jean-Christophe Yoccoz

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