

Demain, la physique par Édouard Brézin

Conférence présentée le 4 octobre 2007 à Paris et le 4 juin 2008 à Strasbourg, dans le cadre des conférences scientifiques de l'Association des anciens et amis du CNRS



Édouard Brézin
Président
du Conseil
d'administration
du CNRS (1992-
2000), Président
de l'Académie des
sciences (2005-2006)

Présentation

Édouard Brézin a su, au cours de toute sa carrière, très harmonieusement allier une activité d'enseignant et de chercheur, d'une part, et d'autre part il a assumé des responsabilités importantes dans beaucoup de grands organismes et d'académies.

Son champ de recherche et d'enseignement, c'est la physique théorique, et en particulier la physique quantique et la physique statistique.

Il est d'abord ancien élève de l'École polytechnique. Docteur ès sciences, il a fait de la recherche au CEA dans le domaine de la physique théorique, puis il est devenu enseignant et désormais Professeur émérite à l'Université Pierre et Marie Curie. Il a enseigné au laboratoire de physique théorique de l'École normale supérieure, également à l'École polytechnique et il est membre de l'Institut universitaire de France. Il a enseigné à l'étranger aussi ; je vous cite ces hauts lieux du monde de l'université et de la science : à Princeton, Harvard, Oxford, à Kyoto, à Amsterdam. Vous le constatez donc, une carrière internationale très importante.

Cela lui vaut aussi d'être également, je m'empresse de l'ajouter ici, Président de la Fondation

Kastler, qui a pour vocation d'accueillir les chercheurs étrangers en France. Cela est très heureux pour nous, étant donné la volonté que nous avons de développer les liens avec la science à l'étranger : notre association travaille étroitement avec la Fondation Kastler pour nous efforcer de maintenir ou d'établir des contacts avec tous ces chercheurs à l'étranger qui ont travaillé dans nos laboratoires, avec nous.

Parmi les responsabilités qu'il a exercées, à côté de cette carrière d'enseignant et de chercheur, je note la Direction du Département de physique de l'École normale supérieure, la présidence du Conseil d'administration de notre maison de 1992 à 2000, la présidence du Conseil scientifique d'EDF de 1995 à 2001, l'appartenance au Conseil scientifique de l'*International Centre for Theoretical Physics* de Trieste, la présidence de la société française de physique et la présidence de l'Académie des sciences en 2005 et 2006.

C'est à ce titre d'ailleurs qu'il a eu un rôle éminent dans tout le grand débat qui a eu lieu à cette époque sur la recherche scientifique en France.

Tout ceci a valu à Édouard Brézin de nombreux prix : le Prix Langevin de la Société française de physique, le Prix Ampère de l'Académie des sciences, le Prix franco-allemand Gentler-Kastler, le prix des Trois physiciens déportés, la *President's Medal de l'Institute of Physics*. Il est membre de l'Académie des sciences depuis 1991, de l'*American Academy of Arts and Sciences* depuis 2002, de la *National Academy of*

Sciences des Etats-Unis depuis 2003, de l'*Academia Europaea* depuis 2003 et de la *Royal Society* britannique depuis 2005.

E.A.L.

Édouard Brézin

La science, contrairement à ce que pensent certains, n'est pas simplement un instrument pour fabriquer de la technologie. Elle modifie complètement notre façon de regarder le monde, d'appréhender notre place dans l'univers, notre destin.

Pour cette raison, et aussi évidemment parce qu'elles modifient la vie pratique de tous les jours, je vais essayer de vous convaincre que les avancées conceptuelles de la science ne sont pas destinées aux seuls scientifiques, mais qu'elles concernent tout le monde.

La science nous a révélé que nous sommes **plongés dans une histoire** : cette grande découverte de toutes les disciplines scientifiques a entraîné invariablement une résistance de l'opinion à chaque étape de son élaboration.

J'illustrerai ce premier thème avec trois exemples. Les exemples que je veux évoquer se sont heurtés à un refus de leur dimension historique, puisqu'il s'agit du vivant, de notre planète et de l'univers dans son ensemble.

Cela commence avec Darwin, qui comprend que le vivant n'est pas né tel que nous le voyons, qu'il a une histoire et que son évolution se poursuit. Nous connaissons toutes les oppositions qu'a connues et que continue de

connaître la théorie de l'évolution. C'est peut-être un peu moins en débat chez nous, mais pas complètement ; il n'y a pas qu'aux Etats-Unis que sévit le créationnisme, ou sa version moderne et hypocrite de la même chose, qui s'appelle le dessein intelligent (*Intelligent Design*). C'est ainsi que nos laboratoires et établissements d'enseignement ont reçu un luxueux ouvrage créationniste publié par une association turque qui dispose visiblement de beaucoup d'argent.

De même, Wegener s'est heurté à une vive opposition lorsque, analysant les complémentarités topographiques de l'Afrique et de l'Amérique du sud, de part et d'autre de l'Atlantique, il a conclu à la dérive des continents et suggéré ainsi que la morphologie de notre planète avait une histoire. Les calculs immédiatement faits par les géologues de l'époque ont conclu que l'hypothèse de Wegener ne pouvait pas fonctionner. Mais il y a maintenant une quarantaine d'années que, grâce à la tectonique des plaques, nous savons que notre planète a une histoire, que les continents ont été assemblés dans une Pangée unique il y a quelques centaines de millions d'années. Et cela se reproduira peut-être, dans ces mêmes échelles de temps : il est clair que 200 millions d'années ne représentent même pas 5% des 4,5 milliards d'années, âge de la Terre fixé par la géochimie isotopique moderne.

La chose s'est répétée encore une fois à propos de l'Univers dans son ensemble, dans une histoire qui associe Einstein et Hubble. Année 1905 : Einstein, après la

théorie de la relativité, se rend compte que la théorie de la gravitation de Newton est à refaire.

En effet, dans la théorie classique, deux corps massifs interagissent instantanément l'un sur l'autre, malgré leur distance. Autrement dit, selon Newton, si on imagine qu'un levier d'Archimède puisse faire bouger un corps céleste, cela aurait immédiatement une influence à distance. Or, la théorie de la relativité restreinte nous apprend qu'une influence ne peut pas se propager plus vite que la lumière : il y a une contradiction entre cette théorie et celle de Newton. Einstein travailla dur entre 1905 et 1916 pour bâtir une nouvelle théorie de la gravitation, celle que l'on appelle la relativité générale. Le résultat est magnifique et immédiatement Einstein chercha une solution au problème des masses dans l'univers, qui interagissent, selon sa nouvelle théorie, en déformant l'espace-temps. Mais il cherche une solution à un univers statique, c'est-à-dire qui a toujours été là et qui le sera toujours. Bien que ses idées aient souvent été révolutionnaires, il n'a en effet pas de raison de douter que l'Univers est immuable. Comme il est un bon mathématicien, Einstein se convainc qu'il n'y a pas de solution statique. Il est très ennuyé et il modifie sa théorie, il ajoute un paramètre, grâce auquel il peut y avoir une solution statique. Il a introduit à cet effet une curieuse force supplémentaire, que l'on appelle la constante cosmologique, qui pose beaucoup de problèmes à nos jours.

Einstein a donc modifié sa théorie pour être certain que l'univers a toujours été là et sera toujours là.

C'est en 1921 que l'astronome américain Edwin Hubble découvre, non seulement qu'il existe d'autres galaxies que la nôtre (notre galaxie, c'est la Voie lactée), mais que nous existons quelque part sur un bras d'une galaxie comme il y en a des millions dans l'univers. Chacune est composée de quelques milliards d'étoiles. Ce que découvre également Hubble, c'est que tout ceci n'a rien de statique, que ces galaxies s'éloignent de nous à des vitesses d'autant plus grandes qu'elles sont plus éloignées.

C'est donc la découverte de l'expansion de l'univers ; l'univers n'est pas du tout statique !

Alors Einstein, qui regrette d'avoir modifié sa théorie initiale en ajoutant cette constante cosmologique, se frappe le front : «C'est la plus grande bêtise que j'aie jamais faite». Il comprend enfin qu'il avait pré-supposé, sans même s'interroger, que l'Univers était immuable. (En réalité, il semble bien, de nos jours, que cette constante cosmologique est bien nécessaire car l'expansion... s'accélère ! Mais cela c'est une autre histoire).

On pourrait prétendre que tout cela n'intéresse que les scientifiques, mais je n'en crois rien. Il suffit de se souvenir que les doctrines religieuses commencent toutes par un discours sur le vivant, la terre, l'univers. Que ce discours soit totalement erroné, c'est leur problème, pas le mien ! Mais cela prouve bien que cette historicité révélée par les découvertes de la science n'est pas indifférente et ne concerne pas que le physicien, le biologiste ou le géologue, mais s'adresse à tout un chacun.

Le deuxième thème que je voudrais aborder concerne la démarche scientifique : **l'interaction entre la connaissance et le développement technologique**. On peut résumer ce que je veux dire par un slogan simple : « l'électricité n'a pas été découverte en cherchant à améliorer les bougies ».

Les exemples pour l'illustrer sont légion.

Prenez la célèbre photo de la main de Madame Röntgen, la première radiographie jamais réalisée (fig.1). Cette photographie va circuler dans le monde entier et valoir six ans plus tard à Röntgen le premier Prix Nobel de physique.



Figure 1 : la main de Madame Röntgen

Bien évidemment, Röntgen ne s'était pas dit : « Je vais faire un microscope pour parvenir à voir dans le corps. » La découverte

des rayons X suivait l'étude d'une décharge électrique dans des gaz raréfiés ; et rien ne permettait d'entrevoir toutes les applications que nous avons aujourd'hui des rayons X.

L'avancée des sciences suit donc une route chaotique, pleine d'imprévus, mais qui, en définitive, lui donne toute sa force. En d'autres termes, je suis ici prétendant parler de « Demain la physique », alors qu'il est **impossible de savoir où va la science**. Si on le savait, ce ne serait sans doute pas de la science ! Lavoisier déjà avait dit : « Les découvertes ne se prévoient pas ». Je n'ai jamais vu dans aucun rapport de prospective les découvertes qui allaient apparaître dans l'année qui a suivi ce rapport. C'est l'évidence ! Il faut donc se contenter de donner aux « esprits préparés » les conditions de travail qui leur permettront de réaliser éventuellement ce qu'ils ont en eux, mais on ne peut sûrement pas programmer des découvertes.

Prenons un autre exemple plus contemporain. Nous ne sommes pas toujours conscients des découvertes scientifiques qui « entrent » dans les technologies même les plus courantes comme le téléphone portable, les ordinateurs, etc. Tout le monde connaît aujourd'hui le GPS, le *Global Positioning System*, qui permet de se repérer avec précision sur la planète. Ce système est aujourd'hui très courant dans les automobiles ; beaucoup ont admiré sur Internet, à travers Google Earth, les merveilles de ce GPS.

Or, le GPS, ce sont 24 satellites qui orbitent dans des orbites à peu près circulaires, à 20 000 kilo-

mètres de nous. A tout instant, tout point de la surface du globe est visible par au moins quatre satellites. En réalité, la mesure de position effectuée par le **GPS passe par une mesure de temps**. Le GPS envoie un signal, et mesure le temps qu'il a fallu pour que le signal émis atteigne le point visé.

C'est donc une mesure de temps, du temps de propagation d'un signal électromagnétique. Ces signaux se propagent à la vitesse de la lumière : ils parcourent 300 mètres en une microseconde (c'est-à-dire un millionième de seconde), ce qui est déjà bien plus précis que nos belles horloges à quartz. Mais une erreur d'un millionième de seconde, c'est une erreur de 300 mètres et une telle imprécision rendrait le GPS sans intérêt ! Donc il faut des précisions dans la mesure du temps qui soient très supérieures à la microseconde. Pour cela, les laboratoires ont inventé et n'ont cessé de perfectionner des horloges atomiques. On a installé dans les satellites ces horloges atomiques.

Une horloge atomique, c'est une horloge dans laquelle il y a des atomes dans des états excités. L'horloge la plus fréquente repose sur du Cs 133 ; à la transition entre deux niveaux hyperfins du césium est associée l'émission d'un rayonnement de fréquence très précisément déterminée¹. La précision actuelle des horloges atomiques atteinte en laboratoire est bien supérieure à celle des horloges atomiques que l'on a envoyées dans ces satellites, grâce aux techniques modernes d'atomes froids : on atteint aujourd'hui des précisions

extraordinaires de l'ordre d'une seconde en 50 millions d'années!

En tout cas, une précision de « dix moins dix », c'est-à-dire d'un dix-milliardième d'erreur, cela signifie une précision d'un centimètre dans la mesure de position : ce qui est bien ce dont on a besoin, effectivement, pour que le GPS soit intéressant. Ce système est remarquable : avec *Google Earth* (ce qui n'est pas évidemment le plus précis ; je suis sûr que l'Armée américaine a des outils plus précis... !), je peux voir la marque de la voiture qui est stationnée devant mon immeuble ! Mais ces satellites bougent, ils se déplacent par rapport à nous... Einstein, en 1905, découvre la relativité du temps: le temps n'est pas le même pour deux observateurs en mouvement relatif. Autrement dit, le temps mesuré par ces satellites en mouvement n'est pas le même que le temps sur Terre, quel que soit le mode d'horloge que l'on choisit. Toutes les horloges embarquées, atomiques ou pas, nous « semblent » plus lentes : c'est l'effet de relativité restreinte. Et si on fait un calcul, simple d'ailleurs, on constate que l'effet est un retard de 7 microsecondes par jour, dû au fait que le satellite se déplace.

Puis Einstein, en 1916, présente sa nouvelle théorie de la relativité ; **les masses changent l'espace et le temps, elles les courbent**. Le temps est donc influencé par la gravité. Toute horloge éloignée de nous subit la gravitation de la Terre, mais de manière moins intense qu'au sol, puisqu'elle est éloignée de 20 000 kilomètres. A cette altitude du satellite, la diminution du champ de gravitation se traduit par une avance de 45 microsecondes par jour, par rap-

port à nous : c'est l'effet de relativité générale. Les deux effets se conjuguent, mais sont de signes opposés : 45 moins 7, cela fait 38 microsecondes de différence par jour.

Pour la lumière, cela se traduit par un trajet de plus de 10 kilomètres ! Autrement dit, si nous n'avions pas eu les travaux d'Einstein et de ses successeurs sur la relativité du temps, le GPS serait totalement inutilisable.

Quel qu'ait été le génie visionnaire d'Einstein, il est clair que rien ne lui permettait d'entrevoir une application comme le GPS. A son époque, les vérifications expérimentales de ses idées étaient rares et difficiles et, pendant longtemps, la relativité générale apparaissait comme une discipline conceptuelle qu'il n'était pas nécessaire d'enseigner. Eh bien, aujourd'hui, la relativité générale est à l'œuvre dans des millions de voitures !

Abordons les « questions ouvertes » de la physique. Il me semble intéressant d'établir une brève liste de questions ouvertes ; certes pas un catalogue exhaustif, mais quelques exemples. Voyez le numéro du 125^e anniversaire de la revue américaine « Science », la revue éditée par *l'American Association for the Advancement of Science*. Cet excellent journal publiait en juillet 2005 une liste de **125 problèmes ouverts**.

C'est amusant de constater que 2 ans après, certains sont déjà résolus ou, en tout cas, ont déjà beaucoup évolué.

Par exemple, l'un des problèmes cités était la « conjecture de

Poincaré sur S_3 ». Ce problème posé par Poincaré a été résolu par G. Perelman, un jeune mathématicien russe, l'année dernière. Cela lui a valu la médaille Fields (bien qu'il ait refusé de venir la prendre, ainsi qu'un prix d'un million de dollars... qu'il a également refusé ! Il veut se concentrer sur son travail et ne veut pas être troublé par les médias).

Citons quelques autres exemples de problèmes qui restent ouverts ; ils ne sont pas nécessairement issus de la physique, évidemment.

L'un de ceux le plus souvent cités à l'heure actuelle est le problème de la **conscience**. Comment remonte-t-on d'une analyse réductionniste, comme celle de la constitution de notre cerveau en termes de neurones et de synapses, à la nature de ce que nous appelons la conscience ; c'est-à-dire ce caractère collectif du paquet de neurones dont nous sommes équipés ? C'est un système d'une complexité extraordinaire : nous avons plus de 10 milliards de neurones, chacun est connecté à quelques milliers d'autres neurones par des synapses. La compréhension de la combinaison gigantesque qui en résulte est un grand défi ouvert. Or notre cerveau ne se contente pas d'effectuer des tâches isolées, telles que bouger un doigt, faire fonctionner notre foie, etc. Nous ne sommes pas que la superposition de ces tâches spécialisées, puisque nous avons un sentiment de « conscience d'être » (self-awareness), de « je », d'unicité.

D'où vient ce caractère collectif ? C'est ce que l'on appelle le problème de la conscience. Il ne s'agit pas ici de la conscience morale, mais de l'unicité du soi.

Comment ce degré de liberté collectif, pour parler le langage des physiciens, est-il inscrit dans cet ensemble extrêmement complexe de neurones ?

C'est l'un des plus grands problèmes posés aujourd'hui à beaucoup de neuroscientifiques. Jusqu'à présent, la question a été l'apanage des philosophes ; mais peut-être deviendra-t-il enfin une question scientifique, c'est-à-dire résoluble par la combinaison d'une démarche expérimentale et de l'exercice de la raison. C'est à l'évidence l'un des problèmes les plus difficiles qui soient.

Passons à une question de physique. L'astronomie a fait des progrès extraordinaires. Aujourd'hui on observe l'univers dans une vaste gamme de longueurs d'ondes, bien au-delà des télescopes optiques. Nous faisons de la radioastronomie, de l'astronomie embarquée en satellites, nous avons des télescopes sur Terre avec de l'optique adaptative interférométrique, etc. Ces instruments permettent de voir l'univers des milliers de fois mieux que ne pouvait le faire Hubble, qui avait découvert l'existence d'autres galaxies que notre voie lactée, et l'expansion de l'univers. Or, le résultat de ces observations est très paradoxal, puisque les astrophysiciens affirment que **leurs instruments ne détectent que 3%** du contenu énergétique de l'univers. Les 97% restants se manifestent indirectement de diverses façons : une matière noire, halo autour des galaxies dont on constate l'effet gravitationnel, une énergie noire, qui accélère l'expansion de l'univers. Mais la nature de cette matière

noire et de cette énergie noire est inconnue.

Autre problème : les biologistes, tels les alchimistes qui voulaient transformer le plomb en or, savent aujourd'hui reprogrammer des ovocytes. C'est le **transfert nucléaire somatique** (souvent nommé clonage thérapeutique). L'enjeu est, bien sûr, de traiter des maladies aujourd'hui incurables. Ils parviennent donc à reprogrammer un noyau cellulaire : mais ils nous disent que les processus qui interviennent réellement dans cette reprogrammation sont encore largement incompris.

Permettez-moi de revenir à la physique avec deux questions.

La première est ancienne : est-ce que les lois de la physique peuvent être unifiées ? Ce problème occupe beaucoup de théoriciens : comment **peut-on réconcilier gravitation et mécanique quantique** ?

On ne le sait toujours pas, alors que toutes les interactions électromagnétiques et nucléaires sont décrites par le magnifique *modèle standard*, triomphe du dernier quart du vingtième siècle. On n'y parvient pas dans le cadre théorique usuel, et en se limitant aux trois dimensions d'espace que voient nos sens et nos instruments. Observera-t-on des dimensions de l'espace supplémentaires ? Je n'en sais rien. Certains théoriciens voient notre univers comme plongé dans un paysage de *multivers* qui n'ont pas de raison de ressembler au nôtre. Comme toujours, c'est l'expérience qui tranchera entre toutes les constructions intellectuelles qui s'affrontent aujourd'hui.

Une autre question, plus intéressante encore, est posée aux physiciens d'aujourd'hui. L'univers est gouverné par un certain nombre de **constantes de la nature** ; la vitesse de la lumière, la constante de Newton pour la gravitation, la constante de Planck qui caractérise tous les phénomènes atomiques, etc. Ces constantes jouent un rôle central. Par exemple, si la charge de l'électron était plus petite, les atomes seraient plus gros.

Il est donc clair qu'il y a un lien direct entre la valeur de ces constantes et l'aspect du monde qui nous entoure. Nous ne savons toujours pas si la valeur de ces **constantes** (ou plus précisément des combinaisons sans dimension que l'on peut en faire), est le fait du hasard, ou le résultat d'un principe qui les fixerait, et qui nous échappe.

Les théoriciens d'aujourd'hui, qui se battent avec la quantification de la gravitation, sont confrontés à des myriades de solutions possibles pour ces constantes ; ils ne savent pas encore s'il existe une solution favorisée, ou si de multiples univers différents sont *a priori* concevables.

Si je cite ici ces questions, c'est parce qu'à l'évidence ce ne sont pas des détails. Ce sont des interrogations très fondamentales sur notre Univers, sur sa constitution et son évolution. Il ne faut pas croire qu'il ne reste plus aujourd'hui que des détails fins à trouver sur la 48^e patte du scarabée...

Un autre problème bien classique est celui de l'**origine du champ magnétique terrestre**.

Il y a très longtemps que l'on se pose la question de sa provenance. La Terre possède un champ magnétique qui, non seulement oriente nos boussoles, mais dévie le vent solaire, ces rayons cosmiques de haute énergie qui détruiraient peut-être toute vie terrestre si nous n'étions protégés par ce champ.

Les géophysiciens ont établi que ce champ magnétique terrestre n'a pas été toujours orienté comme nous le connaissons, c'est-à-dire dans une position où le pôle magnétique est très proche du pôle géographique nord. Il y a eu des retournements nombreux du champ magnétique terrestre, et c'est parfois le pôle sud qui a été le pôle magnétique. Ces retournements, très aléatoires, se produisent typiquement une fois par 100 000 ans. Le géomagnétisme utilise d'ailleurs ces retournements pour dater, à partir du champ qui y a été inscrit, le moment où des roches se sont formées.

Il y a bien longtemps que l'on s'interroge sur l'origine de ce champ magnétique.

On sait que la Terre possède une graine solide, autour de laquelle circule du fer liquide. Il est clair que, s'il y a un champ magnétique, ce champ fait tourner les particules métalliques qui elles-mêmes créent ainsi un champ magnétique.

Mais d'où vient-il ? Cela a conduit à l'hypothèse de «l'effet dynamo», qui est l'apparition spontanée d'un champ magnétique par une instabilité des cou-

rants métalliques turbulents. Cette hypothèse était posée depuis longtemps, mais sans vérification expérimentale. Des collègues de Paris, de Grenoble et de Lyon (S. Fauve et *al.*, 2006) ont réalisé en 2006 une expérience, pour laquelle ils ont utilisé un flot de sodium liquide dans une géométrie cylindrique, c'est à dire avec un axe de symétrie, sans aucun champ magnétique imposé. Puis ils ont créé un écoulement fortement turbulent. Lorsque la turbulence était suffisamment développée, ils ont vu apparaître un champ magnétique spontané, et ils ont mis en évidence des retournements aléatoires de ce champ. Les mécanismes de ces retournements sont aujourd'hui à l'étude et ils peuvent nous apprendre des choses sur la dynamique terrestre.

Ce problème de l'origine du champ magnétique terrestre n'est pas un détail. Même Einstein, qui n'y a pas travaillé, considérait que c'était l'un des plus grands problèmes posés à la science.

Autre exemple, en poursuivant ce catalogue désordonné.

Actuellement, les études de biologie structurale permettent de déterminer la séquence des grandes molécules biologiques dont la synthèse est gouvernée par l'ARN et qui jouent un rôle central dans notre métabolisme.

Ces protéines peuvent être très longues. *In vivo*, elles sont repliées et leurs propriétés physiologiques dépendent de leur organisation spatiale lors du repliement.

Pourrions-nous prédire comment une **protéine se replie**, simple-

ment en connaissant sa séquence chimique ? On connaît assez bien les interactions entre atomes : on pourrait, dans ces conditions, se dire que l'on va pouvoir déterminer les positions les plus favorables pour le repliement. On élabore des programmes d'ordinateur pour essayer de remonter de la séquence au mode de repliement. Mais avec ces programmes, il faudrait, nous disent les bioinformaticiens, des dizaines d'années de calcul avec nos plus grands ordinateurs pour comprendre ce repliement, compte tenu de la complexité combinatoire liée à la longueur de ces molécules. La protéine, elle, sait parfaitement ce qu'il faut faire : parmi les myriades de possibilités ouvertes de repliement, ces protéines font leur choix *in vivo* en quelques microsecondes.

Il ne suffit donc pas de connaître simplement la structure atomique pour avoir compris comment fonctionne cette protéine. Il faut se méfier d'un réductionnisme trop outrancier, comme cela nous arrive souvent à nous, physiciens...

J'ai pris, jusque-là, des problèmes un peu ésotériques. Point n'est besoin d'aller bien loin pour trouver des problèmes encore mal compris. L'un des problèmes les plus ouverts de nos jours est de **comprendre l'eau**. L'eau est évidemment un liquide familier ; mais c'est un liquide très singulier.

Ce n'est pas évident de comprendre pourquoi l'eau solide - la glace - flotte sur l'eau liquide : pour les autres corps de la nature,

c'est le contraire, les solides sont plus denses que les liquides. Notre eau solide, elle, est moins dense. Cela a des conséquences : s'il n'en était pas ainsi, si l'eau liquide était moins dense que la glace, la glace tomberait au fond des mers. La mer serait alors prise d'un seul coup dans un bloc de glace. Nous n'aurions pas du tout la banquise telle que nous la connaissons, où la glace flotte sur l'eau.

De plus, l'eau est le liquide qui a permis l'éclosion de la vie : c'est dans ce milieu que la vie est née, et nous avons tous besoin d'eau pour la vie. Mais les raisons physicochimiques qui ont permis l'éclosion de la vie dans ce milieu sont encore bien incomprises.

L'eau est un solvant. Mais comment fonctionne ce solvant ? Et pourrait-on imaginer d'autres solvants dans l'Univers, qui autoriseraient l'éclosion d'une autre forme de vie, certes différente de la nôtre ?

Voilà des questions ouvertes, en débat aujourd'hui. Certes la réponse est difficile, mais vous voyez que nous sommes souvent à même de comprendre la nature de la question posée.

Un autre exemple, là encore tiré de *Science*.

Les biologistes du développement nous disent que l'on ne sait encore comprendre pourquoi les organes et les organismes savent qu'il faut s'arrêter de croître. Qu'est-ce qui commande à la jambe gauche de s'arrêter à peu près au même moment que la

jambe droite ? Ou, si vous préférez, comment la grenouille sait-elle que son cœur n'a pas besoin d'égaliser celui du bœuf ?

D'où vient cette instruction qui leur a signalé qu'il était temps de s'arrêter ? Les biologistes du développement nous disent qu'ils ne le savent pas.

Autre problème posé, symbolisé par le nom de LUCA. **LUCA** est le sigle anglais signifiant **dernier ancêtre universel commun**. Ce graphique (fig. 2), décrit un arbre phylogénétique de la vie sur Terre avec, très loin au départ, des archées, qui se séparent des bactéries, qui se séparent ensuite des eucaryotes, avec toutes les branches suivantes. Cet arbre de la vie est reconstitué à partir des séquences ARN ; les généticiens mettent des dates sur ces différents embranchements. Donc, il y aurait un ancêtre commun unique, LUCA, dont toute la vie serait sortie.

Nous sommes toujours devant ce problème : est-ce que la vie est

issue d'une molécule unique qui s'est reproduite et qui, par la suite, a donné lieu à toute la diversité du vivant ? Ou bien, est-ce qu'il y a d'autres mécanismes ? Pour l'instant en tout cas, tout semble en accord avec cette structure en arbre, avec un tronc unique au départ. La compréhension de cet arbre fait partie des grands problèmes de la biologie actuelle, qui s'efforce de préciser la nature de l'arbre et des évolutions qui ont permis cela.

Je ne parle pas ici de créationnisme, bien sûr, mais de science : beaucoup de choses nous échappent. En particulier, nous, physiciens, pensons qu'une moitié du monde nous échappe, c'est-à-dire que nous ne connaissons que la moitié des particules constitutives de l'univers : que, à l'électron est associée une autre particule un peu semblable, nommée le sélectron ; de même pour le photon, etc... Ces particules n'ont pas encore été découvertes. Le Cern, qui va avoir une

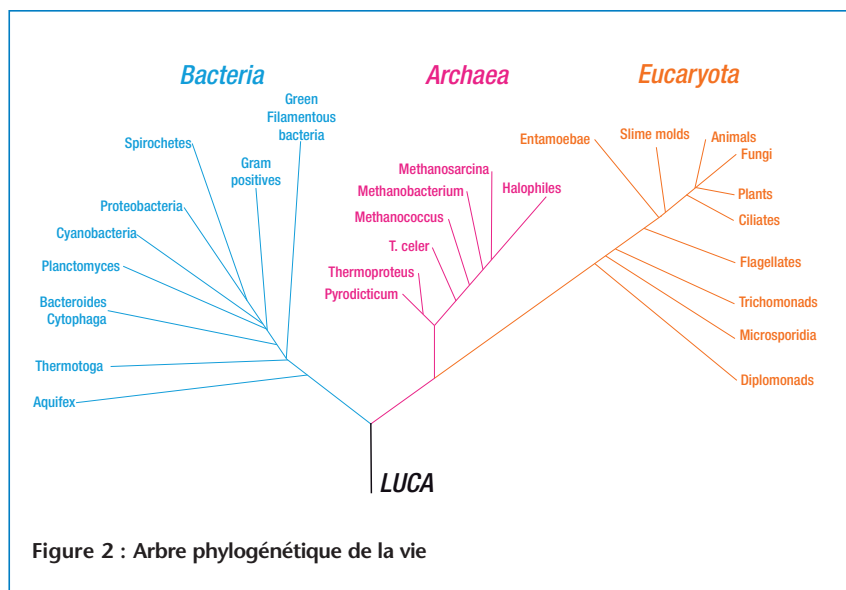


Figure 2 : Arbre phylogénétique de la vie

nouvelle machine en fonctionnement l'an prochain, va, je l'espère, nous aider à résoudre cette question. Ce n'est pas un détail, de penser qu'une moitié du monde reste inconnue !

Un mot sur la « loi » de Moore

Ce qui commande notre vie de tous les jours, plus que tout le reste, c'est l'évolution de la microélectronique.

La « loi » de Moore, c'est la constatation que, depuis quarante ans, la puissance installée au centimètre carré, le nombre de transistors par cm², double tous les 18 à 24 mois (Fig.3). Ce qui veut dire que l'on est capable de graver les puces avec une précision de plus en plus grande. Le graphique présente en ordonnée (en coordonnées logarithmiques) la taille des gravures, et en abscisse le temps. On constate que, par exemple, entre 1965 et 1980, la taille de la gravure est divisée par dix. Autrement dit, on sait graver dix fois plus fin. En 2000, la taille de la gravure pour inscrire, dessiner, ces circuits sur nos puces en était à 0,18 micromètres. Puis on extrapole jusqu'à 2020 ou 2025. C'est cette progression extraordinaire qui a permis ces ordinateurs que sont aujourd'hui nos téléphones portables : toutes les technologies de l'information et de la communication sont issues de cette loi.

Ce que, peut-être, les gens ne savent pas, en dehors du monde scientifique, c'est que cette loi n'est pas l'effet d'un bricoleur de génie quelque part dans son grenier ou son garage. Ici, il s'est produit une interaction extrême entre la science

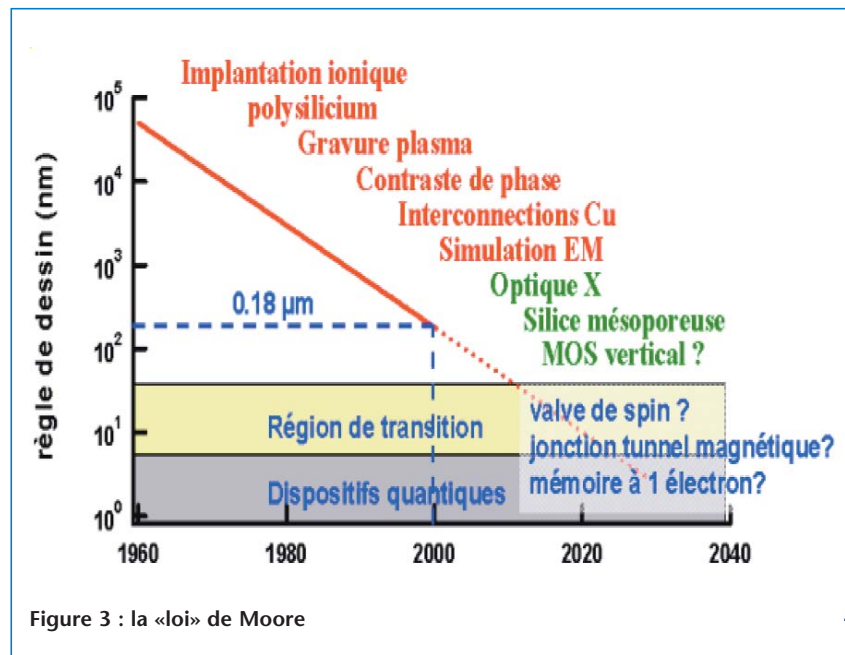


Figure 3 : la « loi » de Moore

et la technologie, un aller-retour constant entre les deux : chaque étape de cette marche vers la miniaturisation de nos circuits électroniques a été permise par des progrès explicites de la science physique qui s'appellent l'implantation ionique, la gravure plasma, etc.

Et, bien sûr, peut-être un jour, le stade ultime sera atteint lorsque l'on n'aura plus qu'un transistor à un électron ; à zéro électron, cela n'existe pas. En laboratoire, il y a déjà des gens qui font des transistors à un électron, mais il est clair que l'on n'ira pas au-delà. Peut-être d'autres technologies permettront-elles de franchir de nouvelles limites ? Par exemple, peut-être que ce que l'on nomme l'information quantique se substituera-t-elle un jour à cette technologie du silicium. Mais en tout cas, il faut bien comprendre que ce n'est pas le hasard qui a donné cette évolution.

Cette courbe permet une remarque majeure : j'y vois la

grande différence entre le 19^e et le 20^e siècles.

Au 19^e siècle, la technologie a fait de grands progrès ; la machine à vapeur, l'apparition du moteur à explosion, etc., ont été conduites par les ingénieurs. En gros, la machine à vapeur a plus apporté à la thermodynamique que la thermodynamique n'a apporté à la machine à vapeur.

Donc, la science était seconde, en quelque sorte.

Au 20^e siècle il n'en est rien. Ici, c'est la science qui précède.

Ainsi, les **lasers** sont présents dans la vie de tous les jours, dans notre vie ludique (CD, DVD, etc.) et dans bien d'autres choses (pointeurs, lecteurs de codes barres). J'ai souvenir des réactions des physiciens lors des premiers séminaires sur les lasers (Townes et al., 1960) ; c'était dans les années 60, j'étais étu-

diant. Nous en sommes tous sortis en nous disant que c'était magnifique, que c'était un très bel instrument pour les physiciens dans les laboratoires ; mais en nous disant aussi qu'il n'y aurait pas d'application. Ce qui m'a amusé, c'est d'entendre le regretté Pierre-Gilles de Gennes dire : « J'ai fait la même erreur, j'ai vraiment cru que cela servirait qu'aux physiciens, que cela n'aurait aucun intérêt ».

Or, voilà : le laser est aujourd'hui un objet de tous les jours. Alors qu'il est bien un objet quantique parmi les quantiques ! Et il n'est pas issu d'un accident, il est issu de la science fondamentale. Aujourd'hui, il existe beaucoup de prolongements de la recherche sur les lasers, les électrons dans les solides et la spintronique.

La cosmologie

Cette courbe (fig. 4) a valu le Prix Nobel de physique de 2006 à deux Américains, John Mather et George Smoot. Il s'agit de l'observation des fluctuations du rayonnement dans lequel baigne l'univers, un rayonnement très froid. Les points noirs sont les points expérimentaux représentant la distribution angulaire des fluctuations observées. La courbe est la courbe théorique qui repose sur le modèle du Big Bang ; vous voyez que le modèle du Big Bang n'est pas tout à fait tiré d'un chapeau, le graphique illustre bien l'accord entre la théorie et l'expérience !

Conclusion

Le 20^e siècle a montré que les tech-

niques les plus innovantes sont issues de **progrès a priori purement conceptuels**, notamment la mécanique quantique, qui a donné les lasers, les semi conducteurs.

Je crois que pour le 21^e siècle, rien ne permet de penser qu'il sera différent.

La science est en marche, en marche rapide ; elle pose aux

jeunes générations autant de problèmes qu'elle en a posés à la mienne, aux précédentes. Certains imaginent qu'il ne reste plus que des choses de détail à chercher, en physique. Ce ne sont pas des détails, comme on le croit !

Beaucoup pensent qu'il ne reste plus que la biologie.

Eh bien, la biologie est une science

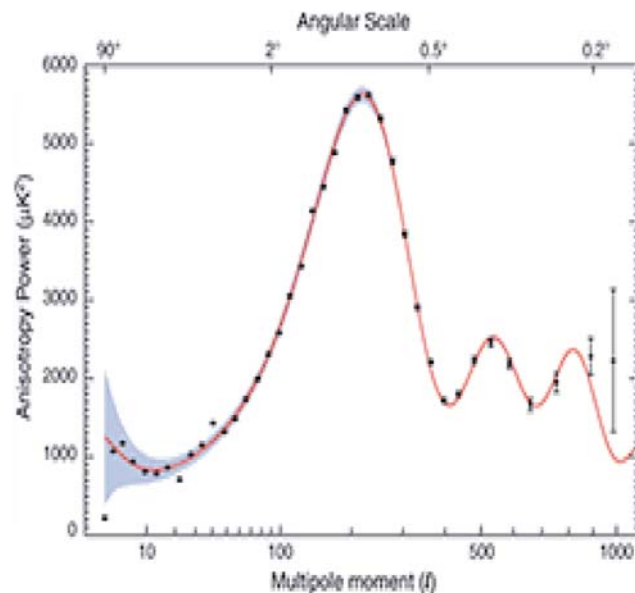
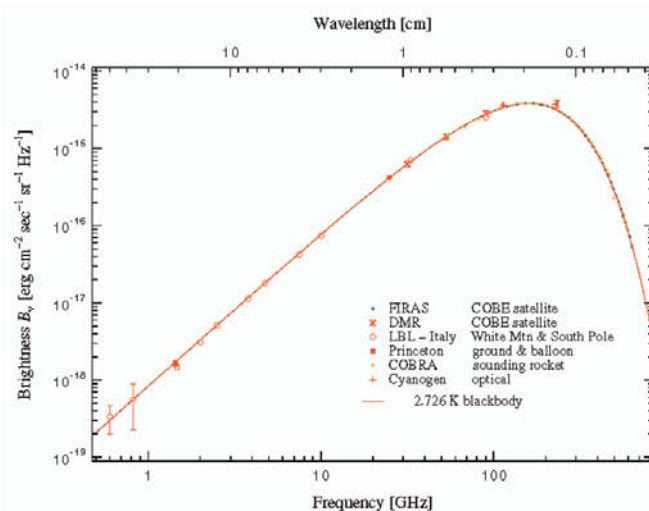


Figure 4 :
Cosmologie - Spectre du fond cosmologique, mesurée par satellite COBE



extrêmement ouverte, que j'admire beaucoup ; mais comme j'ai essayé de vous le montrer, les sciences de la matière - comprendre notre univers - restent encore un enjeu absolument fondamental, gigantesque, aussi bien au plan conceptuel, qu'au plan éventuel de la technologie (qui est une autre histoire).

Interventions du public

- Première intervention

Merci tout particulièrement pour votre préambule où vous dites que la physique n'existe pas pour créer de la technologie. Je crois que c'est le moment de le dire, ce qui n'exclut pas bien sûr les applications qui sont un peu plus appréciées et, j'allais dire, la science fondamentale, le mot fondamental n'est pas un gros mot, puisque vous l'avez prononcé une fois.

Un mot sur le chapitre de la conscience, tout à fait intéressant. Vous avez dit que c'était étudié par les philosophes, et pas par les scientifiques. Or les sciences humaines sont aussi des sciences, vous le savez mieux que moi.

- Deuxième intervention

Vous avez évoqué cette seconde moitié de l'univers que l'on ne connaît pas, vous avez évoqué l'énergie noire ? Où se situe l'antimatière ?

E.B

C'est une des questions mal comprises.

Dans les modèles de Big Bang, il y a une phase d'univers initial très concentré, très chaud, dans lequel il y a un rayonnement. Ce rayonne-

ment se matérialise, lorsqu'il se matérialise, en créant des paires de particules : il crée nécessairement des paires de particules / antiparticules. Par exemple, le rayonnement peut créer un électron et son antiparticule, le positron, bien connu.

Donc, a priori, il devrait y avoir autant de matière que d'antimatière.

Mais il y a une légère violation de la symétrie entre **matière et antimatière**, qui a été découverte il y a une vingtaine d'années par les physiciens, sur laquelle avait beaucoup réfléchi Andreï Sakharov (qui n'était pas simplement célèbre pour avoir été un refuznik, mais aussi pour avoir été aussi un très grand scientifique). Il avait essayé de bâtir un scénario pour expliquer que cette petite violation de la symétrie entre matière et antimatière pouvait suffire à expliquer le fait que, autour de nous, en gros, on ne voit que de la matière ; on parvient certes à produire un petit peu d'antimatière, ainsi au Cern, mais elle ne dure pas. Donc, pourquoi avons-nous si peu d'antimatière dans l'Univers ? Sakharov avait conçu un scénario, d'autres ont été proposés, mais je crois qu'ils sont loin, pour l'instant, de faire l'unanimité. La question subsiste, elle fait partie des problèmes ouverts.

Pourquoi y a-t-il de la matière noire ?

On sait que, pour des raisons d'effets gravitationnels, il se produit, dans les halos autour des galaxies, des perturbations qui ne peuvent pas être expliquées par la matière que l'on voit dans les galaxies. Autrement dit, il y a plus de matiè-

re que ce qui fait tourner ces halos. Ces halos de matière noire ne peuvent pas être d'anti-matière, parce qu'ils ne sont pas suffisamment isolés de la matière pour qu'il n'y ait pas de collision : quand matière et antimatière se rencontrent, elles recréent du rayonnement. Donc cela ne peut pas être de l'antimatière ; quelle en est la nature ? Nous ne le savons pas.

La supersymétrie hypothétique que le CERN va explorer l'an prochain est l'une des pistes possibles pour expliquer la matière noire. Donc, pour la matière noire, j'ai bon espoir que l'on saura d'ici un petit nombre d'années.

L'énergie noire, c'est une tout autre histoire ...

- Troisième intervention

Je voudrais vous poser une question concernant le **programme ITER** qui vient de démarrer.

A partir de l'état de nos connaissances en physique et en technologie, quelles applications peut-on en attendre ? Quelle durée faut-il envisager pour atteindre des applications concrètes ? Et peut-on, à partir de ces connaissances que nous avons, imaginer que cela va entrer dans une phase de réalisation active, économiquement parlant ?

E.B

Il s'agit d'explorer la source d'énergie que nous connaissons dans les étoiles, qui leur donne tant d'énergie, celle du soleil par exemple. Pour l'instant, nous n'avons utilisé cette énergie que dans la bombe thermonucléaire, qui est la fusion entre les deux isotopes lourds de

l'hydrogène que sont le deutérium et le tritium. Ce sont des noyaux qui ont la même charge que celui de l'hydrogène, ils sont donc chargés positivement, comme le proton ; ils ont un proton, l'un a deux neutrons et l'autre en a trois.

A priori, les protons se repoussent. Pour arriver à ce que l'attraction nucléaire, qui est de très courte portée, se manifeste, c'est-à-dire que finalement toutes ces particules s'attirent et créent de l'énergie, il faut parvenir à les précipiter l'une sur l'autre. Il faut donc des températures d'agitation qui atteignent plusieurs centaines de millions de degrés.

Ce n'est donc pas tout à fait banal et il faut alors confiner des particules ionisées, ce que l'on appelle un plasma, pendant des durées suffisantes pour que la réaction de fusion se produise. L'espoir est qu'un jour nous sachions utiliser la réaction de fusion autrement que dans les bombes thermonucléaires.

Si tel était le cas, ce serait merveilleux, nous aurions une source d'énergie considérable et nous pourrions donc envisager l'avenir avec sérénité. A titre personnel, je ne doute pas qu'un jour l'homme utilisera la fusion et que cela fera partie des technologies. Effectivement, il y a des déchets parce qu'il y a des neutrons qui sont produits dans la fusion deutérium/tritium et que ces neutrons vont irradier les matériaux de structure, mais ces déchets sont beaucoup moins sérieux et problématiques que ceux de la filière fission des réacteurs classiques PWR de EDF.

Simplement, il y a beaucoup d'obstacles à franchir avant d'espérer y parvenir.

Dans ITER, on va essayer, pendant plusieurs centaines de secondes, en injectant du tritium, de provoquer des réactions de fusion en espérant qu'elles vont dégager davantage d'énergie que ce que l'on a mis dedans. On espère donc avoir un bilan positif au chauffage du plasma par les réactions de fusion.

Mais cette fusion provoque des neutrons énergétiques de 14 millions d'électronvolts, qui, comme je le disais, vont dans les matériaux de structure et peuvent provoquer des dégâts.

Pour l'instant, nous n'avons pu étudier aucune source de neutrons de cette gamme d'énergie, on est restés dans la modélisation. ITER comporte donc un tout petit peu d'inconnu. Ce ne sont pas des dangers, mais simplement on ne sait pas très bien combien de temps ces matériaux de structure vont durer.

C'est pourquoi, dans le programme ITER, il y a, en parallèle avec la machine qui va se construire à Cadarache, une station au Japon (c'est un programme international, comme vous le savez), qui s'appelle IFMIF², et qui est chargée d'étudier la physique des matériaux. On va fabriquer une source de neutrons énergétiques avec un accélérateur et une source à spallation de neutrons, et on aura donc enfin une étude des matériaux.

Certains pensent, et je n'étais pas loin de penser la même chose,

que l'on aurait dû commencer par l'étude des matériaux avant de se lancer dans ITER. Mais les constructeurs de la machine disent qu'il n'y a pas de danger pour ITER et qu'ils dominent les choses.

Je reviens à votre question : **dans combien de temps ?**

Dans ITER, on va injecter du tritium, il ne va pas être régénéré. Du deutérium, on en a tant que l'on veut ; mais on n'a pas de tritium, il faut le fabriquer, puisqu'il a une durée de vie de 10 à 12 ans (ce qui a l'effet bénéfique que nos armes se périment !).

Dans une technologie future, le tritium sera donc, non pas un tritium injecté de l'intérieur, mais fabriqué par la machine elle-même. On a envisagé de construire une autre machine qui se nomme DEMO, dans laquelle le tritium sera régénéré par le fait qu'il y a une couverture circulante en lithium (je passe sur les détails), et les neutrons casseront le lithium pour fabriquer du tritium, lequel viendra fusionner avec le deutérium.

J'essaie de résumer tout ce que cela donne.

ITER, on mettra une dizaine d'années à le construire -un peu moins, je l'espère -. Ensuite il y aura un certain nombre d'années pour l'étudier, ainsi que la physique des matériaux au Japon : il faudra bien une dizaine d'années de recul. Ensuite, s'il n'y a aucune surprise et que tout se déroule bien, on va se lancer dans DEMO, qui est une aventure

d'une tout autre ampleur, puisque cette fois-ci il y aura en permanence du tritium. Encore une fois, il faudra une vingtaine d'années pour que DEMO soit conçu et étudié. A supposer qu'il n'y ait aucun problème, on pourra alors se lancer dans un prototype éventuel qui fabriquera des kilowatts pour nous tous, en tout cas pour ceux qui seront là !

Cela peut donc demander 50 ans, quoi qu'il arrive.

Or, les problèmes d'énergie que nous avons, qui sont à la fois les problèmes d'épuisement des ressources fossiles et ceux de réchauffement climatique et de gaz à effet de serre, sont urgents : je pense qu'il n'est pas question d'attendre le succès éventuel de la fusion avant de s'en occuper. Peut-être qu'un jour ITER ou la fusion contribueront à leur solution ; mais nous en sommes très, très loin ! Attendre ce futur éventuel, en se disant qu'il est inutile de s'en soucier, serait suicidaire.

• Quatrième intervention -
Puisque vous avez eu la gentillesse de répondre à la question sur ITER, je vais me permettre de vous poser une question sur les réacteurs de quatrième génération.

On parle tout le temps de EPR, la troisième génération ; on comprend que c'est un progrès pratique, mais malgré tout de portée très limitée. Et surtout, avec toutes ces discussions actuelles sur l'environnement, la pollution, etc., on se rend compte que l'uranium 235 est très peu abondant sur Terre et que, de toute évidence, ce ne sont pas les réacteurs de 3^e génération qui vont résoudre le problème.

J'ai entendu pas mal d'exposés sur les **réacteurs de 4^e génération**, certains physiciens le présentant comme une solution miracle entre EPR et ITER. Dans la mesure où vous avez répondu si brillamment à une question qui finalement n'est pas de la recherche fondamentale (ITER est de la recherche appliquée), serait-il possible que vous fassiez le même commentaire sur la 4^{ème} génération ? et également sur les délais au bout desquels on peut espérer la voir en fonctionnement ? »

E.B.

Comme vous le dites très justement, nous avons, jusqu'à présent, jusqu'à la 3^e génération comprise, utilisé de l'uranium faiblement enrichi en uranium 235, qui est le seul isotope fissile. A l'état naturel, il est présent pour 0,7%. On l'enrichit à 3 ou 4% et c'est cet U235 que l'on utilise actuellement dans les réacteurs.

Il est clair que cette filière ne peut pas prétendre durer des siècles, en particulier si, comme cela semble apparaître aujourd'hui, le monde entier, compte tenu de l'épuisement des ressources fossiles et des problèmes de CO₂, semble se rediriger vers le nucléaire. On n'est plus du tout dans la situation d'il y a 10 ans ; il y a des projets massifs de retour au nucléaire, un peu partout dans le monde. Si tel est le cas, on va rapidement se retrouver dans la situation que vous signaliez, c'est-à-dire qu'il n'y aura plus d'uranium, en tout cas plus beaucoup. Donc c'est un problème difficile.

Il existe une autre filière, celle des neutrons rapides. Cette solution consisterait à utiliser l'uranium

naturel. De nos jours, dans les réacteurs classiques d'EDF, il y a de l'uranium 238 pour 97% ; cet uranium est transformé en plutonium par les fissions de l'U235 ; avec ce plutonium, qui est retraité à La Hague, on peut fabriquer de l'énergie. Or cet U238 est plus de cent fois plus abondant que l'uranium 235. Si l'on arrive à utiliser tout l'uranium naturel, et pas simplement la petite fraction d'uranium 235 qu'il contient, on multiplie les échéances par cent : on passe de 50 ans à 5 000 ans. Ce n'est donc pas une mince affaire !

La France s'était lancée dans les neutrons rapides très tôt par rapport à bien d'autres pays. Le CEA a construit une succession de réacteurs qui s'appelaient Rapsodie, Phénix, et finalement Super Phénix.

Il est vraisemblable que ce dernier a été victime d'une double erreur. D'abord une erreur sur les matériaux. Ce n'était pas un problème nucléaire, mais un acier qui était mal fait, dans le but de faire des économies : ce détail a entraîné des fuites de sodium, il a donc fallu arrêter Super Phénix. On l'a réparé, puis redémarré (d'ailleurs, au moment où on l'a arrêté, il marchait).

D'autre part, la France avait fait le choix d'avoir des filières à neutrons rapides. Super Phénix devait être le premier d'une série. On « retraite » à La Hague, ce qui signifie qu'on y extrait le plutonium : l'idée était de remettre ce plutonium dans ces réacteurs à neutrons rapides ; dans ces conditions, on aurait de l'énergie pendant très, très longtemps.

Ainsi, Robert Dautray, dans l'un de ses livres, dit que notre usine d'enrichissement du Tricastin sort de l'uranium appauvri, c'est-à-dire presque de l'U238, et que cela représente plus de stock d'énergie que tout le pétrole d'Arabie Saoudite. Cet uranium appauvri reste là, si l'on peut dire, en train de « rouiller », inutilisé : c'est l'erreur de cette filière. Donc, c'est un enjeu absolument considérable.

Pour des raisons politiques -il faut bien dire les choses telles qu'elles sont-, Super Phénix a été arrêté. Sans doute aussi, EDF, le CEA et tous ceux qui avaient proposé Super Phénix ont-ils fait l'erreur de faire un saut trop rapide vers le 1 000 mégawatts : un test avec un 300 mégawatts aurait convenu. Le saut fut trop grand entre Phénix, qui était une « petite chose » de quelques dizaines de mégawatts et Super Phénix. Ce n'était pas très prudent.

Toujours est-il que, hélas, Super Phénix a été arrêté, en 1998 environ. La France avait accumulé une expérience particulièrement bonne, et qui malheureusement risque d'être perdue .

Un grand nombre de pays ont signé le consortium 4ème génération ; toutes sortes de pistes devaient être étudiées. Or on me dit que, actuellement, la seule piste qui est réellement étudiée dans le monde est de nouveau celle du sodium, qui avait été utilisée autrefois dans Super Phénix. On me dit également, alors que tout le monde est convaincu de ce que vous dites, que ce n'est pas avant 2020 ou 2030 que ces

réacteurs à neutrons rapides verront le jour.

En attendant, nous sommes en France dans une situation un peu déséquilibrée, puisque l'on retraits nos déchets pour en extraire le plutonium ; or le plutonium était fait, a priori, pour les neutrons rapides, et on n'a plus de filière à neutrons rapides !

On fait donc des mines de plutonium, comme le dit Robert Dautray, on l'accumule. C'est fâcheux !

Tout de même, on fabrique aujourd'hui ce que l'on appelle du combustible MOX, dans lequel on mélange du plutonium et de l'uranium pour en utiliser une partie. Sur nos 50 et quelques réacteurs en France, il y en a une vingtaine qui ont l'autorisation d'en utiliser : et donc on brûle une partie du plutonium. En fait on brûle une partie des déchets des actinides. Un jour, peut-être, reviendra-t-on à une filière dans laquelle, à côté des EPR, filière classique à dispositifs de sécurité améliorés par rapport à nos centrales actuelles, nous aurons des réacteurs surgénérateurs.

A mon sens, il est urgent d'accélérer le programme 4ème génération. Sinon, nous allons nous retrouver avec des problèmes : celui d'un excès de plutonium ; et surtout, ce que le monde entier redoute, c'est le terrorisme : c'est facile de faire une bombe au plutonium.

- Cinquième intervention - Cela ne va pas être une question

scientifique, mais plutôt philosophique.

Vous avez parlé du doute et il me semble que tous les scientifiques devraient être portés vers le doute. Je ne comprends pas qu'un scientifique puisse dire : cela servira ou pas. Pour moi, le monde scientifique est totalement ouvert et, pour ce faire, il faut douter.

Ma deuxième question est de savoir s'il peut y avoir une filière qui évite les déchets, qui les récupère. En effet, en simplifiant, on a donné aux scientifiques un monde non parfait, mais le scientifique a créé beaucoup de déchets, par exemple le plastique. C'est quelqu'un du CNRS qui a inventé la greffe des copolymères qui fait que l'on a des sacs en plastique par milliards. Il n'a pas pensé qu'en même temps il pourrait trouver une filière anti-déchets.

L'autre exemple est celui des déchets nucléaires, que l'on pourrait récupérer d'une façon ou d'une autre, non ?

E.B.

Je réponds, premièrement, sur le doute :

Quand je disais que lorsque le laser est apparu l'on ne voyait pas à quoi cela pouvait servir, c'était clairement dû à notre manque d'imagination ; personne n'avait déclaré que nul n'utiliserait un laser. Mais, à l'époque on ne voyait pas très bien à quoi cela servirait de fabriquer du rayonnement cohérent autrement qu'à faire de belles manipulations de physique atomique. Donc, c'était un manque d'imagination : ce n'était pas parce que nous avions

des certitudes, c'est simplement le fait que l'avenir est fait de surprises. Maintenant, ce qu'il faut savoir et c'est ce qui est souvent mal compris, c'est que nous ne vivons pas de certitudes. Il n'y a rien de plus glorieux que de parvenir à démolir un dogme établi : c'est merveilleux ! Démontre que Einstein, ou tout autre, s'est trompé, c'est le rêve de tout le monde. Mais on n'y arrive pas souvent ! Nous sommes donc habités du désir forcené de montrer que ces grands qui nous ont précédés n'ont écrit que des bêtises. Mais on n'y arrive pas, ce n'est pas très facile. De temps en temps on y parvient, et là, on est très contents.

Le public a souvent l'impression d'un conservatisme de la science. Non, **la science ne cesse de vouloir détruire ses idoles** ; en y parvenant parfois, parfois non, car certaines résistent très fort.

Sur la science et les réacteurs nucléaires :

Il est clair que la physique nucléaire existe ; que, si elle a été utilisée dans les réacteurs, c'est parce que l'on avait besoin d'énergie ; que, en matière d'énergie, ce n'est pas réellement possible de parvenir à trouver des solutions parfaites. Je lisais récemment une mise en garde de Paul Crutzen, grand monsieur, grand chimiste, qui a eu le prix Nobel parce qu'il a découvert le trou d'ozone. Il nous dit : Attention à la biomasse ; certes du point de vue du CO₂, le bilan paraît équilibré, puisqu'on a pris du carbone pour fabriquer le maïs, qui le réémet lors de la combustion. Mais, nous explique-t-il, cela provoque l'émission de N₂O, qui provoque

plus d'effet de serre que le CO₂. Le bilan « climatique » est donc négatif. Alors, la biomasse est-elle une solution ? Vous constatez que c'est très difficile.

Pour le pétrole, il y a également des problèmes politiques : est-il particulièrement rassurant de dépendre d'émirats ou de pays instables ?

Pour les déchets, nous sommes dans un cas d'interaction entre le politique et la science, que je trouve assez idéal... Le 30 décembre 1991, nos députés avaient voté la loi Bataille qui donnait 15 ans aux scientifiques pour étudier les trois grandes pistes pour éliminer les déchets. Ce sont l'entreposage (on les laisse alors dans des piscines près de la surface), le stockage profond et la transmutation éventuelle.

L'entreposage équivaut à ne rien faire ; pour le stockage profond, nous avons un site argileux dans la Meuse à l'étude ; quant à la transmutation, nous n'avons pas encore la réponse.

Mais j'ai trouvé que c'était une belle démarche : les députés, reconnaissant ne pas connaître la réponse, ont demandé, au moins à la recherche publique (ce fut le cas au CEA, aussi bien qu'à l'IN2P3, ici au CNRS), de travailler sur ces questions. Ce fut fait, beaucoup de connaissances ont été accumulées dans ces 15 ans. Rendez-vous était donc pris pour juin 2006, date à laquelle il y eu une prolongation de cette loi, puisque la transmutation - qui consiste à prendre les déchets et par réaction nucléaire à les transformer dans des isotopes plus anodins, comme on

pense que cela se produira dans les réacteurs à neutrons rapides (mais pour l'instant on l'ignore) - n'avait jamais été étudiée.

Face à un avenir incertain, à des questions scientifiques encore incompréhensibles, c'est plutôt une bonne démarche que de dire, comme nos parlementaires : « demandons aux scientifiques de travailler et ensuite nous, qui sommes la représentation nationale, déciderons ». Les scientifiques n'ont pas de légitimité démocratique, ils peuvent dire ce qu'ils savent et ce qu'ils ne savent pas ; mais ceux qui doivent décider sont ceux qui sont portés par l'élection. C'est, pour moi, une bonne **interaction entre le politique et le scientifique**. On aurait d'ailleurs pu s'en servir dans d'autres problèmes que nous avons connus, d'interaction entre la science et la société.

Notes

1) D'ailleurs, notre définition légale actuelle de la seconde est fixée par cette transition : on appelle seconde le temps nécessaire pour avoir 9, 192 631 770 milliards de périodes de la radiation produite entre deux niveaux du césium.

2) ITER : réacteur expérimental de fusion contrôlée.

IRMIF (*International Fusion Materials Irradiation Facility*) : station de test comportant deux accélérateurs linéaires travaillant en parallèle pour produire, par l'interaction d'un faisceau intense de deutons avec une cible de lithium, un flux de neutrons de 14 MeV capable de provoquer plus de vingt déplacements par atome et par an dans un échantillon de 1/2 litre.