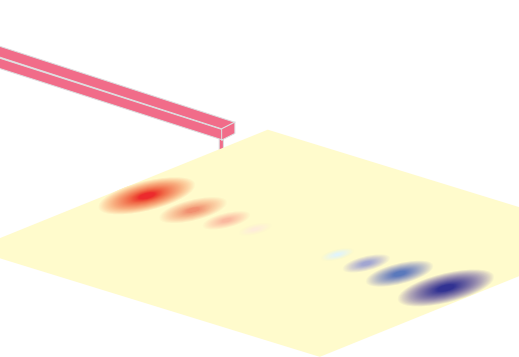




Une pointe de microscope à force atomique a été utilisée pour le dépôt de charges positives ou négatives sur des points voisins d'une surface d'alumine (en rouge, des charges positives et en bleu, des charges négatives).

dépôt effectué, on relève la pointe et on lui fait balayer la surface isolante, à environ 0,1 micromètre au-dessus d'elle, afin d'analyser la répartition des charges électriques.

Pour effectuer cette analyse, on applique une différence de potentiel alternative entre la pointe et la surface, afin de créer une force électrostatique périodique, qui induit des oscillations de la pointe. Mesurées par un système optique, ces oscillations dépendent de la différence d'énergie électronique entre la pointe et la surface. En enregistrant alors, point par point, l'amplitude de ces oscillations, on obtient une carte de la différence d'énergie entre la pointe et la surface. Cette différence d'énergie, qui dépend des charges électriques présentes à la surface de la couche isolante, révèle la charge locale.

Nous avons ainsi constaté, par exemple, que lorsqu'une pointe de platine frotte une surface d'alumine, un électron est déposé pour 10 000 atomes environ. En outre, la quantité de charges par unité de surface est proportionnelle à la différence d'énergie naturelle, quel que soit le mode de dépôt employé : frottement ou simple contact de la pointe sur la surface. Troisièmement, dès que la durée du contact est supérieure à quelques millisecondes, la quantité de charges transférées n'augmente plus. Enfin, pour des isolants épais, les charges déposées sont stables : une fois déposées, elles restent à la surface de l'isolant pendant plusieurs heures.

Ces études permettent principalement de conclure que la triboélectricité correspond à un échange rapide de type «vases communicants» entre le métal et la surface de l'isolant (et pas son volume). De surcroît, on obtient un second résultat important : bien que la pression exercée par la pointe sur la surface soit considérable (plusieurs milliers d'atmosphères), le frottement n'engendre aucun mécanisme spécifique de transfert de charges (tels des défauts mécaniques), contrairement à une hypothèse couramment formulée.

Michel SAINT-JEAN - Université Paris VII
Groupe de Physique des Solides

Transport de cholestérol

On a découvert une molécule indispensable à l'excrétion du cholestérol hors des cellules.

Il y a une quarantaine d'années, on décrivait la maladie de Tangier chez deux jeunes enfants, un garçon de cinq ans et sa sœur vivant sur une île située au large de Washington et qui a donné son nom à cette pathologie. Colonisée par quelques Anglais dans les années 1680, l'île fut longtemps un repère de pirates, et la peste y faisait régulièrement des ravages. Les quelque 200 habitants actuels de l'île sont issus des mêmes ancêtres, et la consanguinité y est élevée. Il n'est pas surprenant qu'une maladie génétique, telle la maladie de Tangier y soit fréquente, tandis qu'ailleurs dans le monde, les cas sont rarissimes.

Les enfants atteints avaient des amygdales anormalement grosses et orange. L'analyse de ces amygdales révéla une accumulation anormale de cholestérol dans ce tissu. On pensa alors trouver une concentration sanguine en cholestérol supérieure à la normale. Or, au contraire, elle était très faible. Par ailleurs, ces malades présentaient des accumulations de cholestérol dans les artères, qui déclenchaient une athérosclérose précoce : généralement, seul un excès de cholestérol dans le sang entraîne la formation de plaques d'athérome dans les parois des vaisseaux qui, lorsqu'elles sont trop volumineuses, peuvent obstruer les artères et être responsables d'infarctus du myocarde ou d'accidents vasculaires cérébraux.

Le cholestérol, absorbé avec les aliments et synthétisé par l'organisme, est un constituant normal des membranes cellulaires et intervient notamment dans la synthèse de certaines hormones. Quand il est en excès dans l'organisme, il est éliminé par les macrophages, les «éboueurs» de l'organisme qui se gorgent d'esters de cholestérol et des caroténoïdes associés (lesquels sont orange). Devant la couleur et la taille des amygdales, on émit l'hypothèse que le cholestérol s'accumule dans les macrophages, qui finissent par éclater ; l'accumulation des débris expliquerait la taille anormale des amygdales.

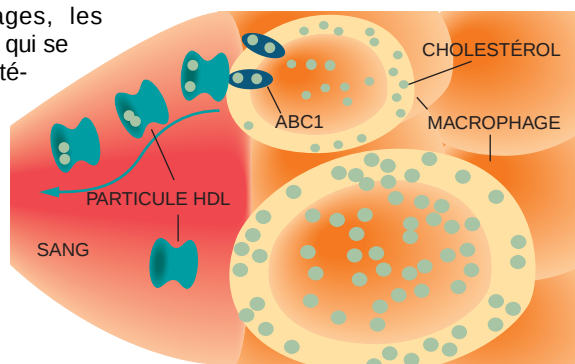
Ainsi chez ces personnes, la concentration sanguine globale en cholestérol est très faible, mais la substance s'accumule locale-

ment. Nicolas Duverger et ses collègues des laboratoires Rhône-Poulenc Rorer, de l'Université de Munster et de l'Institut américain de la santé ont montré que, chez les personnes atteintes de la maladie de Tangier, le cholestérol s'accumule dans la paroi de certaines cellules, car son transporteur intracellulaire, nommé ABC₁, est absent. Normalement, ABC₁ transporte le cholestérol vers la surface des cellules, où il est pris en charge par des particules présentes dans le sang (nommées HDL).

En effet, le cholestérol est transporté par deux types de particules lipidiques, les lipoprotéines de basse densité (LDL) et celles de haute densité (HDL). Le cholestérol circulant, essentiellement produit par le foie, est véhiculé par les LDL pour alimenter les cellules. Le cholestérol cellulaire en excès est pris en charge par les HDL qui le transportent vers le foie, où il est éliminé. Chez les personnes ayant la maladie de Tangier, le transporteur ABC₁ n'est pas synthétisé, le cholestérol cellulaire reste piégé, et les particules HDL, qui ne peuvent prendre en charge le cholestérol cellulaire indispensable à leur maturation, sont rapidement dégradées.

Quelles sont les applications potentielles de la découverte du gène ABC₁ ? On devra chercher si le gène est polymorphe, ce qui expliquerait les faibles concentrations en cholestérol HDL observées chez les personnes ayant des plaques d'athérome dans les coronaires. De surcroît, on pourra étudier, sur des animaux transgéniques, si la surexpression du gène ABC₁ augmente les concentrations sanguines en HDL et diminue l'accumulation de macrophages riches en esters de cholestérol dans les plaques d'athérome. Si tel est le cas, la surexpression du gène ABC₁ pourrait améliorer la régulation de la concentration sanguine en cholestérol.

Les maladies cardio-vasculaires étant la cause de 32 pour cent des décès dans les pays industrialisés, toute nouvelle voie thérapeutique mérite d'être explorée.



LE CHOLESTÉROL contenu dans les macrophages est normalement véhiculé par le transporteur ABC₁, puis éliminé par les particules HDL présentes dans le sang (en haut). Chez les personnes atteintes de la maladie de Tangier, ABC₁ manque (en bas) : le cholestérol reste piégé et les macrophages finissent par éclater.

La science au XXI^e siècle

JOHN MADDOX

Si le futur est aussi riche que le passé, la recherche scientifique procurera, dès les 50 prochaines années, des développements inattendus et exaltants.

Au XXI^e siècle, la science progressera, répondant à des questions qui ne nous viennent pas encore à l'esprit. C'est ce que montre l'histoire des 100 dernières années. En 1899, comme aujourd'hui, on réfléchissait aux grands progrès scientifiques du siècle passé afin d'améliorer l'avenir. Au XIX^e siècle, John Dalton avait montré que la matière est constituée d'atomes, et James Prescott Joule avait établi le principe de conservation de l'énergie, pressenti par Sadi Carnot. Ce dernier avait deviné que le rendement n'est jamais de 100 pour cent quand on transforme une forme d'énergie (thermique, mécanique, chimique, etc.) en une autre forme ; il avait ainsi fondé la thermodynamique. Le problème de l'irréversibilité des phénomènes, et donc du temps, était ainsi posé.

Vers la même époque, Charles Darwin publia son célèbre ouvrage intitulé *De l'origine des espèces au moyen de la sélection naturelle*, qui proposait la théorie de l'évolution pour expliquer la diversité de la vie sur la Terre. En revanche, il n'expliquait ni le mécanisme de transmission du patrimoine génétique, ni pourquoi un couple d'individus appartenant à deux espèces voisines est stérile. Enfin, James Clerk Maxwell démontra qu'électricité et électromagnétisme obéissent au même ensemble d'équations mathématiques. En outre, les lois de Newton décrivent si bien les observations qu'à l'époque elles pouvaient résoudre n'importe quel problème physique clairement défini. Quelle merveilleuse époque que le XIX^e siècle !

Seuls les esprits les plus perspicaces remarquèrent les points faibles des théories. Notamment, le Hollan-

dais Henri Antoon Lorentz découvrit que la théorie de Maxwell présentait une contradiction implicite : au lieu de supposer l'existence d'un éther où les ondes électromagnétiques étaient censées se propager, Maxwell aurait pu remarquer que le temps passe plus lentement pour un objet en mouvement que pour un observateur immobile. À partir de cette constatation, Henri Poincaré franchit le dernier pas avant d'arriver à la théorie de la relativité restreinte qu'Einstein publia en 1905. Cette théorie, selon laquelle rien ne se déplace plus vite que la lumière, n'invalide la physique newtonienne que d'un point de vue philosophique : ni l'espace ni le temps ne peuvent fournir de référentiel pour mesurer la position d'un objet ou le moment auquel il atteint cette position. À l'époque, peu de physiciens comprirent que, selon la plus simple interprétation de l'expérience d'Albert Michelson et Edward Morley, en 1880, l'éther de Maxwell n'existait pas.

Pourtant quelques-uns étaient agacés, voire choqués, par la complaisance générale vis-à-vis de la science en 1899 ; ceux-là avaient observé que les fondements de la science allaient être ébranlés. Si les atomes étaient invisibles, pourquoi détectait-on des « fragments d'atomes », tels les électrons et les « raies » des éléments radioactifs, découvertes en 1897 ? De même, Darwin proclamait que les mutations génétiques étaient invariablement minimes, tandis qu'en reprenant les travaux de Gregor Mendel, Hugo De Vries montrait expérimentalement que ces mutations sont rares, mais importantes. Analysés par Thomas Morgan et quelques autres, ces

résultats menèrent à ce que l'on nomme depuis 1906 la génétique classique. Puis on découvrit en 1930 que le darwinisme et le « mendel-morganisme » n'étaient pas si contradictoires qu'on l'avait cru d'abord.

Aujourd'hui, la science se félicite d'avoir éliminé ces contradictions et bien d'autres. L'autosatisfaction scientifique du XX^e siècle surpasse celle du XIX^e. Les applications de la science du début du siècle nous ont donné une impression de libération par rapport à notre condition humaine. Notamment les liaisons radio de Marconi entre l'Europe et l'Amérique, et les vols à bord de machines plus lourdes que l'air par les frères Wright et leurs successeurs ont engendré l'industrie des communications et l'industrie aéronautique. Aujourd'hui, nos bureaux sont encombrés de puissants ordinateurs que personne n'avait imaginés en 1900. Notre santé est aussi bien meilleure : pensons seulement à la pénicilline !

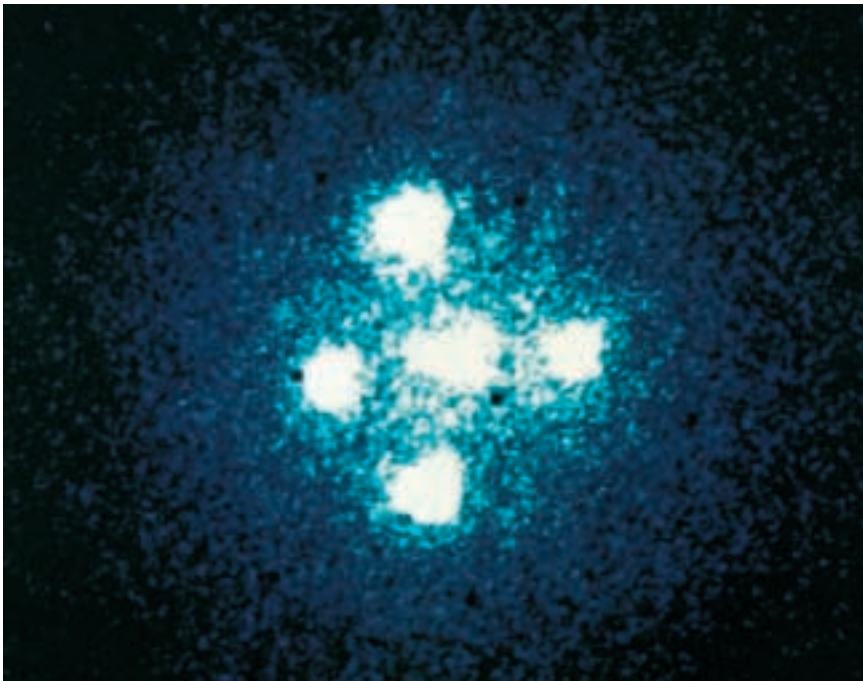
Les progrès scientifiques du XX^e siècle

En science fondamentale, nous avons au moins autant de raisons d'être fiers qu'au XIX^e siècle. La relativité restreinte ne se limite plus à une version corrigée de la physique de Newton. Parce qu'elle montre que l'espace et le temps doivent être traités de la même manière, on en est venu à lui attribuer le pouvoir quasi magique de vérifier la validité des autres théories de physique fondamentale.

Les trois grands événements scientifiques qui ont marqué ce siècle furent à peine pressentis. Avec sa théorie de



1. LA TERRE, vue de la Lune : cette image annonce une nouvelle conception de notre monde. La découverte d'autres êtres vivants dans la galaxie bouleverserait notre perception de la place que nous occupons dans la nature.



2. LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ générale, due à Albert Einstein, décrit la gravité comme une modification de l'espace-temps, prédisant ainsi des effets tels que la déviation de la lumière par des corps massifs. Cette photographie, prise avec le Télescope spatial Hubble, en est un exemple. Elle représente ce qu'on appelle une croix d'Einstein : quatre images d'un même objet céleste entourent l'image centrale d'une galaxie, qui joue le rôle de lentille gravitationnelle.

la relativité générale, qu'il aurait pu nommer «théorie relativiste de la gravitation», Einstein prit tout le monde de court, en 1915. Seuls les lecteurs assidus du physicien et philosophe viennois Ernst Mach auraient pu prévoir son résultat. En remarquant que, quel que soit l'endroit considéré, les forces de gravitation sont les manifestations d'un champ qui s'étend jusqu'aux confins de l'Univers, Einstein montra que la structure et l'évolution de l'Univers sont inéluctablement liées. Cependant, il fut lui-même surpris quand, en 1929, Edwin Hubble découvrit que l'Univers est en expansion.

La mécanique quantique fut la deuxième surprise du siècle, bien que le rayonnement émis par un corps chaud ait intéressé les physiciens depuis les années 1850. Pourquoi la fréquence principale de ce rayonnement est-elle proportionnelle à la température de l'objet exprimée en kelvins (le zéro absolu, égal à $-273,15^{\circ}\text{C}$, avait été défini par la thermodynamique du XIX^e siècle)? En 1900, Max Planck apporta la solution : l'énergie de ce rayonnement, transférée entre l'objet chaud et son environnement, est quantifiée, et les valeurs qu'elle peut prendre sont proportionnelles à la fréquence

du rayonnement. À l'époque, Planck avoua que, pas plus que ses contemporains, il ne savait ce que cette découverte signifiait.

Après 25 ans, la question fut enfin résolue, grâce aux efforts de Niels Bohr, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Paul Dirac et de quelques autres scientifiques parmi les plus brillants de ce siècle. Qui aurait deviné, en 1900, que les travaux de Planck aboutiraient à la mécanique quantique, une théorie aussi générale que celle de Newton : elle décrit les molécules, les atomes et les particules, mais aussi le monde macroscopique qu'ils constituent.

Aujourd'hui encore, certains prétendent que la mécanique quantique est pleine de paradoxes, parce qu'ils font une lecture impartiale (et souvent malveillante) des événements du premier quart du XX^e siècle. Notre compréhension intuitive des lois qui régissent le monde macroscopique (lois de Newton) repose sur nos perceptions sensorielles. Elles-mêmes résultent de l'évolution par la sélection naturelle : la survie de l'espèce dépendait de ces perceptions, puisqu'elles servaient à nous mettre hors de portée des prédateurs et à chasser. On imagine difficilement quel

avantage nos ancêtres auraient eu à comprendre le comportement des particules subatomiques. La mécanique quantique n'est pas un paradoxe, mais plutôt une découverte relative à la nature du monde physique, à des échelles de temps et de distance extrêmement petites. Elle est à l'origine de notre compréhension actuelle de la matière nucléaire, constituée de quarks et d'autres particules : bien que provisoire, comme toutes les théories, elle n'en reste pas moins un véritable exploit intellectuel.

La troisième surprise du siècle fut le développement de la biologie moléculaire, après la découverte de la structure de l'ADN par James Watson et Francis Crick, en 1953. Au début des années 1950, on ignorait encore la structure chimique des gènes. On connaissait leur disposition linéaire le long des chromosomes, d'après les recherches menées à l'Université de Columbia, mais, en découvrant la structure de l'ADN, on comprit enfin comment les enfants héritent des caractéristiques physiques de leurs parents, et aussi comment les cellules individuelles d'un organisme survivent, de milliseconde en milliseconde, suivant le principe de la sélection naturelle. Le secret de la vie était enfin percé!

Les questions ouvertes

La mécanique quantique et la découverte de la structure de l'ADN ont élargi notre compréhension du monde, au-delà de toute attente. Même les scientifiques à l'origine des nouvelles connaissances n'avaient pas mesuré leur portée. Dans les 50 prochaines années, quelles voies de recherche nous conduiront-elles à un monde de science complètement nouveau? S'il est impossible de le savoir, nous pouvons au moins passer en revue tout ce que nous ignorons, c'est-à-dire beaucoup de choses, puis extrapoler, à partir des tendances actuelles de la recherche, pour prévoir le futur. Cette démarche laisse imaginer des découvertes futures au moins aussi captivantes que celles du XX^e siècle ; nos enfants et nos petits-enfants ne seront sans doute pas déçus.

On a presque fini de reconstituer l'histoire génétique de l'espèce humaine, *Homo sapiens*. L'un des plus grands succès de ces dix dernières années est la compréhension de

l'ontogenèse, c'est-à-dire la transformation d'un être vivant, de la gestation à la formation de l'individu adulte. La structure physique des animaux et des plantes semble d'abord déterminée par des gènes d'une même famille (les gènes *hox*), puis par des gènes de développement propres à l'espèce. Les biologistes moléculaires comprendront bientôt ce qui détermine l'ordre d'intervention de ces gènes au cours des étapes successives du développement humain et comment ils sont désactivés, une fois leur tâche accomplie.

En comparant les gènes humains à ceux du chimpanzé, par exemple, on saura quand et comment des différences cruciales sont apparues entre l'être humain et les grands singes. Les fossiles nous ont déjà révélé les grandes lignes de cette histoire : la taille du cortex cérébral des hominidés a régulièrement augmenté depuis 4,5 millions d'années ; ces hominidés sont capables de se tenir debout depuis l'apparition de *Homo erectus*, il y a 2,1 millions d'années ; la faculté de parler est probablement apparue il y a 125 000 ans seulement. Grâce à la compréhension génétique de cette évolution, nous préciserons l'histoire de notre espèce et nous comprendrons mieux la place que nous occupons dans la nature.

Ces informations seront capitales. On en déduira peut-être pourquoi certains hominidés ont disparu, notamment l'homme de Neandertal. Plus important encore, l'histoire génétique de *Homo sapiens* révélera sans doute le mécanisme de spéciation. Darwin a évoqué l'origine des espèces dans le plus célèbre de ses ouvrages, mais il n'a pas expliqué la stérilité des couples d'individus appartenant à des espèces voisines. La différence génétique la plus frappante entre l'être humain et les grands singes réside dans le nombre de leurs chromosomes : l'homme en a 46 (23 paires), alors que nos plus proches cousins en ont 48. L'information génétique supplémentaire du singe se trouverait, chez l'homme, à l'extrémité du deuxième chromosome, tandis que d'autres fragments apparaissent aussi ailleurs, notamment sur le chromosome X. Ce réarrangement des chromosomes a-t-il marqué l'apparition de l'être humain ? Résulte-t-il seulement d'une mutation génétique ? La biologie progresserait considérablement si elle le savait.

Pendant la première moitié du XXI^e siècle, la biologie s'efforcera de corréler évolution et génétique. En principe, on sait déjà déterminer l'âge de l'ancêtre commun à deux espèces voisines : on compare les acides aminés dont l'enchaînement compose les protéines de chaque espèce ou les sous-unités des acides nucléiques, par exemple des molécules d'ARN. Puis on détermine la date de la différenciation d'après le degré de correspondance de ces molécules et la fréquence des mutations spontanées des protéines ou des acides nucléiques. Cependant, cette fréquence n'est pas la même pour toutes les protéines ou tous les acides nucléiques, ni pour les différentes parties de ces molécules. Les biologistes cherchent aujourd'hui une « horloge moléculaire » fiable, de même que les astronomes essaient de construire une échelle fiable des distances dans l'Univers. Une fois cette tâche accomplie, nous pourrions étudier les causes des grands tournants de l'évolution de la vie sur la Terre, notamment les causes de l'évolution du cycle de Krebs (qui récupère l'énergie stockée sous forme chimique dans le glucose), de l'appa-

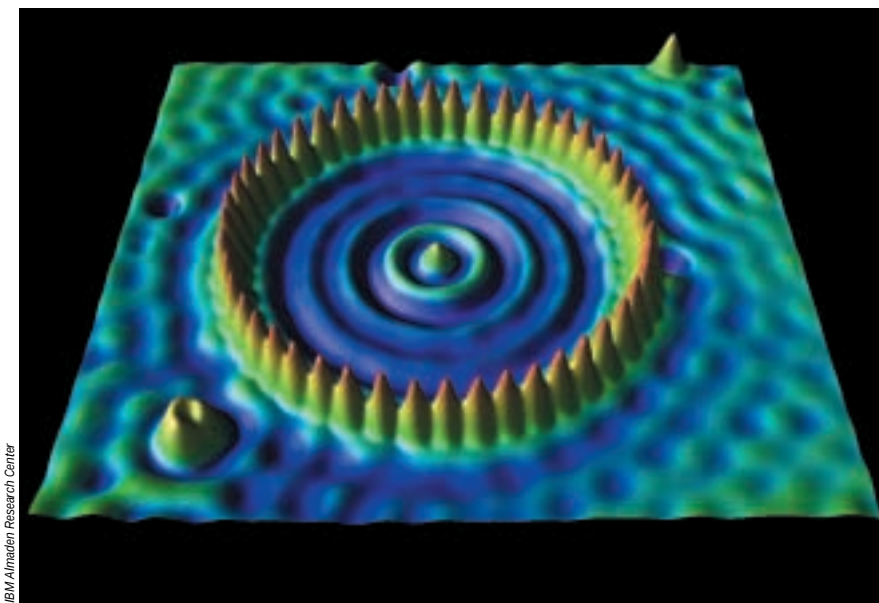
rition de la photosynthèse et des organismes multicellulaires. On a aujourd'hui établi que de tels organismes existent depuis plus de 2,5 milliards d'années.

Avec un peu de chance, nous découvrirons aussi le rôle des virus dans les premiers stades de l'évolution de la vie. Le génome humain est truffé de séquences d'ADN qui ressemblent à des acides nucléiques fossiles. Ils dateraient d'une époque où l'information génétique était transférée entre espèces grâce à des échanges de plasmides (des boucles d'ADN). Aujourd'hui encore, les bactéries qui s'échangent des plasmides acquièrent de nouveaux caractères (la résistance aux antibiotiques, par exemple). Quelle est notre place dans la nature ? Nous l'ignorerons tant que nous n'aurons pas découvert comment l'ADN, en apparence inutile, du génome humain (que F. Crick fut le premier à nommer « ADN déchet ») contribue à notre évolution.

Même en comprenant tous les génomes dont la structure complète a été déterminée, on ne remonterait pas aux origines de la vie. En revanche,



3. LA DÉCOUVERTE DE LA STRUCTURE DE L'ADN, en 1953, par James Watson (à gauche) et Francis Crick révéla le secret de la vie et engendra des progrès spectaculaires en médecine et en biologie moléculaire.



IBM Almaden Research Center

4. LA MÉCANIQUE QUANTIQUE est l'un des exploits intellectuels du xx^e siècle. Elle a révélé la nature de la réalité à une échelle microscopique. Cette image, obtenue à l'aide d'un microscope à effet tunnel, montre un «corral quantique» de 48 atomes de fer sur une surface de cuivre : nous pouvons désormais manipuler les atomes individuellement et visualiser les électrons. La mécanique quantique décrit ces derniers comme des ondes, matérialisées ici par des cercles concentriques.

on cernerait peut-être la nature des êtres vivants de ce monde de l'ARN qui semble avoir précédé celui de l'ADN. Aujourd'hui, les cellules utilisent encore l'ARN pour certaines fonctions de base, par exemple pour dupliquer l'ADN du noyau cellulaire ou pour élaborer des structures nommées télomères, qui stabilisent les extrémités des chromosomes.

En laboratoire, on ne recréera sans doute pas d'organisme à base d'ARN avant la deuxième moitié du xxi^e siècle. Comment la vie apparaît-elle à partir de composés inorganiques ? Comment un rayonnement, en l'occurrence celui du Soleil, engendre-t-il la formation de molécules complexes à partir de composés plus simples ? Nous l'ignorons encore, mais des phénomènes analogues se produisent dans les nuages moléculaires géants de notre Galaxie, où les radioastronomes trouvent des composés de plus en plus complexes : ils ont découvert des fullerènes (molécules composées seulement d'atomes de carbone, qui s'arrangent en forme de ballons de football). Quel est le rapport entre la complexité des molécules et le rayonnement ? Jusqu'ici, personne n'a encore vraiment exploré ce genre de phénomènes thermodynamiques irréversibles.

Ces dernières décennies, les biologistes n'ont guère quantifié leurs analyses. Aujourd'hui, nous avons du

mal à approfondir nos connaissances, par exemple sur le fonctionnement des cellules, à cause du déluge de découvertes. On simplifie aussi la réalité de manière abusive : on parle de la fonction d'un gène, alors que chaque gène a peut-être plusieurs fonctions, qui pourraient même être antagonistes. En l'absence de modèles quantitatifs, la description des événements cellulaires en langage courant risque d'induire en erreur.

Depuis quelques années, on découvre presque chaque semaine de nouvelles enzymes qui interviennent dans la division cellulaire. On a identifié un complexe de protéines qui déclenche cette division (dans une levure), mais on ignore pourquoi il a cet effet, et comment l'environnement intra- ou extracellulaire l'influence. Pour répondre à ces questions, les biologistes devraient élaborer des modèles numériques de cellules entières ; mais est-ce possible ?

Le fonctionnement du cerveau humain, aussi, reste un mystère. Comment prenons-nous des décisions ? D'où vient l'imagination ? Quelle est la définition de la conscience ? Malgré les progrès considérables effectués par les neurosciences depuis un siècle (sans parler de l'intelligence artificielle), nous sommes peu avancés dans la compréhension des processus cognitifs. Toute la difficulté

réside dans l'identification des types de comportement des neurones du cerveau correspondant au processus de prise de décision ou à d'autres activités cognitives. Peut-être en existe-t-il plusieurs pour chaque activité cognitive, ce qui compliquerait encore la tâche, mais rien ne laisse craindre que le problème soit insoluble. Les animaux prennent également des décisions (par exemple, les rats placés dans un labyrinthe), sans en être conscients : l'observation et l'expérimentation sont donc possibles. Dans 50 ans, les neurosciences n'auront probablement pas encore répondu à ces questions.

En physique fondamentale, le problème majeur de l'incompatibilité entre la mécanique quantique et la théorie de la gravitation risque également de rester entier pendant le prochain demi-siècle. Toutes les tentatives de «quantification» du champ gravitationnel, depuis 20 ans, ont été des échecs. Pourtant, sans pont entre ces deux théories, qui comptent parmi les plus grands succès de notre siècle, on ne décrira pas bien les débuts de l'Univers. Les mêmes problèmes se posent en physique des particules, où, pendant de nombreuses années, les chercheurs ont tenté d'unifier les diverses forces de la nature. Certains pensent que la théorie des cordes établit un lien digne de ce nom, mais d'autres sont moins optimistes, après les vagues d'enthousiasme et de déception qui ont marqué les 20 dernières années. Les 50 ans à venir devraient au moins permettre de départager les deux camps.

Les problèmes mathématiques posés par la théorie des cordes seront peut-être résolus avant 2050, mais, de toute façon, on ne saura que dans quelques décennies si cette théorie décrit correctement les particules qui constituent la matière, ou si elle aboutit à une impasse. N'oublions pas qu'au xix^e siècle Michael Faraday prouva expérimentalement que l'électricité et le magnétisme sont deux manifestations du même phénomène, 30 ans avant que Maxwell n'élabore sa théorie de l'électromagnétisme. À l'époque, les mathématiques que Maxwell utilisa figuraient déjà dans les manuels ; aujourd'hui, en théorie des cordes, les physiciens doivent inventer ces mathématiques au fur et à mesure qu'ils progressent. De plus, si la théorie des cordes parvient à unifier la théorie

de la gravitation et la mécanique quantique, elle modifiera notre conception des particules élémentaires. Elle dotera le temps et l'espace d'une sorte de structure microscopique, dont l'échelle sera si petite qu'elle ne pourra être sondée par aucun accélérateur existant ou en projet. Aujourd'hui, cependant, aucune donnée expérimentale ne conforte cette hypothèse ; soyons patients.

Nous nous plaisons à penser que le rythme des découvertes s'accélère, mais, dans certains domaines scientifiques, les objectifs ne semblent accessibles que lentement et au prix d'un énorme travail collectif. Par exemple, les engins spatiaux qui explorent le Système solaire sont en général conçus une dizaine d'années avant leur lancement. La sismologie, un siècle après sa naissance, dispose enfin de techniques de mesure et d'analyse assez sensibles pour élaborer une carte de l'intérieur de la Terre. Celle-ci montrera les panaches ascendants de roches du manteau qui régissent les mouvements des plaques tectoniques à la surface de la Terre. Depuis les années 1960, les biologistes moléculaires se sont efforcés de comprendre le mécanisme de régulation des gènes dans les organismes vivants, mais ils n'ont pas encore réussi, même avec la plus simple des bactéries. Nous serons heureux si les manifestations neuronales de la pensée sont identifiées au cours du prochain demi-siècle. Les applications de ce que nous savons déjà apparaîtront dans les prochaines décennies, mais nous aurons beaucoup de mal à résoudre de nombreux problèmes essentiels.

Nous ne sommes pas non plus au bout de nos surprises. La découverte d'autres êtres vivants dans la Galaxie bouleverserait notre perception de la place que nous occupons dans la nature. D'autres découvertes moins retentissantes, mais dont la nature est complètement imprévisible, jalonnent sans doute aussi le prochain demi-siècle, passionnant les spécialistes de toutes les disciplines et changeant la vie de chacun d'entre nous.

John MADDUX a été professeur de physique théorique à l'Université de Manchester jusqu'en 1956, puis il a été rédacteur en chef de la revue *Nature* jusqu'en 1995.
