

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-

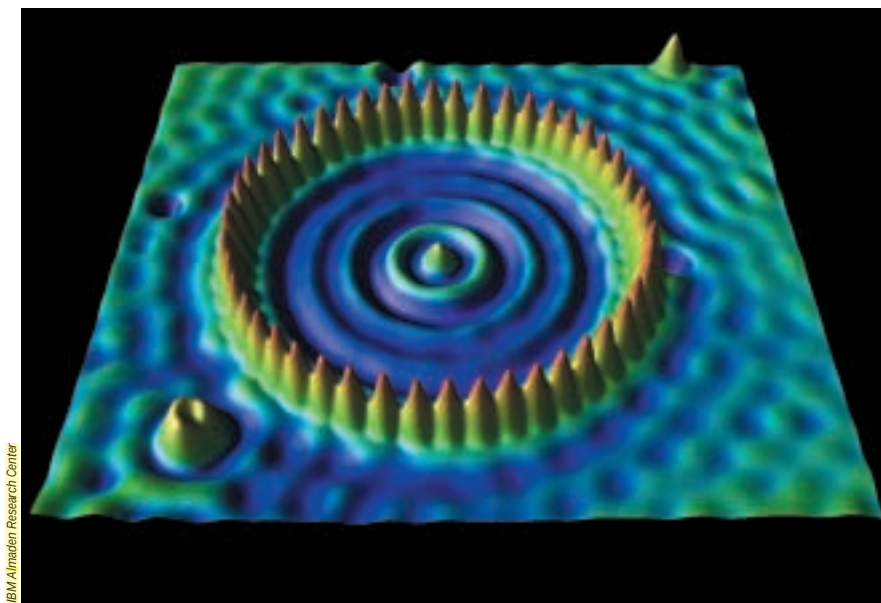
rition de la photosynthèse et des organismes multicellulaires. On a aujourd'hui établi que de tels organismes existent depuis plus de 2,5 milliards d'années.

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