

¶ L'ordre du vivant est situé à l'échelle des molécules. ¶ A l'instar d'un texte écrit au moyen d'un alphabet, un code moléculaire transmet des instructions. ¶ La métaphore alphabétique est à la base de l'étude actuelle des génomes. ¶ Ce qui est transmis au cours des générations n'est pas la mémoire de l'objet, mais son algorithme de construction. ¶ Ce qui évolue, c'est l'algorithme.

# ÉTAIT L'ORDRE AU DÉBUT, DES GÈNES

Qu'est-ce que la vie ? Quelle est la différence entre l'ordre du minéral, celui des cristaux, et l'ordre du vivant ? Comment le second est-il né du premier ? En 1944, le physicien Erwin Schrödinger ouvre l'ère de la biologie moléculaire grâce à une hypothèse géniale : un « cristal aperiodique », ni répétition ni hasard, serait le support de l'hérédité.

**Antoine Danchin**  
est chercheur au CNRS  
et à l'Institut Pasteur.  
Il dirige le Hong Kong  
University Pasteur Research  
Centre, à Hong Kong.  
[adanchin@hkucc.hku.hk](mailto:adanchin@hkucc.hku.hk)

L'ANNÉE 1970 EST MARQUÉE PAR UN livre qui fit sensation, *Le Hasard et la Nécessité*, écrit par Jacques Monod, alors récent lauréat du prix Nobel de médecine. Peu après, François Jacob publie *La Logique du vivant*, qui illustre en profondeur le concept de programme génétique. Incontestablement, il y avait là une réflexion nouvelle sur la nature de l'ordre qui sous-tend la matière vivante. Déclenchée par la citation curieusement apocryphe mise en épigraphe du livre de Monod (voir l'encadré : « Un contresens fâcheux, p. 15), une longue série de débats s'ensuivit autour du rôle du hasard dans l'existence de la vie. Entre les partisans de « l'ordre par l'ordre » et ceux de « l'ordre par le bruit », la confusion régna longtemps... et règne encore !

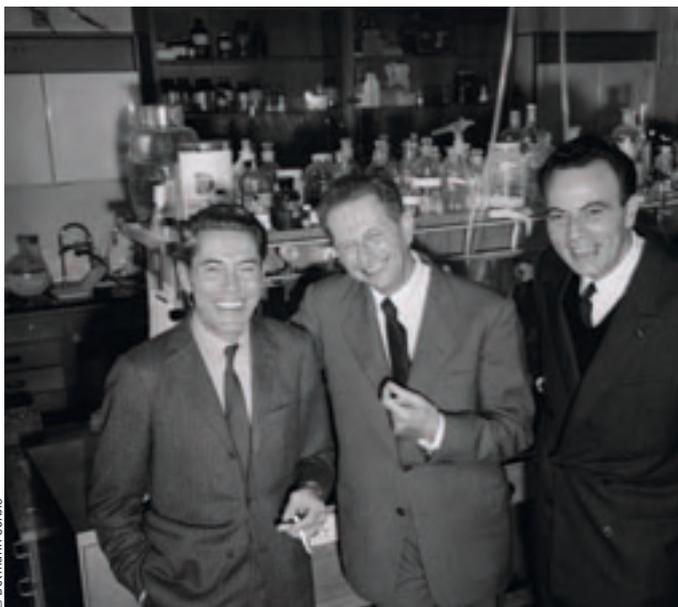
De fait, dès qu'on tente de réfléchir à la nature de ce qui fait la vie, des mots impliquant une certaine idée d'« ordre », d'organisation, viennent immédiatement à l'esprit. Monod commence d'ailleurs son livre par cette interrogation : comment reconnaît-on aisément qu'un fossile de pierre est la trace d'un organisme vivant et non une simple concrétion minérale ?

Ce qui, au tournant du XIX<sup>e</sup> siècle, est devenu la « génomique », la nouvelle science de l'hérédité, est un avatar de ce qu'on appelait

naguère la « biologie moléculaire », science qui place l'ordre biologique à l'échelle des molécules, alors que la physique plaçait l'accent sur les atomes. Cette biologie, dont Jacob et Monod furent pionniers, combine des éléments de génétique, de chimie, et une réflexion conceptuelle issue d'un champ de recherche inattendu. Bien que ce soit parfois oublié, ce sont en effet des physiciens qui ont introduit le ferment d'une discussion profonde sur la vie, centrée sur le concept d'ordre à l'échelle moléculaire : en particulier Max Delbrück\* et Erwin Schrödinger, surtout connu pour sa description mathématique de la structure de l'atome et des molécules, *via* une équation universelle (qu'on ne sait résoudre, même aujourd'hui, que pour un très petit nombre d'atomes).

Schrödinger a résumé sa réflexion en 1944 dans *What is Life?*, un « petit » livre qui fit sen-

\***MAX DELBRÜCK** (Berlin, 1906 - Cologne, 1981) s'intéresse à la biologie à partir d'un argument de Niels Bohr sur le rôle du principe de complémentarité en physique quantique. Son bref travail sur la genèse des mutations est rendu célèbre par le *What is Life?* de Schrödinger. Fuyant le nazisme, il complète ce travail avec Salvador Luria en une expérience désormais très célèbre. De retour en Allemagne après la guerre, il fonde un département de génétique à l'université de Cologne.



© Bettmann, Corbis

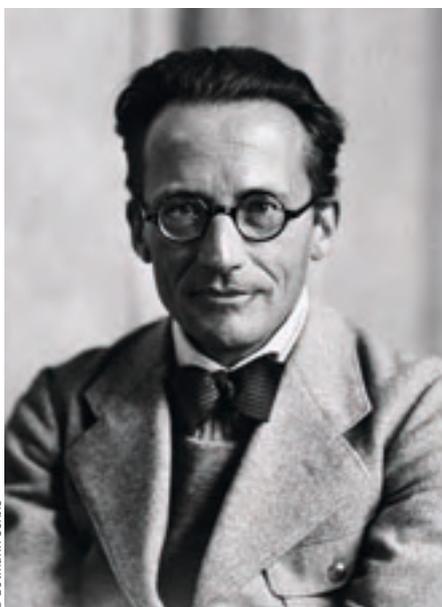
**Jacques Monod** (à gauche, ici en compagnie de ses collègues du prix Nobel 1965 André Lwoff et François Jacob), a fait la majeure partie de sa carrière à l'Institut Pasteur. Son célèbre livre, *Le Hasard et la Nécessité*, ébauchait une féconde réflexion que son décès, en 1976, l'a empêché de développer.

« Toutes choses dans la nature sont le fruit du Hasard et de la Nécessité. » Démocrite

## UN CONTRESENS FÂCHEUX

Ainsi s'inscrit en épigraphe du livre de Jacques Monod ce qui aurait pu être une citation du fameux atomiste. Mais cette phrase ne se trouve pas dans le peu qui reste de ce philosophe présocratique ! La seule phrase qui s'en approche est l'un des deux fragments attribués au maître présumé de Démocrite, Leucippe : « *Aucune chose ne vient à l'existence par soi-même et sans cause, mais tout est le fruit d'un ordre [logos] et sous l'empire de la nécessité.* »

Qu'un lapsus de mémoire ait remplacé « logos » par « hasard » n'est pas anodin ! C'est que la pensée atomiste est subtile. Elle ne croit pas au hasard *a priori*, mais à l'aptitude des choses à se mouvoir par elles-mêmes, et, par leurs rencontres, à provoquer de nouvelles choses, qui apparaissent soudain. Ces choses ne sont donc pas prévisibles, mais explicables, comme le résultat de l'ordre des choses, *a posteriori*. Elles peuvent être à la fois déterminées et imprévisibles. La confusion sur la nature de la contingence correspondante a fait croire à une tradition de pensée superficielle que le hasard était générateur d'ordre. ◇



© Bettmann, Corbis

**Erwin Schrödinger** (Vienne, 1887 - Vienne 1961), après avoir enseigné à Berlin, part pour l'Angleterre pour fuir le nazisme, puis s'installe à Dublin. Son livre *What is Life ?* a été à l'origine de la vocation pour la biologie d'une kyrielle de chercheurs qui ont créé la biologie moléculaire.

sation. Ce physicien autrichien, alors réfugié en Irlande, essaie de comprendre en quoi la biologie diffère de la physique habituelle. Par quelle magie les propriétés de la vie, son hérédité en particulier, peuvent-elles s'insérer dans le monde physique ordinaire ? A la suite de Delbrück, il montre qu'un ensemble d'atomes faiblement liés entre eux ne pourrait répondre à la question, et qu'il faut donc considérer un ordre supérieur d'organisation, celui des molécules. A l'ordre des atomes succède l'ordre des molécules. Mais quelles sont leurs propriétés ?

### L'IDÉE D'UN CODE

**MOLÉCULAIRE.** Ce qui est remarquable dans la pensée de Schrödinger, et qui a eu une grande influence sur la création de la biologie moderne, se résume ainsi : par un pur raisonnement logique, et avant qu'on connaisse la structure de la molécule qui porte l'hérédité génétique, l'ADN, il a pu fidèlement en présenter la nature exacte. Sa réflexion part d'une analyse de l'ordre minéral — celui des cristaux — pour montrer que la vie en conserve certains caractères qui, cependant, doivent être considérablement enrichis. Un cristal est caractérisé par un arrangement linéaire de motifs de base, strictement répété, ou périodique. Comment, à partir de cet ordre élémentaire, imaginer un

ordre supérieur ? Schrödinger remarque que, dans les organismes vivants, la matière est systématiquement dupliquée, en particulier la matière des chromosomes : c'est ce qui rend compte de leurs propriétés héréditaires. Il faut donc parvenir, d'une part, à caractériser les processus de duplication, et, d'autre part, à imaginer un mécanisme de mémorisation des propriétés des cellules.

Schrödinger propose qu'il s'agisse d'un système (moléculaire !) utilisant un code. Pour décrire ce code, il va même jusqu'à mentionner l'alphabet Morse utilisé alors en télégraphie. Cela lui permet de rappeler qu'on peut transmettre au moyen de ce code des instructions. Il convient ensuite de repérer concrètement, au sein des structures biologiques qui se dupliquent, en particulier les chromosomes, ce qui porte l'ordre correspondant.

Les structures chromosomiques sont « *le code de loi et le pouvoir exécutif* », écrit Schrödinger. Quel serait l'ordre bizarre permettant l'association de ces deux propriétés ? Pour Schrödinger, un « *cristal apériodique* », ni répétition ni hasard, répondrait à la question. Vu de loin, s'il existe, ce cristal conserve les propriétés de régularité du cristal minéral, mais, à petite échelle, il devient irrégulier. Or, c'est exactement ce que révélera peu après la diffraction des rayons X par

Alors que Schrödinger amorçait une intéressante réflexion sur l'évolution de l'ordre, conduisant de l'ordre minéral à l'ordre vivant, une

## LA MAGIE DE L'« ORDRE PAR LE BRUIT »

filiation tout autre, fondée sur un contresens à propos de la théorie de la communication développée par les remarquables travaux de l'ingénieur américain

Claude Shannon, en parallèle avec la toute nouvelle cybernétique de Norbert Wiener, consacrait l'idée du rôle de la génération de l'« ordre par le bruit ». Notons que Shannon lui-même était tout à fait réticent vis-à-vis de cet avatar de sa théorie. C'est peut-être un autre physicien d'origine autrichienne travaillant à l'université de l'Illinois à Urbana, Heinz von Förster, qui est à l'origine de l'idée simpliste que l'ordre naît du chaos (comme dans bien des mythes religieux, il est vrai).

Von Förster imagine un espace rempli de petits aimants, répartis de façon aléatoire, sans ordre apparent. Et dans ce monde fictif, il introduit un peu d'agitation (le « hasard » ou « bruit »). On voit immédiatement que, du fait de leurs propriétés d'attraction et de répulsion, les aimants s'organisent en une série de chaînes plus ou moins longues, et même parfois branchées. Il affirme alors que ces chaînes représentent un ordre, et que cet ordre s'est créé par le bruit. Ce raisonnement spéculatif et ignorant de la physique des choses a eu un grand écho en France<sup>(3)</sup>.

On pourrait rire de cet exemple s'il n'avait eu un succès considérable : que montre-t-il en effet ? Rien d'autre que le fait qu'un état métastable (la répartition initiale des aimants de von Förster est évidemment très instable) va évoluer vers un état plus stable, dont la nature est du reste prédéterminée. Il existe en général un grand nombre de ces états, tous plus ou moins équivalents du point de vue énergétique. Cette expérience est donc très « platonicienne » en ce sens qu'elle montre que la nature ne fait que retrouver des archétypes, qui peuvent être nombreux.

L'ordre en question n'est rien d'autre qu'un ordre énergétique préexistant, sous la forme de minima de potentiel. Il n'a rien à voir avec l'intéressant ordre biologique dont Schrödinger et Monod souhaitaient amorcer l'étude. Cet ordre-là est le résultat d'une véritable création, en ce sens qu'il est irréductible à l'ordre qui lui a donné naissance. Une étude sociopolitique du succès de cette métaphore dans les pays latins reste à faire, mais il est probable que l'idéologie de la dégradation, bien visible chez Schrödinger, y est pour beaucoup. La thèse d'un jeune historien, Jérôme Segal, apporte de nombreux éclaircissements à ce sujet<sup>(4)</sup>. ◇

des fibres d'ADN (voir photo ci-dessus) : on voit en effet des taches de diffraction très précises, qui indiquent l'existence d'une périodicité d'objets régulièrement espacés de 3,4 angströms, tandis qu'à plus courte distance aucune tache n'indique que la période serait conservée pour des objets plus petits (des atomes, par conséquent).

### L'ADN, CRISTAL

**APÉRIODIQUE.** En 1953, la découverte de la structure de l'ADN en « double hélice » explique la figure de diffraction et confirme cette vision, tout en suggérant le mécanisme de transmission de l'hérédité, dont Schrödinger n'avait aucune idée. Ainsi, l'ordre dans l'ADN est à la fois l'ordre régulier, géométrique, de la trame des sucres désoxyribose liés par une liaison chimique et l'ordre, non géométrique mais plus profond, de l'enchaînement des quatre « bases » qu'il porte, A (adénine), T (thymine), G (guanine) et C (cytosine). Il y a bien un « cristal apériodique ».

Comme le remarque Schrödinger, il faut penser que de l'ordre a créé un ordre supérieur, donc que quelque chose dans sa nature même peut changer au cours du processus de duplication. Observons des cristaux : ensemencer une solution saturée de sel de cuisine avec un petit cristal donne naissance à des cristaux identiques, plus ou moins gros, plus ou moins nombreux suivant la nature de l'environnement, mais de même type. Or ce qui apparaît chez les organismes vivants, c'est à la fois une évidente reproduction d'organismes semblables, mais aussi une infinie variété. Ils sont donc unités de reproduction – comme les cristaux –, et unités d'évolution.

Mais comment, d'un ordre minéral simpliste, parvenir à l'ordre compliqué du cristal apériodique ? Nous le savons aujourd'hui, et c'est la base de la métaphore alphabétique qui préside à l'étude des génomes : l'ordre en question est le même ordre que celui qu'on trouve

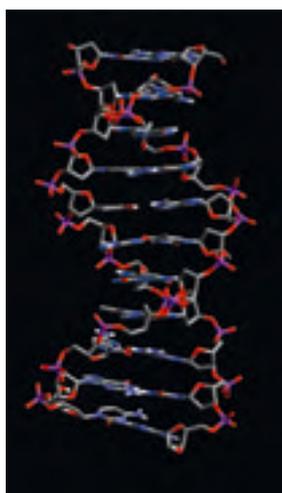
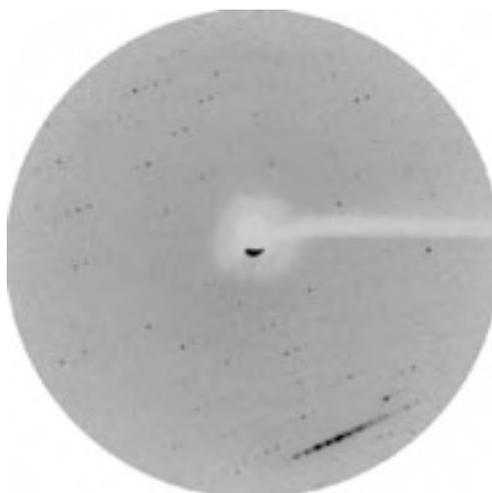


© Nature

Avec cette image d'une fibre d'ADN, obtenue par diffraction de rayons X, Rosalind Franklin démontre en 1953 le bien-fondé de l'intuition de Schrödinger : la matière des chromosomes est dotée d'une structure dont les caractéristiques sont celles d'un cristal (espacement régulier des taches à une certaine distance : 3,4 angströms) apériodique (absence de taches à plus courte distance).

dans un texte écrit au moyen d'un alphabet. Un observateur superficiel peut croire qu'il s'agit d'une forme de hasard. Mais il n'en est rien. On n'obtient pas le texte d'un génome en mélangeant au hasard ses bases, de même qu'on ne produirait pas un texte compréhensible en tapant n'importe comment sur un clavier ; on l'obtient bien à partir d'un génome parental, qui avait déjà un ordre certain. On reste ainsi dans le paradigme de Schrödinger, l'ordre créant l'ordre, tout en le modifiant, en le faisant évoluer. L'analyse de la métaphore alphabétique du texte génétique, qui s'apparente à l'étude des suites de symboles, ou à celle des nombres entiers, s'inscrit dans le prolongement des travaux qui, dans la première moitié du xx<sup>e</sup> siècle, ont vu le remaniement révolutionnaire de la théorie des nombres en mathématiques, puis l'invention des ordinateurs. L'ordre en question, très riche mais souvent difficile à identifier, est de même nature que celui des programmes, ou des algorithmes (1).

L'exploitation concrète des conséquences de cette réflexion a permis le génie génétique et toutes les prouesses de la reprogrammation consciente de l'hérédité des organismes vivants. Une fois qu'on a compris l'adéquation de la métaphore alphabétique, en effet, il est possible de procéder avec un génome comme si



© S.A. Subramaniam/EPC

Un demi-siècle après les travaux pionniers de Rosalind Franklin, la cristallographie permet aujourd'hui de révéler avec finesse l'ordre d'un morceau de cristal d'ADN : à partir d'une centaine d'images (à gauche), un calcul transforme l'information portée par les taches de diffraction en une figure (à droite) qui donne accès aux variations locales de la structure et à l'enchaînement des bases de l'ADN.

l'on disposait d'un logiciel de traitement de texte. C'est que la métaphore est si puissante qu'il est possible de manipuler l'objet physique correspondant, typiquement en procédant par « couper-coller ». Comme ce programme peut être – concrètement – réintroduit dans les cellules, on peut ainsi créer des bactéries produisant des protéines humaines (c'est le succès de l'hormone de croissance « recombinée », qui évite les terribles accidents liés à l'extraction de l'hormone humaine) ou fabriquer des « organismes génétiquement modifiés » végétaux, ceux-là mêmes qui font couler tant d'encre et provoquent tant d'invectives...

La difficulté pour Schrödinger était de comprendre d'où vient l'évolution. Il réfléchit longuement sur la nature des mutations et, 1944 oblige, spéculait sur l'inéluctable dégradation du monde qu'elles causent. C'est là sans

doute la partie la plus « datée » de son livre, et cela correspond à un autre point d'entrée (la réflexion sur le désordre est un poncif classique) qui explique peut-être le succès autrement surprenant de l'idée d'« ordre par le bruit » (voir l'encadré : « La magie de l'« ordre par le bruit » », p. 16).

#### LES SENS

**DE LA COMPLEXITÉ.** Le mot « ordre » est générateur d'ambiguïtés parce que la régularité peut être effectivement difficile à remarquer, mais aussi parce qu'elle est liée à la signification qu'on lui prête. On peut souvent voir une régularité là où on le souhaite, en projetant sur un phénomène son propre schéma mental. Comment nier que l'ordre possède une dimension morale ou esthétique ? Il suffit de considérer ses antonymes : désordre, irrégularité, chaos, complexité, confusion, mélange, enchevê-

\***ROLF LANDAUER** (Stuttgart, 1927 - New York, 1999), fuyant le nazisme au moment de la Seconde Guerre mondiale, a fait toute sa carrière chez IBM. Son article de 1961 sur la relation entre énergie et information est à la base des travaux de Charles Bennett. Ces travaux prouvent que la création d'information ne consomme aucune énergie, contrairement à l'idée reçue. Son article fondamental, publié dans *Physics Review Letters* en 1975, prouve par ailleurs que les systèmes matériels n'évoluent pas en minimisant leur production d'entropie.

trement, dérèglement, anarchie... Comme « ordre », dont il est un des avatars et qu'il remplace souvent, le mot de « complexité », aujourd'hui très à la mode, signifie par exemple des choses diamétralement opposées. Faut-il entendre que le phénomène est d'un ordre très riche et très compliqué parce qu'il est hautement organisé mais comporte de multiples éléments (d'un nombre dépassant l'entendement), ou tout au contraire, parce qu'il est très embrouillé, très désordonné ? Tous ces mots sont tellement chargés de sens, parfois contradictoires, que leur emploi incontrôlé engendre vite la confusion.

Au cours de la décennie qui a suivi la découverte de l'ADN, il est apparu fondamental de comprendre le lien entre le « texte » et son expression concrète dans la cellule. C'est ici que la contribution de Jacob et Monod prend tout son sens : dans un livre de recettes, il ne s'agit pas de les mettre en œuvre toutes en même temps, mais de les exprimer à bon escient. On trouve là l'idée centrale de régulation de l'expression des gènes, qui s'est développée jusqu'à nos jours.

Deux lignes de recherche, aussi fécondes que discrètes, sont venues compléter la réflexion de Schrödinger, Jacob et Monod pour donner lieu aux extraordinaires développements de ce qui est devenu l'étude de l'ADN, la génomique, et de ce qu'on appelle aujourd'hui la « génomique fonctionnelle », son avatar où l'idée d'expression des gènes prend le pas sur l'étude du seul texte du génome.

#### PHYSICIENS ET THÉORIE

**DE L'INFORMATION.** Tout d'abord, une réflexion sur la nature de l'information, qui sera celle contenue dans le programme génétique, a été menée en profondeur, à nouveau par des physiciens : en 1961, par l'ingénieur d'IBM Rolf Landauer\*, le père de la technologie C-MOS et de la diode laser utilisée dans nos imprimantes ; en 1988, par Charles Bennett, le père de l'ordinateur quantique ; et, dès le milieu des années 1950 mais dans une indifférence presque totale, par Hubert Yockey, ancien membre du projet Manhattan de construction de la première bombe atomique, qui s'est tourné vers la biologie des mutations après avoir étudié les effets de l'irradiation des organismes vivants.

En résumé, ces auteurs cherchent non pas à savoir comment un message privé de sens se communique, comme le voulait Claude Shannon (voir l'encadré : « Les réticences d'un fondateur », p. 18), mais s'intéressent à la nature du contenu en information des suites de symboles considérées de façon algorithmique. Ils l'analysent à la fois dans l'espace, c'est-à-dire en s'interrogeant sur la signification

LA RECHERCHE a publié :  
(I) A. Danchin,  
D. Mange, « L'autonomie  
des êtres vivants »,  
n° 350, février 2002.

Claude Shannon [Gaylord, Michigan, 1916 - Medford, Massachusetts, 2001] est à l'origine de toute la théorie moderne de la communication. Curieusement, un avatar qu'il trouvait passablement ridicule l'a fait connaître en dehors des cercles où s'exerçait son immense compétence.

## LES RÉTICENCES D'UN FONDATEUR

« Nos collègues chercheurs de différents domaines, attirés par la fanfare [du succès de sa théorie de l'information], et par les nouvelles voies ouvertes à l'analyse scientifique, utilisent ces idées pour leurs problèmes particuliers. On en tire des applications en biologie, en psychologie, en linguistique, en physique fondamentale, en économie, pour la théorie de l'organisation, et pour toutes sortes d'autres choses. En bref, la théorie de l'information est en train de prendre la tête d'un courant grisant de popularité générale. Bien que cette vague de popularité soit agréable et vivifiante pour ceux d'entre nous qui travaillent dans le domaine, elle recèle en même temps un certain danger. Alors que nous pensons que la théorie de l'information est certainement un outil utile, qui apporte un regard fondamental sur la nature des problèmes de la communication, et qu'elle prendra de plus en plus d'importance, ce n'est certainement pas une panacée pour l'ingénieur en communication, et a fortiori, encore moins pour quiconque. Il n'y a guère de secrets de la nature qui cèdent tous au même moment. Et il n'en sera que plus facile de la voir se dégonfler du jour au lendemain quand on se rendra compte que des mots comme information, entropie, redondance, ne sont pas la solution à tous nos problèmes. »<sup>(5)</sup> ◇

de la longueur du message, mais aussi dans le temps: quel est le degré de superposition des événements qui conduisent au message tel qu'on le lit aujourd'hui? Pour prendre une analogie dans la langue française, un mot quelconque est toujours chargé d'une histoire qui joue un rôle dans son sens actuel: le verbe «navrer», par exemple, a d'abord signifié «blesser en coupant», puis «causer une grande tristesse», puis «contrarier», etc. Mis en œuvre sur les nombreux génomes dont les séquences sont désormais connues, ces concepts sous-tendent les efforts actuels visant à comprendre les relations entre le texte de l'ADN et l'architecture d'une cellule ou d'un organisme.

La seconde ligne de recherche, menée dans divers pays<sup>(1)</sup>, s'est ancrée parallèlement dans une réflexion sur l'origine de la vie. Elle accorde le premier rôle au métabolisme\*, dont l'ordre a lui aussi à se dupliquer, au-delà du programme génétique. L'idée centrale est que, pour rendre compte de la vie, il faut associer la reproduction et la mémoire de trois processus, simultanément: le métabolisme, la formation des membranes et enveloppes des cellules, et l'ADN, tous trois se répliquant et évoluant continuellement. Comment imaginer leur genèse? Il faut envisager un métabolisme qui, se déroulant à la surface d'un support, d'abord solide,

puis fait des ancêtres moléculaires de l'ADN, crée à la fois l'ADN et les enveloppes qui vont isoler l'ensemble de l'extérieur, tout en assurant la reproduction. Ainsi, partant de transformations moléculaires à la surface des pierres, une suite de structures organisées, évoluant en structures de plus en plus élaborées, aurait remplacé les solides par des acides nucléiques, les aurait compartimentés et aurait abouti aux cellules telles que nous les connaissons aujourd'hui.

La notion d'«ordre biologique» est au centre de ces travaux. Cet ordre n'est évidemment pas le résultat de la simple juxtaposition de motifs identiques, mais leur combinaison. L'erreur commune, qui explique bien des contresens, est de confondre qualitatif et quantitatif. Les penseurs superficiels imaginent que c'est la longueur totale du livre de recettes, ou la quantité des gènes, qui va de pair avec l'accroissement de l'ordre biologique. Il n'en est rien, bien sûr, comme peuvent s'en convaincre tous ceux qui ont eu à construire des objets compliqués à partir de peu d'éléments de base. Le jeu de Meccano, remplacé aujourd'hui par le Lego, n'utilisait que quelques types de boulons, de traverses et de plaques, et permettait la construction d'une infinité d'édifices, parfois très élaborés.

## GÈNES ET COMBINAISONS

**DE LA LOGIQUE.** De façon similaire, dans les organismes vivants, une combinatoire de symboles se révèle capable de produire, comme le font les grammaires, des textes qui, placés dans un contexte approprié, ont une signification. Cette signification est de plus incarnée dans des objets physiques, ceux qui permettent le contrôle – idée biologique centrale – de l'expression des gènes. De fait, on trouve aujourd'hui de plus en plus de travaux qui démontrent comment, concrètement, il est possible de réaliser les choix compliqués de la combinatoire des gènes. C'est par exemple ainsi qu'on reconstitue, au sein d'une bactérie, les équivalents des «portes logiques» des microprocesseurs, c'est-à-dire des ensembles de gènes se combinant de façon à produire des réponses du type «on», quand l'un ou l'autre des gènes est «on», voire seulement quand l'un et l'autre des gènes sont «on», et ainsi de toutes les combinaisons de la logique<sup>(2)</sup>.

On retrouve d'ailleurs à la base de ces travaux les recherches de Jacob et Monod, puisqu'ils avaient précisément établi les bases du contrôle de l'expression génétique. Le résultat en est qu'on peut désormais comprendre non seulement comment les cellules isolées se débrouillent dans un environnement infiniment variable, mais aussi comment l'œuf se différencie en cellules spécialisées, jusqu'à conduire aux organismes adultes que nous connaissons. Il ne s'agit plus de retrouver un ordre préexistant, comme le voulait la préformation, mais bien de comprendre comment il se construit.

En résumé, ce qui est transmis au cours des générations n'est pas la mémoire de l'objet, mais son algorithme de construction. Et ce qui évolue, c'est cet algorithme. Le futur sera de comprendre dans quelles limites cela peut se faire, car, bien sûr, les mutations altèrent sans cesse le sens du programme. Mais, puisque métaphore alphabétique il y a, les contrepèteries, chères à Raymond Queneau, ne sont-elles pas là pour nous faire comprendre qu'un sens peut en cacher un autre? A.D. ◆

### POUR EN SAVOIR PLUS

- ◇ E. Schrödinger, *Qu'est-ce que la vie?*, Seuil, coll. «Points science».
- ◇ F. Jacob, *La Logique du vivant*, Gallimard, coll. «Tel n° 2»;
- ◇ *La Souris, la mouche et l'homme*, Odile Jacob poche, 2000.
- ◇ J. Monod, *Le Hasard et la Nécessité*, Seuil, coll. «Points Essais».
- ◇ A. Danchin, *La Barque de Delphes*, Odile Jacob, 1998.

www.larecherche.fr

### \* MÉTABOLISME :

ensemble des transformations chimiques et physico-chimiques qui s'accomplissent dans tous les tissus de l'organisme vivant (dépenses énergétiques, échanges, nutrition...).

### RÉFÉRENCES

- (1) S. Granick, *Annals New York Acad. Sci.*, 69, 292, 1957;
- G. Cairns-Smith, *Genetic Takeover and the Mineral Origin of Life*, Cambridge University Press, 1982;
- Mic. Rev.* 52, 452, 1988;
- A. Danchin, *Une aurore de pierres*, Seuil, 1990;
- E. Szathmari,

- J. Maynard-Smith, *The Origins of Life*, Oxford University Press, 1999.
- (2) Gardner et al., *Nature*, 403, 339-342, 2000.
- (3) *L'Unité de l'homme* (coll.), centre Royaumont pour une science de l'homme, Seuil, 1974.
- (4) J. Segal, *Théorie de l'information : sciences,*

- techniques et société de la Seconde Guerre mondiale à l'aube du XXI<sup>e</sup> siècle* (disponible sur le web: www.mpiwg-berlin.mpg.de/staff/segal/thesis).
- (5) C. E. Shannon; «The Bandwagon», *IRE Transactions on Information Theory*, vol. II, n° 3, 1956.