SPOT
SCIENCES

Luciano Paolozzi

Avec la participation de Françoise Joset

Vivre dans l'impossible

La vie dans les conditions extrêmes



edp sciences

Vivre dans l'impossible

La vie dans les conditions extrêmes

SPOT SCIENCES

Luciano Paolozzi

Vivre dans l'impossible est un voyage virtuel à travers les confins de la biosphère, à la découverte d'environnements où la vie semblerait *a priori* exclue en raison de conditions prohibitives pour la grande majorité des plantes et des animaux, et pour nous-mêmes, tels déserts, lacs salés, glaciers, intérieurs de roches, profondeurs terrestres, ou abysses océaniques, dont l'apparence désertique est en fait trompeuse. En effet, des organismes vivants, en particulier des micro-organismes, sont présents dans une variété étonnante de ces environnements. Leur existence soulève la question des limites entre viabilité et non-viabilité de ces lieux « extrêmes » de notre planète, et apporte des éléments de réflexion nouveaux à la question récurrente de l'existence et de la nature d'éventuels êtres vivants dans d'autres lieux de l'Univers. Ceci pose la question de la notion d'« être vivant », développée en début et fin de notre voyage.

Ce livre, une introduction à la problématique de la recherche de vie dans l'Univers, n'étant pas destiné à des spécialistes, propose un minimum de données de base en biologie et en astronomie.

Luciano Paolozzi a enseigné la microbiologie générale et la génétique microbienne à l'Université Tor Vergata de Rome. Formé à l'Université de Paris, Faculté des Sciences d'Orsay, son activité de recherche en génétique et biologie moléculaire dans le domaine des micro-organismes s'est déroulée à l'Institut Pasteur de Paris et au Centro Nazionale delle Ricerche, puis principalement à l'Université de Rome. Outre ses publications scientifiques dans des revues spécialisées, il est l'auteur d'ouvrages didactiques (y compris en français) et de vulgarisation scientifique.

ISBN :
978-2-7598-3071-8

9 782759 830718

edp sciences
www.edpsciences.org

Vivre dans l'impossible

Vivre dans l'impossible

La vie dans les conditions extrêmes

LUCIANO PAOLOZZI

Avec la participation de Françoise Joset

edp sciences

17, avenue du Hoggar – P.A. de Courtabœuf
BP 112, 91944 Les Ulis Cedex A

SPOT Sciences

Collection destinée à un large public qui invite le lecteur à découvrir à travers des essais toute une palette des sciences : histoire, origines, découvertes, théories, jeux…

Dans la collection

« L'odorat des animaux – Performances et adaptations », G. Brand, 978-2-7598-2793-0 (2023)

« La plus grande énigme de l'astronomie – De Newton et Einstein à l'énergie et matière noires », A. Maeder, 978-2-7598-2921-7 (2023)

« L'Univers millefeuille – Le cosmos, la biosphère et la société s'auto-organisent », M. Galiana-Mingot, 978-2-7598-2749-7 (2022)

« Les "deux nouvelles sciences" de Galilée » – Une lecture moderne, A. De Angelis, 978-2-7598-2667-4 (2022)

« La vie ailleurs : espérances et déceptions », J. Lequeux et T. Encrenaz, 978-2-7598-2641-4 (2022)

« Grandes controverses en astrophysique », S. Collin-Zahn, 978-2-7598-2613-1 (2021)

« Sexualité, génétique et évolution des bactéries », J.-P. Gratia, 978-2-7598-2538-7 (2021)

« La pensée en physique – Diversité et unité », J.-P. Pérez, 978-2-7598-2481-6 (2021)

« L'histoire du cerveau – Voyage à travers le temps et les espèces », Y. Gahéry, 978-2-7598-2479-3 (2021)

« Les clés secrètes de l'Univers – Émergence de l'Univers, de la vie et de l'Homme », M. Galiana-Mingot, 978-2-7598-2534-9 (2021)

Composition et mise en pages : Flexedo
Couverture : Conception graphique de B. Defretin, Lisieux

Imprimé en France
ISBN (papier) : 978-2-7598-3071-8
ISBN (ebook) : 978-2-7598-3072-5

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.
© EDP Sciences, 2024

SOMMAIRE

Prologue 9
Avant-propos 19
Abréviations et sigles utilisés dans l'ouvrage 21

1. Qu'est-ce qu'un organisme vivant ? 25
Unité, unicité et lois régissant le monde vivant 26
La cellule vivante : un mille-milliardième de tête d'épingle 31
Unicellularité et pluricellularité, deux modèles d'organisme 37
La classification du vivant 38
Un aperçu du monde microbien 43
Les molécules prébiotiques et l'origine de la vie 49
Qu'est-ce que la vie ? 51
2. Au sein du Système solaire : la Terre 55
Le Soleil 57
Le Système solaire : les corps en orbite autour du Soleil 61
Structure de la Terre : encore beaucoup à découvrir 76
L'espace interstellaire (EI) 92
Moyens d'étude et acquis de connaissances : des histoires parallèles 95
3. La biosphère 101
Caractéristiques générales 102
Les environnements continentaux immédiats : les sols 106
Les environnements aquatiques 115
La zone gazeuse : la basse atmosphère 125
Les environnements extrêmes 126
4. L'énergie du vivant et la production de matière organique 129
Les besoins du vivant 130
Les voies de synthèse de la production primaire : les groupes trophiques 144
Comment les organismes vivants se construisent 149
Qui mange qui, qui est mangé à son tour ? Chaînes et réseaux trophiques 153
Cycles biogéochimiques et conservation de la matière 156
Des systèmes nutritifs basés sur des interactions – la symbiose 159
5. Les sols des zones tempérées, habitats d'une vie intense 169
Un écosystème complexe, riche et dynamique 170
Système racinaire des végétaux et rhizosphère 175

La faune du sol : une extraordinaire biodiversité cachée 177
Le microbiote du sol 180
6. À la découverte des fonds marins 187
Les débuts de l'exploration sous-marine 189
Voyages vers l'obscurité des abysses 193
Les paysages abyssaux 197
La vie malgré tout 202
7. Vivre dans les abysses 211
Les fonds marins : des pseudo-déserts oasis de vie 211
La maîtrise de la pression 222
Réponses à l'oligotrophie : chimio-lithoautotrophie et symbiose 228
La gestion de l'obscurité – les jeux avec la lumière 237
8. Les profondeurs terrestres 243
Les environnements hypogés en tant que biotopes 245
Des aquifères habités 247
Les grottes et leurs écosystèmes 249
Vers le centre de la Terre : une biocénose profonde 254
Et sous le plancher des océans, encore de la vie ! 259
9. Là où le sel tue : les biotopes hypersalins 263
Le sel dans les écosystèmes 264
Les sels, tellement nécessaires et si dangereux pour la vie 268
Les mécanismes physiologiques de l'adaptation à la salinité 270
Les sites hypersalins : paysages et habitabilité 276
La mer Morte, un laboratoire naturel pour étudier des halophiles ... 286
10. Les déserts, là où tout semble non-vie 295
Aridité et sable, compagnons des déserts 296
Adaptation des organismes à la sécheresse 300
Quelques déserts emblématiques 304
L'Atacama, là où la pluie est plus que rare 310
Le Sahara, le plus grand des déserts chauds 316
11. La vie en dessous de zéro degré 329
L'eau gelée, caractéristique principale des écosystèmes polaires 330
Les régions circumpolaires 337
La vie dans les régions polaires 342
Adaptation des organismes aux basses températures et à la glace ... 350
Le lac Vostok : la vie sous 4 km de glace 354
Isolées depuis 2 800 ans, des bactéries sous la glace pérenne du lac Vida 356
Encore vivants presque au zéro absolu, les tardigrades 358
Le quotidien d'un explorateur en région polaire – Groenland, 1950 360
12. La vie aux « portes des enfers »
Environnements volcaniques et hydrothermaux 363
Les environnements volcaniques continentaux 365
Les multiples facettes du volcanisme dans l'histoire de la Terre 377
Les Champs Phlégréens 385
Le parc naturel de Yellowstone : sources thermales et lacs subalpins 388

13. Sommes-nous seuls dans l'univers ?
Voyage à la recherche de « vie » 393
L'extrêmophilie, une porte d'entrée vers cette quête ? 395
Des hypothèses sur la nature de la vie possible dans l'univers 397
Conditions nécessaires au développement de la vie 403
Seuls dans le Système solaire ? 406
Et au-delà du Système solaire ? 416

Épilogue 423
Sites Internet en relation avec les thématiques de l'ouvrage 427
Remerciements 429

PROLOGUE

On ne connaît bien une science que si l'on en connaît l'histoire.
Auguste Comte, *Cours de philosophie positive*, 1830

14 avril 2023, 4 h 14 (heure de Paris) : la sonde *Ariane 5*, transportant le satellite européen JUICE (*Jupiter Icy Moons Explorer*), a été lancée du centre spatial guyanais (la base française et européenne de lancement) pour une mission vers les lunes glacées de Jupiter. Le but : déterminer si les conditions dans les océans subglaciaires des trois lunes galiléennes sont favorables à la présence de vie. Son arrivée est prévue dans 7 ans, après un parcours de quelque 800 millions de kilomètres. Il est rare, face à une telle « aventure », que l'on pense au chemin historique effectué par la science pour en arriver à ce départ.

Dans l'obscurité de la nuit, le rideau se lève sur le vaste écran de la voûte céleste. Ce spectacle se perpétue depuis des milliards d'années et l'Homme, depuis son apparition sur la Terre, ne cesse de l'observer. Notre émerveillement, malgré notre appartenance à une génération qui vit les conquêtes de l'espace, est sans doute similaire à celui qu'éprouvaient nos ancêtres. Certaines réflexions ou interrogations telles « Y a-t-il de la vie quelque part parmi ces points lumineux ? »,

ou « D'où vient la vie ? » ont dû très tôt commencer à occuper leur pensée. Aujourd'hui encore, nous ne pouvons que débattre sur ces questions, rester dans le domaine des hypothèses. Mais les quelques rayons de lumière qui s'échappent de cette boîte noire percée par la science permettent un certain optimisme. C'est un parcours long, tortueux, difficile, qui a conduit à l'état actuel de notre savoir. Il a requis d'abattre des murs contre des forteresses de croyances infondées, de lutter contre des interdictions imposées par des pouvoirs religieux, pour conquérir des connaissances, et enfin de changer notre perception du monde qui nous entoure et de notre existence.

C'est entre 5 000 et 6 000 ans avant notre ère que de nombreuses civilisations, en Chine, Inde, Mésopotamie, Égypte, Grèce, etc., ont commencé à étudier les corps célestes directement discernables. Toutes à leur façon ont cherché à connaître les origines du monde, ont construit des cosmogonies, à partir d'observations plus ou moins rigoureuses, de croyances et d'interprétations astrologiques. Récapitulons quelques étapes importantes de ce parcours, parmi celles liées à la finalité de notre entretien.

Dans la Grèce Antique, alors que, scrutant le ciel de l'hémisphère nord, des penseurs donnaient libre cours à leur imagination, d'autres cherchaient des explications rationnelles, les causes physiques de leurs observations. Les uns, en reliant les étoiles visibles par des lignes virtuelles, ont cru y voir les contours de formes réelles, projections de leur inventivité. Ils définirent ainsi des constellations, portant des noms d'animaux, de personnages légendaires ou mythologiques, qu'ils nous ont transmis : Capricorne, Cassiopée, Centaure, etc., et y associèrent des mythes, des croyances. Les autres, héritant des savoirs des Babyloniens et des Égyptiens anciens, cherchèrent à déterminer les lois régissant le mouvement des astres, à trouver une explication rationnelle à la création du monde, jetant les fondations de l'astronomie du monde occidental. Les astronomes de cette époque savaient distinguer les étoiles des planètes, avaient démontré que la Lune est éclairée par le Soleil, que l'étoile du Berger, la première à être visible

le soir, et celle que l'on voit à l'aube ne sont qu'un seul et même astre, la planète Vénus, avaient compris que les éclipses de Soleil et/ou de Lune sont dues à l'interposition de la Lune ou de la Terre. L'établissement de la sphéricité de la Terre, bien que non daté, est un concept bien admis par les penseurs de l'époque. Thalès de Milet (né vers 625-620 av. J.-C.), mathématicien, philosophe et géomètre, a une surprenante vision rationnelle de l'Univers. Étudiant le mouvement du Soleil, il détermine à 365,25 jours la durée d'une année (les mesures actuelles donnent 365,2419 jours). Platon (428-348 av. J.-C.) distinguait les mouvements diurne et annuel de la Terre, et a développé le concept de plan de l'écliptique et son inclinaison. Vers l'an 400 avant notre ère, cette période fertile de l'astronomie va subir un lent déclin, laissant comme modèle de l'Univers une construction géocentrique, œuvre d'Aristote (384-322 av. J.-C.). Géant de la pensée humaine, Aristote, le plus brillant étudiant de Platon, domine par son savoir la scène de l'époque, avec pour conséquence que sa pensée va conditionner celle de générations de penseurs et de savants pendant plusieurs siècles.

L'œuvre d'Aristote embrasse philosophie, astronomie, physique, médecine, botanique, zoologie. Il inaugure une science de la nature fondée sur l'étude d'observations directes, d'écrits anciens, de récits de son époque. Il mêle une perception intuitive des phénomènes à l'expérience, le tout passé au filtre du raisonnement. L'Univers, selon lui, est un édifice basé sur trois fondements. (i) La Terre, formée de quatre éléments (eau, air, terre et feu), est au centre d'un univers sphérique. (ii) Deux mondes, nettement distincts, sont séparés par l'orbite de la Lune et régis par des lois différentes. Le monde terrestre, avec son atmosphère, situé sous l'orbite de la Lune, est imparfait, symbole de mouvement continu, d'instabilité, ne répond à aucune loi ; les êtres vivants y naissent, vivent et meurent. Le monde céleste (supralunaire) est immuable, parfait, éternel : rien ne peut s'y créer ni disparaître. (iii) Les mouvements célestes sont obligatoirement circulaires (le cercle étant la figure géométrique parfaite) et uniformes, dans

un modèle géocentrique : la Lune, le Soleil, les planètes et les étoiles sont fixes, sur des sphères centrées sur la Terre et distribuées à des distances fixes de celle-ci. Cette construction est en accord avec l'idée de perfection et d'immuabilité associée à la philosophie religieuse grecque, pour laquelle le ciel, parfait et sphérique, est le domaine des dieux. Un des points faibles de ce modèle est qu'il ne pouvait expliquer les variations d'éclat des planètes au cours de l'année.

Si le géocentrisme d'Aristote est la partie la plus citée de son œuvre, ses études sur la nature, en particulier la zoologie, marqueront la pensée de nombreux biologistes et philosophes. Les dix volumes de son *Histoire des Animaux* (*De motu animalium*) (dont un quart seulement nous est parvenu) ont été considérés par les historiens des sciences comme une véritable « bible », faisant de son auteur le premier et le plus grand naturaliste de l'Antiquité, et le père de la zoologie. Georges Cuvier (1769-1832) écrit de lui : « *On ne saurait concevoir, en effet, comment un seul homme a pu recueillir et comparer la multitude des faits particuliers et la grande quantité d'aphorismes renfermés dans cet ouvrage, et dont ses prédécesseurs n'avaient jamais eu l'idée. "L'Histoire des animaux" n'est pas une zoologie proprement dite, c'est-à-dire une description de divers animaux : c'est plutôt une sorte d'anatomie générale, où l'auteur traite des généralités d'organisation que présentent les animaux, où il exprime leurs différences, leurs ressemblances, appuyées sur l'examen comparatif de leurs organes, et où il pose les véritables bases des grandes classifications.* » Non moindre sera l'admiration de Charles Darwin (1809-1882) ou celle de Charles Linné (1707-1778), qui dans sa classification du règne animal, avec ses divisions et sous-divisions, conservera les grandes lignes de la structure tracée par Aristote.

Pour éclairer la portée de l'influence d'Aristote, il faut rappeler qu'à l'époque les connaissances étaient limitées aux pratiques agricoles dans le domaine de la biologie et à l'anatomie humaine en médecine, cette discipline ayant connu un certain essor en Égypte ancienne. Les processus biologiques, tels la reproduction des plantes,

des animaux et de l'Homme, étaient encore mystérieux. Pour Aristote, certains animaux dérivent d'organismes similaires, tandis que d'autres, comme les insectes ou même les oursins, apparaissent spontanément à partir de terres ou de substances en putréfaction. Cette conception alimentera, jusqu'aux XVII^e^ et XVIII^e^ siècles, le grand débat de la « génération spontanée ».

Vers le troisième siècle avant notre ère, dans la Grèce Antique, les avancées de l'astronomie vont être sporadiques. Aristarque de Samos (−320 - −230), qui fournit une bonne estimation de la distance Terre-Lune, est l'un des premiers à émettre l'idée que la Terre n'est pas immobile, devenant un précurseur de l'héliocentrisme. Ératosthène (−284 - −192) détermine avec précision le rayon terrestre. Hipparque (−190 - −120) met en évidence le phénomène de précession des équinoxes. Vers le II^e^ siècle de notre ère, l'astronomie grecque arrive à son apogée, avec un nom important, celui du mathématicien, astronome et géographe, Ptolémée (100-170). Il réinterprète et adapte les cosmogonies de ses prédécesseurs, y compris le géocentrisme d'Aristote, dans un modèle d'univers plus conforme aux données mathématiques. Ce nouvel édifice restera sans changement pendant quatorze siècles.

Au Moyen Âge, les travaux intellectuels sont dominés par l'étude de la Bible ; l'astrologie y trouve un terrain fertile où cultiver l'irrationnel. Précurseurs d'autres écrits, ceux d'Aristote connaissent une première censure en 1210 : la province ecclésiastique de Sens (une province de l'Église catholique romaine) interdit la lecture de ses livres ainsi que ses commentaires en public et en privé, sous peine d'excommunication ! L'astronomie est presque exclusivement réduite à l'établissement du calendrier. Les « connaissances » sont immuables ; tout mouvement « nouveau », jamais encore observé par les Hommes, survenant dans la voûte céleste, est considéré comme surnaturel. C'est le cas de l'étoile qui, selon l'Évangile de Matthieu, guida les rois mages vers Jésus ; de même le passage de la comète de Halley, décrite plusieurs fois, est un signe de la divinité, associé à un présage. Un de ces « présages » est représenté sur la célèbre tapisserie

de Bayeux. Œuvre d'art réalisée probablement au printemps 1067, elle relate les exploits de Guillaume le Conquérant et sa montée sur le trône d'Angleterre le 25 décembre 1066. Un détail frappe le visiteur : un petit groupe de personnes lèvent la tête vers le ciel, certains indiquant du doigt une sorte d'astre chevelu qui traverse le ciel. Ce phénomène est interprété comme un présage concernant le roi en place sur le trône d'Angleterre, Édouard le Confesseur, qui meurt en janvier 1066 ! Six siècles après, l'astre mystérieux de Bayeux trouvera une identité, avec la découverte de l'astronome Edmond Halley qui l'identifie comme étant la comète qui porte maintenant son nom. Cependant, de nombreux instruments construits à cette époque permettent d'effectuer des mesures et des calculs à visée astronomique ou pédagogique. Ainsi, l'*astrarium* est une horloge mécanique planétaire conçue en Italie à la fin du XIV^e^ siècle, qui indique, pour un lieu donné, l'heure du jour et la position dans le ciel de la Lune, du Soleil et des cinq planètes visibles à l'œil nu : une source de données mise à profit par les astrologues pour établir des prédictions !

Une révolution est, enfin, à l'horizon, au tout début du XVII^e^ siècle. De nombreux savants accompagnent une renaissance de l'astronomie : Nicolas Copernic (1473-1543), Tycho Brahe (1546-1601), Galileo Galilei (dit Galilée) (1564-1642), Johannes Kepler (1571-1630). Contrairement à la vision géocentrique de l'univers encore en cours à cette époque, Copernic envisage la rotation de la Terre autour du Soleil, proposition qui aura besoin d'encore un siècle pour s'imposer. Tycho Brahe découvre et décrit, dans son ouvrage *De stella nova*, une « supernova », l'explosion d'une étoile : cet événement bouleverse le concept aristotélicien d'immuabilité des cieux. Galilée, physicien, astronome et mathématicien, étudie, parmi d'autres travaux, la mécanique et la dynamique des corps en mouvement, énonce les lois du pendule simple et celles des corps flottants. Fervent défenseur des idées de Copernic et de l'héliocentrisme, il est considéré comme le père de la science moderne en ce qu'il base ses conclusions sur l'expérimentation et l'observation. En 1609-1610,

il commence à observer le ciel avec une lunette qu'il a lui-même construite. Il découvre alors les taches du Soleil, des cratères sur la Lune, les phases de Vénus, et la présence d'une multitude d'étoiles dans la Voie lactée. En observant l'alignement de Jupiter avec d'autres étoiles, il aperçoit, après plusieurs nuits d'observation, quelque chose qui semble tourner autour de Jupiter : cette découverte des satellites d'une planète remet profondément en question les théories géocentriques, et vaudra son procès en blasphème à son auteur ! Kepler, l'assistant le plus célèbre de Tycho Brahe, établit les trois lois de la mécanique céleste (1609-1619).

La publication, en 1687, par la Royal Society, de l'ouvrage *Philosophiae naturalis principia mathematica*, d'Isaac Newton, marque la fin de la physique aristotélicienne, et de l'idée que les corps doivent se toucher pour agir l'un sur l'autre. Reprenant les travaux de Galilée, Newton établit la loi de la gravitation universelle qui permet d'expliquer les principes physiques des lois de Kepler et de l'orbite elliptique des planètes : les mouvements des corps célestes suivent les mêmes lois que celles décrivant les mouvements des objets terrestres. Il y a donc une unité des lois régissant tous les éléments de l'univers. La révolution copernicienne a ainsi acquis une assise physique qui met fin à l'aristotélisme, et préfigure la science moderne. Nous sommes au seuil du XVIII^e^ siècle.

Mais qu'en est-il des « sciences naturelles », selon l'intitulé des manuels scolaires du XX^e^ siècle ? Jusqu'au début du XVII^e^ siècle, l'Homme, sa santé, l'identification de nouvelles plantes pour sa nutrition ou comme remèdes sont les principales préoccupations des études concernant la « nature ». La médecine était restée plus ou moins celle de l'Antiquité gréco-romaine. Une doctrine, dite des « signatures », formulée par le médecin suisse Theophrastus von Hohenheim (1493-1541), plus connu sous le nom de Paracelse, va dominer à partir du XVI^e^ siècle : les plantes auraient des marques (des signes) laissées par Dieu pour indiquer dans quel but il les a créées. Ainsi, parmi d'autres exemples, une feuille en forme de cœur est le remède contre

les maladies du cœur ; des feuilles tachetées, comme l'est le foie, sont un remède contre les « trous » de cet organe (d'où le nom encore actuel d'hépatiques attribué aux plantes bryophytes). L'anatomie avait fait de grands progrès, mais sans associer les observations des organes à la compréhension de leur fonctionnement. La zoologie était un « cabinet de curiosités » dépourvu de toute vision unitaire. Ce siècle va initier de grands débats philosophiques, où animistes, mécanicistes et vitalistes vont opposer leur vision du vivant. Le mécanicisme de René Descartes (1596-1650) voit les êtres vivants, animaux et Homme, comme des machines qui n'ont rien de sacré : ils sont faits de tuyaux, ressorts, etc., impliqués dans des processus (circulation du sang, mouvement) qui peuvent être expliqués par l'hydraulique et la mécanique. Il fait par contre une nette distinction entre l'Homme, qui possède une âme distincte du corps matériel, et l'animal, qui en est dépourvu. À cette vision cartésienne sera vite opposé le vitalisme, conception basée sur le postulat que le vivant a ses propres lois, le différenciant du monde inanimé. La spécificité du monde vivant résiderait dans des forces vitales qui ne peuvent pas être expliquées par la simple mécanique. Ce type de pensée est suivi en Europe par plusieurs écoles. Ainsi les êtres vivants du chimiste allemand Georg Ernst Stahl (1659-1734) ont un principe étranger à la physique et la chimie, une âme immatérielle, qui leur fournit leur force vitale. En France, Paul Joseph Barthez (1734-1806) distinguait les phénomènes de la matière, ceux de la vie et ceux de l'âme, chacun régi par des lois spécifiques. Xavier Bichat (1771-1802), fondateur de l'histologie, affirme qu'« *un immense intervalle sépare la physique et la chimie de la science des corps organisés, parce qu'une énorme différence existe entre leurs lois et celle de la vie* ». Une justification particulièrement éclairante, dont on pourrait d'ailleurs inverser l'ordre !

Et voici qu'en 1674, durant ces débats et sans aucun lien avec eux, une grande invention va bouleverser la vision du monde vivant. Le microscope, inventé par Antoni van Leeuwenhoek (1632-1723), l'équivalent de la lunette des astronomes, permet d'observer

tout ce qui est non visible à l'œil nu parce qu'extrêmement petit. On découvrira ainsi les spermatozoïdes, les cellules constituant les organes, et surtout le monde jusque-là inconnu des « animalcules », infimes corpuscules de formes variées, immobiles ou en mouvement. Considérés comme des formes inertes générées par la putréfaction d'animaux et de plantes, c'est-à-dire par la transformation de la matière organique, la « dignité » de « vivant » ne leur sera accordée qu'un siècle plus tard, en particulier avec les travaux de Charles Bonnet (1720-1793) et Lazzaro Spallanzani (1729-1799).

C'est au XIX^e^ siècle que naît la biologie, terme employé pour la première fois en 1802 par Jean-Baptiste de Lamarck (1744-1829) et indépendamment par Gottfried Reinhold Treviranus (1776-1837), naturaliste à l'Université de Göttingen. L'étymologie grecque du mot (*bios*, vie et *logos*, science) indique l'étude des êtres vivants, dont leurs processus vitaux. Ce changement de paradigme va caractériser cette nouvelle science, jusque-là uniquement descriptive, ne faisant que l'inventaire et la classification des plantes et des animaux, et mettant à part l'Homme comme entité « suprême ». Cette transition s'amplifiera au cours du siècle, sans parler du suivant. Le généticien Prix Nobel François Jacob décrit ainsi (en 1995) cette évolution : Le XIX^e^ siècle « *a été, pour la biologie… l'époque des grandes théories : théorie cellulaire avec Theodor Schwann, théorie de l'évolution avec Charles Darwin, théorie des germes avec Louis Pasteur. Au début (du XX^e^ siècle) se sont développées deux disciplines nouvelles : la biochimie et la génétique. La biochimie cherche à analyser les constituants et les réactions de la cellule… L'originalité de la chimie des êtres vivants réside surtout dans les enzymes. C'est grâce à la spécificité de la catalyse enzymatique, à sa précision, à son efficacité que peut se tisser le réseau de toutes les opérations chimiques dans l'espace minuscule de la cellule. Peu à peu, les biochimistes en viennent à associer les activités enzymatiques à la présence de protéines. Si la chimie des êtres vivants a un secret, c'est donc dans la nature et les qualités des protéines qu'il faut le chercher… Au milieu du XX^e^ siècle… la naissance de la biologie*

moléculaire est partie d'une idée, que l'expérimentation est venue étayer seulement après coup… que les propriétés des êtres vivants doivent nécessairement s'expliquer par la structure et les interactions des molécules qui les composent. Cette conception était due à une série de physiciens, notamment Niels Bohr, Max Delbrück et Erwin Schrödinger, pour qui toute explication biologique devait avoir une base moléculaire. Quitte à trouver des lois nouvelles qui, sans échapper à la physique, auraient pu n'être découvertes que chez les êtres vivants. Ce qui, jusqu'à ce jour, n'a pas été observé. » Malgré ces développements, on continue de découvrir des aspects de la « vie » terrestre inattendus et fascinants.

Si au cours du siècle dernier la biologie découvre les lois et les principes généraux qui gouvernent le monde vivant, la cosmologie découvre ceux de l'Univers, changeant radicalement notre perception du monde. Le développement des connaissances s'est accéléré, en raison de développements techniques impressionnants, jusqu'à conduire l'Homme sur la Lune, puis à expédier des robots mobiles télécommandés depuis la Terre, sur la surface de ce satellite et de Mars. Grâce à eux des informations précises et précieuses sont collectées sur ces environnements lointains, des échantillons de roches sont prélevés et ramenés sur Terre pour être analysés. Des télescopes orbitent maintenant dans l'espace, inspectant des mondes lointains.

L'aventure vers la compréhension des mystères de l'Univers est donc partie. Et pourtant, l'Homme, même s'il ne voit plus de divinités sur la voûte céleste, s'il n'y lit plus de présages, n'en est pas moins émerveillé par ses dimensions, son aspect inapprochable, son inconnu. Comme le disait Voltaire, « *l'univers m'embarrasse, et je ne puis songer… que cette horloge existe et n'ait point d'horloger* » (*Les Cabales*, 1772). Quelle que soit notre culture, lorsque l'on contemple le ciel, une sorte de naufrage intérieur s'empare instinctivement de notre pensée, et d'ancestrales questions nous viennent à l'esprit : Qu'y a-t-il sur ces étoiles qui brillent au loin ? Sommes-nous seuls dans cet univers ? C'est à ces questions, grâce à des détours inattendus sur Terre, que nous avons tenté ici d'apporter des éléments de réponse.

AVANT-PROPOS

Vivre dans l'impossible est un voyage virtuel à travers les confins de la biosphère, à la découverte d'environnements tels que la vie y semblerait *a priori* exclue en raison de conditions prohibitives pour la grande majorité des plantes et des animaux, et pour nous-mêmes. Déserts, lacs salés, glaciers, intérieur de roches, profondeurs terrestres, abysses océaniques, etc., en seront les étapes. Hors de ces lieux, la Terre apparaît peuplée, tant sur ses parties continentales qu'en milieu marin, d'êtres vivants des plus variés. Il y aurait donc une dichotomie entre une Terre vivante, accueillante par ses conditions « optimales » pour une large gamme d'organismes, et une Terre inanimée, aux conditions « extrêmes ». Nous découvrirons très vite que cette apparence est trompeuse. En effet, des organismes vivants, en particulier des micro-organismes, sont présents dans une variété étonnante de ces environnements qui pour nous sont « extrêmes ». En réalité, sans ces organismes, aucune autre forme de vie n'existerait sur notre planète. À notre impression initiale doit alors se substituer celle d'une Terre présentant un continuum de vie sur une très large partie de ses territoires : là où les organismes qui nous sont familiers, les « mésophiles », ne sont plus présents, des « extrêmophiles » prennent la relève.

Partant des environnements mésophiles, nous nous rendrons donc vers des biotopes extrêmes, pour connaître les conditions qui y règnent et les êtres vivants qui les peuplent. Ces extrêmophiles, en dehors de la curiosité spontanée qu'ils peuvent susciter, sont d'un grand intérêt scientifique. En effet ils ont dû s'adapter à des lieux dont tous les critères, physiques (températures, pressions, absence de lumière) et chimiques (oxygène remplacé par du méthane ou de l'acide sulfurique, etc.), devraient en faire des sites non viables, et ceci grâce à des stratégies surprenantes par leur variété et leur originalité. À-côté non négligeable, leur étude a permis des ouvertures dans de nombreux domaines appliqués, y compris de notre vie courante.

L'existence de tels organismes soulève la question des limites qui marquent le passage entre viabilité et non-viabilité des lieux concernés sur notre planète, apportant de nouveaux éléments de réflexion à la question récurrente de l'existence, et de la nature, d'êtres vivants dans d'autres lieux de l'Univers, hors des petits « Martiens » verts ! Ceci dans le cadre de la discussion sur la notion d'« être vivant », qui marquera le début et la fin de notre voyage.

La structure du récit est celle d'un carnet de voyage, présenté dans l'esprit d'un documentaire. L'usage de termes techniques a été limité au maximum, pour ne pas alourdir le texte, mais sans compromettre la rigueur scientifique. Ce livre n'étant pas destiné à des spécialistes, un minimum de données fondamentales de biologie, nécessaires pour la compréhension du texte, sont proposées dans deux chapitres : « Qu'est-ce qu'un organisme vivant ? » et « L'énergie du vivant et la production de matière organique ». De même, quelques encadrés d'approfondissement sont inclus aux endroits opportuns. Une vaste documentation des lieux décrits est présente sur de nombreux sites Internet, dont une liste est proposée en fin d'ouvrage. Une courte annexe aide-mémoire liste la signification des noms et/ou formules chimiques, abréviations et sigles rencontrés au fil des pages.

L'auteur vous souhaite un bon voyage, plein de découvertes inattendues !

ABRÉVIATIONS ET SIGLES UTILISÉS DANS L'OUVRAGE

Symboles chimiques

C	carbone
Ca	calcium
Cl	chlore
Fe	fer
H, H_2	hydrogène atomique, moléculaire
He	hélium
K	potassium
Mg	magnésium
N, N_2	azote atomique, moléculaire
Na	sodium
O, O_2	oxygène atomique moléculaire
P	phosphore
S	soufre
Si	silicium

Molécules

Acides nucléiques : ADN, acide désoxyribonucléique ; ARN, acide ribonucléique

Bases des acides nucléiques et dérivés : A, adénine ; C, cytosine ; G, guanine ; T, thymine ; U, uracile ; ATP, adénosine-triphosphate ; ADP, adénosine-diphosphate

Dérivés du carbone : CO_2, gaz carbonique ou dioxyde de carbone ; CH_4, méthane ; CH_3OH, méthanol ; H_2CO_3, acide carbonique ; $CaCO_3$, carbonate de calcium, calcite ; $-CH_3$, méthyl ; $H^-CO_3^-$, bicarbonate ; $C_6H_{12}O_6$, glucose ; C_2H_5OH, alcool éthylique ; CH_3COOH, acide acétique ; H_2CO, acétone

Dérivés de l'azote : NH_3, ammoniac ; NH_4^+, ion ammonium ; NO_3^-, nitrate

Dérivés du chlore : HCl, Cl^-, acide chlorhydrique et chlorure ; NaCl, chlorure de sodium, halite

Dérivés du soufre : H_2S, sulfure d'hydrogène ; SO_4^{2-}, sulfate ; H_2SO_4, acide sulfurique

Acide aminé : $C_2H_5NO_2$, glycine

H_2O, eau

SiO_2, silice

Unités

AL, année-lumière

Ga, giga-années

GtC, gigatonne de carbone

IR, infrarouge

Pa, pascal et (sous) multiples (hPa, kPa, Gpa, MPa)

UA, unité astronomique

Abréviations

ADNr 16S, 28S, gène codant l'ARN ribosomal 16S, 18S (pro/eucaryote)

av. J.-C., apr. J.-C., avant, après Jésus-Christ

Ci, Co, carbone inorganique, organique

MO, matière organique

PCR, ***P**olymerase **C**hain **R**eaction*

REM, rayonnement électromagnétique

UV, ultraviolet

Sigles

CEA, Centre d'Énergie Atomique

CNRS, Centre National de Recherche Scientifique

FAO, *Food and Agriculture Organization*

IFREMER, Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer

INRAE, Institut National de Recherche pour l'Agriculture et l'Écologie

NASA, *National Aeronautics and Space Administration*

UNESCO, Organisation des Nations unies pour l'Éducation, la Science et la Culture

1

Qu'est-ce qu'un organisme vivant ?

> Tout est énergie, et c'est là tout ce qu'il y a à comprendre dans la vie.
>
> Albert EINSTEIN (1879-1955)

Le concept de vie nous est intuitif ; le définir est difficile. S'y sont heurtés de tout temps philosophes et savants, nous fournissant une multitude de définitions. Aucune ne permet de saisir de façon univoque le sens du mot, et n'a donc été communément acceptée. L'astrobiologiste André Brack rapporte cette anecdote vécue au cours d'un colloque, en 2000 : « *Les organisateurs ont demandé à chacun des membres de la Société internationale pour l'étude sur l'origine de la vie d'en donner une définition. Parmi les soixante-dix-huit réponses, il fut impossible de dégager une position commune.* »

Les naturalistes des XVIII^e^ et XIX^e^ siècles débattaient de la nature du « monde vivant » à partir de deux conceptions en opposition, héritées d'un lointain passé. La théorie vitaliste attribuait aux organismes

vivants une « force vitale » ne pouvant être expliquée à partir de leurs constituants, en termes physiques et chimiques ; l'autre, mécaniste, soutenait que l'organisme est une « machine », pouvant être examinée et étudiée rationnellement dans ses moindres structures. Au début du XX^e siècle, trois théories fondamentales, les théories cellulaires, de l'évolution et de l'hérédité chromosomique, vont transformer les « Sciences naturelles » en une science rationnelle, au même titre que la chimie ou la physique : c'est la naissance de la « Biologie ». À partir de la moitié de ce même siècle, grâce à l'essor formidable de la biochimie, la génétique et la biologie moléculaire, des progrès sans précédent ont permis de découvrir les principes fondamentaux qui régissent le fonctionnement des cellules et des organismes.

La question de ce qu'est la vie, qui pourrait sembler une discussion purement académique au sein du monde des savants, continue toutefois à revêtir un intérêt scientifique. C'est en effet la question maîtresse à laquelle doivent se référer les hypothèses sur l'origine de cette vie, ce qu'étaient ses toutes premières formes sur Terre, l'existence éventuelle, ailleurs que sur notre planète, de formes de vie autres que celle que nous connaissons. Dans ce chapitre, la difficulté à saisir l'essence même de la vie sera contournée en nous limitant à identifier ses manifestations chez un organisme vivant, ou, dit différemment, ce qu'est le vivant.

UNITÉ, UNICITÉ ET LOIS RÉGISSANT LE MONDE VIVANT

La grande diversité du monde vivant nous est familière en ce qui concerne les organismes macroscopiques, les plantes et les animaux que nous voyons, qui nous entourent, depuis notre petit « bout de terre », le parc le plus proche de la maison jusqu'aux plaines, collines ou montagnes. Nos connaissances des habitants des mers proviennent beaucoup d'expositions, de musées ou de documentaires. Par contre bien peu nous est offert sur ce qui vit à quelques centimètres sous la surface du sol, sans même envisager le sous-sol profond ou nombre

d'autres environnements difficilement accessibles. Il existe en outre tout un monde d'organismes invisibles à l'œil nu, numériquement plus nombreux et d'une diversité peut-être supérieure à celle du monde macroscopique de nos « plantes et animaux » familiers. Beaucoup moins connu, ce monde est essentiel pour la continuité de la vie sur la planète.

L'ensemble des organismes, macro- et microscopiques, se compte en millions d'espèces, lesquelles diffèrent par de nombreux aspects morphologiques, physiologiques, de styles de vie ; tous toutefois partagent une caractéristique essentielle : être construits de cellules. C'est cette structure cellulaire qui fait l'unité du vivant, qui rend la vie unique au sein du système solaire.

En 1858, le médecin Rudolf Virchow, fondateur de la pathologie cellulaire, a défini trois axiomes qui constituent historiquement le noyau de la **théorie cellulaire**. Les deux premiers énoncent que « tous les organismes (animaux et végétaux) sont formés de cellules », et que « toute cellule provient d'une autre cellule » ; le troisième stipule que « toute cellule provient d'une autre par division cellulaire ». De nos jours, à la suite des développements de la biochimie et de la génétique, la théorie cellulaire peut être reformulée ainsi : la cellule est l'unité de base de tout organisme vivant. Ce dernier est formé d'une ou de plusieurs cellules, constituant respectivement des organismes monocellulaires (les micro-organismes) et pluricellulaires (l'ensemble des autres organismes vivants). Chez tous, la cellule est une unité vivante autonome qui réalise toutes les fonctions nécessaires et suffisantes à sa vie, et se reproduit par division.

Le généticien Theodosius Dobzhansky écrivait en 1973 l'aphorisme « *Rien n'a de sens en biologie, si ce n'est à la lumière de l'évolution* ». Quoi de plus clair pour affirmer l'importance de cette **théorie** pour expliquer **l'évolution des espèces** ! Le mot évolution (du latin *evolvere*, dérouler un papyrus pour le lire) est synonyme de changement permanent ; il évoque l'idée des transformations que subissent les espèces, un processus fondamental à l'origine de leur apparition

ou de leur extinction. Deux mécanismes distincts ont été proposés pour expliquer cette évolution, le lamarckisme et le darwinisme. Préalablement, était préconisée la fixité des espèces naturelles, ou invariabilité : le nombre des espèces existantes était celui des formes créées à l'origine, selon le mythe biblique de la Création. Jean-Baptiste Lamarck est le premier naturaliste à proposer, en 1809, dans sa *Philosophie zoologique*, une théorie de l'évolution. Il énonce que les espèces se transforment par un mécanisme continu d'adaptation à leur environnement. Les changements de ce dernier modifient les besoins des organismes, qui s'adaptent en modifiant leur comportement ou en utilisant certains organes préférentiellement à d'autres. La théorie de Charles Darwin, publiée en 1859, en admettant également une transformation des organismes vivants en fonction de leur environnement, propose une évolution par sélection. Au sein d'une même lignée les organismes sont différents, et une sélection naturelle permanente favorise ceux qui bénéficient d'un avantage, quel qu'il soit. Avec les modifications apportées au cours du XX^e^ siècle, cette théorie explique l'histoire passée, les liens de parenté et les divergences génétiques entre les organismes vivants. Ces divergences ont pour origine des changements (les mutations) dans leur « matériel génétique », ou génome.

La **théorie chromosomique de l'hérédité biologique** définit le processus de transmission des gènes d'un individu à sa descendance. C'est en raison de cette transmission que les descendants ressemblent à leurs parents, et d'une façon générale que tous les individus d'une espèce montrent des caractéristiques communes, qui les distinguent de ceux d'une autre espèce. Le concept de gène a été développé à partir de 1911 par Wilhelm Johannsen comme une entité matérielle, une unité héréditaire portée par les chromosomes, remplaçant les termes « caractère » (un trait particulier d'un organisme) et « facteur » (entité corpusculaire), définis par Gregor Mendel. Le « génotype » est l'ensemble des gènes d'un organisme, son « phénotype » étant l'ensemble des caractères déployés par celui-ci. En 1915, Thomas Hunt

Morgan, Prix Nobel de Médecine (1933), développe la théorie chromosomique de l'hérédité et les règles de transmission des caractères des parents aux descendants lors de la reproduction sexuée : les chromosomes de chaque individu, support de leurs gènes, sont présents en couples homologues dans toutes les cellules d'un organisme sauf dans ses cellules germinales ; celles-ci, directement impliquées dans la reproduction, ne comportent qu'un exemplaire de chaque chromosome. Pour chaque couple de chromosomes d'une cellule somatique, l'un est d'origine paternelle, véhiculé initialement par un spermatozoïde, et l'autre, d'origine maternelle, est présent dans l'ovule qui sera fécondé par ce spermatozoïde. Étudiant la mouche du vinaigre, *Drosophila melanogaster*, un insecte de quelques millimètres qui pond ses œufs sur les fruits, Morgan montre que certains des « caractères » étudiés sont transmis de façon corrélée. Cette observation reflète des positions voisines des gènes concernés sur un chromosome, en l'occurrence dans les cas étudiés le chromosome X. Il publie ainsi, avec son étudiant Alfred Sturtevant, la première « carte génétique » de ce chromosome, et introduit les concepts de « liaison génétique » et de « groupe de liaisons », ce dernier étant similaire à un chromosome : les gènes sont ordonnés de façon fixe le long de chaque chromosome. Ces observations déboucheront sur la construction généralisée de « cartes génétiques », et jetteront conceptuellement les bases de la génétique dite formelle.

Cette théorie a été élaborée à une période où les micro-organismes, procaryotes comme eucaryotes (les protistes), étaient encore très peu connus, et en conséquence considérés un peu « à part » des autres organismes vivants. L'absence de reproduction sexuée chez tous les procaryotes et chez de nombreux protistes contribuait alors à cet ostracisme. Ce ne sera qu'une quarantaine d'années plus tard, au milieu du siècle dernier, que des processus d'hérédité similaires seront découverts chez ces organismes. Parallèlement et pratiquement simultanément, la nature physique et chimique des gènes sera élucidée (cf. Encadré 1.1).

ENCADRÉ 1.1 DU GÈNE À L'ADN

En 1928, Frederick Griffith fit une importante découverte médicale qui aura, quelques décades plus tard, un impact bien au-delà de sa discipline. Il étudiait la pneumonie provoquée chez l'Homme par une bactérie, le Pneumocoque (*Streptococcus pneumoniae*), maladie mortelle avant la découverte des antibiotiques. Griffith avait observé que les Pneumocoques d'individus infectés, étudiés en laboratoire, étaient de deux types, distinguables par l'aspect que formaient des amas (des colonies) de ces bactéries déposées sur des milieux nutritionnels solides. Le type « S », inoculé à des souris saines, provoquait la maladie et leur mort ; le type « R » était inoffensif. Mais la découverte clé a été que l'inoculation conjointe à des souris de bactéries R vivantes et de bactéries S tuées (rendues ainsi inoffensives) induisait la pneumonie chez celles-ci. L'autopsie des animaux montrait la présence unique de bactéries vivantes de type S. Ainsi les bactéries R avaient été « transformées » en bactéries S. Un hypothétique « principe transformant » devait, selon Griffith, être responsable de cette transformation.

Onze ans plus tard, Oswald Avery, Colin MacLeod et Maclyn McCarty identifièrent la nature biochimique de ce « principe transformant » : c'était de l'ADN, l'Acide DésoxyriboNucléique. Leur découverte, publiée en 1944 dans le *Journal of Experimental Medicine*, passa cependant inaperçue, malgré son importance. Celle-ci ne sera reconnue qu'en 1952, lorsqu'Alfred D. Hershey et Martha C. Chase redémontrèrent, dans une expérience conceptuellement très simple, le rôle de la molécule d'ADN comme dépositaire de l'information génétique. Ces auteurs s'intéressaient à la reproduction d'un virus bactérien, une entité composée uniquement d'un génome (dans ce cas de l'ADN) et de protéines (sa capside, la structure qui contient le chromosome). Or seul l'ADN du virus entre dans la bactérie infectée, sa capside restant à l'extérieur. Ceci suffit au virus pour se reproduire dans son hôte, c'est-à-dire synthétiser ses constituants, protéines de capside et copies de son chromosome. L'information génétique nécessaire a bien été apportée par l'ADN seul. Cette expérience marque la naissance de

...

la biologie moléculaire. Vingt ans après, d'autres chercheurs, Morton Mandel et Akiko Higa, confirmèrent cette découverte en étudiant un autre virus infectant la bactérie *Escherichia coli*, l'organisme modèle des études de génétique des bactéries. La mise en contact de ces bactéries « perméabilisées » avec une suspension pure d'ADN du virus, dépourvue de toute protéine virale, permet bien la reproduction du virus.

LA CELLULE VIVANTE : UN MILLE-MILLIARDIÈME DE TÊTE D'ÉPINGLE

Trois propriétés sont uniques à la cellule vivante, ses capacités d'auto-construction, de reproduction et d'évolution.

Sous sa forme la plus simple, archétypale, une cellule est un organisme vivant constitué d'une membrane renfermant le cytoplasme, d'information génétique portée par son support moléculaire, l'acide désoxyribonucléique (ADN), et de systèmes permettant de récupérer de l'énergie et de l'utiliser pour convertir ses nutriments en vue d'assurer sa construction et son fonctionnement. L'ADN est une sorte de mémoire, équivalente à celle d'un ordinateur. La propriété unique de cette cellule, par rapport au monde non vivant, est qu'elle peut se reproduire en formant des cellules identiques à elle-même. Une telle définition minimale pourrait correspondre à une protocellule, celle qui a initié la vie sur Terre. De telles cellules archétypales pourraient être maintenues en laboratoire, dans des conditions environnementales rigoureusement contrôlées. Dans la nature, toutefois, cet archétype n'existe pas. En effet une cellule doit pouvoir conserver son intégrité et assurer sa survie dans un environnement en perpétuel changement (disponibilité en ressources nutritionnelles ou en eau, variations de températures, etc.). Elle doit donc être équipée de mécanismes assurant son homéostasie, son « équilibre intérieur », lui permettant de maintenir cet équilibre : par exemple la capacité d'utiliser plusieurs types de sources nutritionnelles, de se déplacer vers ces sources de nutriments ou de pouvoir fuir des zones toxiques,

d'adhérer aux parois intestinales pour récupérer les produits de la digestion pour celles vivant chez des animaux hôtes, etc. La possession de ces capacités va augmenter la « complexité » de l'archétype, en exigeant une augmentation corrélative de sa taille, pour contenir tous les composants nécessaires, et surtout, par analogie avec notre ordinateur, de sa mémoire génétique, c'est-à-dire du nombre de ses gènes.

La cellule modèle : structure et fonctionnement

Toute cellule est délimitée par une **membrane**, qui la sépare de son milieu externe et qui contrôle l'interaction avec celui-ci. Ce milieu, en effet, lui fournit les éléments chimiques nécessaires à l'ensemble de ses fonctions. La cellule doit aussi rejeter les déchets de son activité. Les échanges entre milieux externe et interne sont réalisés grâce aux propriétés physiques de la membrane et à la présence sur celle-ci de structures spécialisées impliquées dans le transport de molécules. Ces échanges sont sélectifs et régulés : seuls des éléments « choisis » traversent la membrane, et ceci seulement quand requis. Selon les cas, la membrane comprend en outre divers appendices : un appareil locomoteur, des systèmes de détection de molécules nutritionnelles (sucres, acides aminés), de produits toxiques ou d'autres cellules, des photorécepteurs permettant de se diriger ou de s'éloigner d'une source lumineuse, des systèmes de communication moléculaire avec d'autres cellules, etc. (Figure 1.1).

La membrane contient le milieu interne de la cellule, son **cytoplasme**, ou cytosol. Celui-ci est un milieu aqueux, favorisant les réactions chimiques. Il contient des milliers de constituants différents, dont des macromolécules (majoritairement protéines, acides gras et acides nucléiques). Ces dernières sont organisées en assemblages, ou complexes, ou organites (petits « organes »), formant de vraies machineries spécialisées impliquées dans la réalisation des diverses biosynthèses, et fonctionnant dans des réseaux d'interactions. Parmi ces organites, citons : les **ribosomes**, des complexes de protéines et d'acide ribonucléique (ARN), sièges de la synthèse des protéines ;

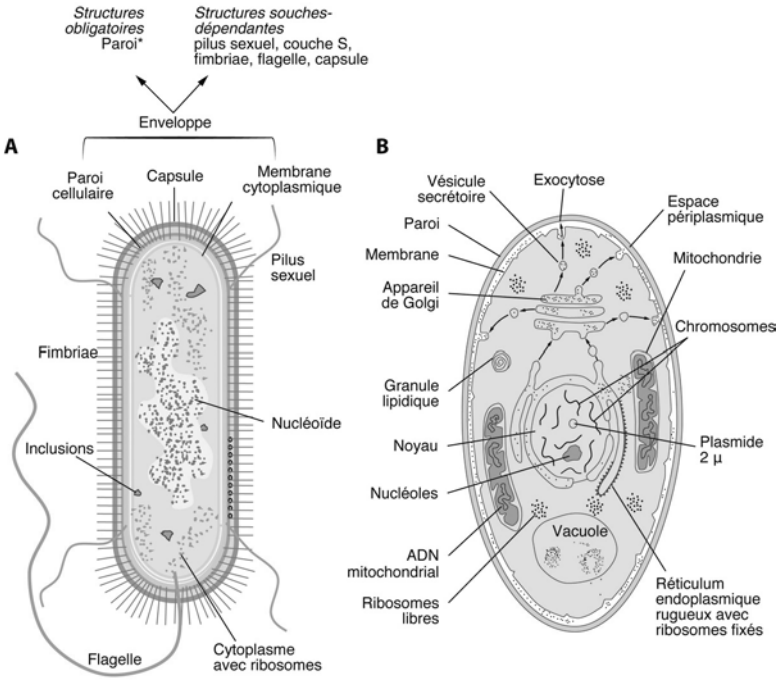


Figure 1.1 | Modèles de cellules procaryote (A) et eucaryote (B). *Schéma simplifié montrant les principales différences entre les deux archétypes de cellules. La plus grande complexité structurale de la cellule eucaryote est évidente, avec ses nombreux organites (appareil de Golgi, réticulum, nucléoles, etc.), absents dans la cellule procaryote. De nombreuses différences de dimensions, formes et structures apparaissent en outre suivant l'appartenance à l'un des trois domaines du vivant, et dans chacun d'eux, à un taxon. (Modifiée d'après P. Ribéreau-Gayon et al. ; Paolozzi et al., Dunod 2023)*

les **mitochondries** (chez les plantes et animaux) et les **chloroplastes** (chez les plantes et certains micro-organismes) et leurs équivalents fonctionnels chez les micro-organismes dits procaryotes, qui assurent la production d'énergie, respectivement par voie respiratoire et par photosynthèse par conversion de l'énergie lumineuse ; le **noyau** (ou son équivalent le nucléoïde chez les procaryotes), qui contient le(s) chromosome(s), et bien d'autres complexes moléculaires. Les **protéines**, les constituants majoritaires des cellules, sont les « outils » qui réalisent l'ensemble des fonctions que celle-ci doit assurer. Il en

existe plusieurs milliers de types, chacune étant présente en un à plusieurs milliers d'exemplaires, et spécialisée dans une fonction. Les « patrons » utilisés pour leur construction sont les gènes portés par les chromosomes.

L'information génétique est gravée dans une ou des molécules d'**ADN** chez tous les organismes (ou d'ARN chez certains virus). L'ADN, en association à des protéines, est structuré en chromosomes. Le génome est le « tableau de commande » de la cellule. Il contient toute l'information qui fait qu'elle est ce qu'elle est, et qui la rend différente d'une autre. Cette information, dont le contenu est propre à chaque organisme vivant, est stockée sous forme d'un message génétique grâce à un code universel du vivant (code génétique).

En résumant, la cellule est une entité vivante dont la structure de base et le fonctionnement sont communs à tout être vivant, ce que le généticien, Prix Nobel, François Jacob a résumé ainsi : « *Avec la cellule, la biologie a trouvé son atome.* » Une paraphrase pourrait en être que, tout comme l'atome unifie la matière, la cellule unifie le vivant.

Procaryotes et eucaryotes

Durant le siècle dernier, l'amélioration de l'optique des microscopes, puis l'invention du microscope électronique en 1933, ont permis d'observer les détails structurels des cellules. En 1925, Édouard Chatton découvre qu'il existe deux catégories de cellules, selon la présence ou non d'un « noyau », une structure sphérique représentant au moins 10 % du volume de la cellule, dont il occupe la partie centrale. Il définit comme « eucaryote » (ayant un « vrai » noyau) tout organisme qui en est pourvu (plantes, animaux, protistes), et comme « procaryotes » ceux qui en sont dépourvus. Il apparaîtra plus tard que ces deux types de cellules se distinguent par nombre d'autres aspects, et représentent deux modèles de construction des organismes vivants.

Le noyau des eucaryotes est entouré d'une membrane, dite nucléaire, qui l'isole du cytoplasme tout en assurant la communication (des

échanges moléculaires) avec celui-ci. Le cytoplasme des eucaryotes présente une organisation interne complexe, formant des compartiments grâce à plusieurs systèmes membranaires, dans lesquels baignent les organites spécialisés, tels les mitochondries ou les chloroplastes. Chez les procaryotes, l'équivalent du noyau, le nucléoïde, quoique non confiné à l'intérieur d'une membrane, n'est pas libre dans le cytoplasme mais organisé en nombreux domaines structuraux et fonctionnels. Le cytoplasme n'y est pas non plus organisé en compartiments, mais ses constituants ne sont pas distribués au hasard. Ainsi les voies énergétiques, respiration et/ou photosynthèse, ne sont pas organisées dans des mitochondries et/ou chloroplastes, mais hébergées sur des systèmes membranaires.

L'ADN, molécule universelle du vivant

Une cellule, pour pouvoir fonctionner, a besoin d'un plan de commande, rôle assuré par l'ADN (l'ARN chez certains virus). Celui-ci constitue un vrai logiciel, impliqué à tous les niveaux de la construction et du fonctionnement de la vie de la cellule : synthèses de ses constituants et régulation de ces processus, contrôle du cycle de reproduction, maintien de son homéostasie.

L'ADN est une molécule de grande dimension, désignée par les termes « filament » ou « brin ». Elle est formée de trois types de molécules : un sucre (désoxyribose), des bases azotées et du phosphate. Les bases sont de quatre types : adénine (A), thymine (T), guanine (G), cytosine (C). Ces constituants sont organisés en « nucléotides », des complexes constitués chacun d'un exemplaire de chacun de ces trois groupes, associés par des liaisons chimiques. Il existe donc quatre types de nucléotides. Toutes les molécules d'ADN sont formées à partir de ces quatre nucléotides. Chaque brin est un polymère, c'est-à-dire une succession de nucléotides liés linéairement entre leurs phosphates et leurs désoxyriboses. On appelle « séquence » l'enchaînement ordonné des bases le long du brin. Un filament d'ADN est donc une chaîne, dont la dimension se compte

en milliers ou dizaines de milliers de nucléotides (certains virus et procaryotes), ou en centaines de milliers à millions chez les procaryotes et les protistes, et dizaines de millions chez les plantes et les animaux. Deux brins s'associent généralement, formant une paire, en une structure hélicoïdale dans laquelle ils sont positionnés en orientations inverses (antiparallèles). Cette hélice est stabilisée par des pontages, dits « liaisons H » (hydrogène) entre les bases de chacun des filaments. Ces liaisons s'effectuent toujours entre les mêmes paires de bases : A d'une chaîne avec T de l'autre, et G avec C (ou vice-versa pour chaque couple). L'ordre des bases sur chaque paire de filaments n'est donc pas l'effet du hasard : les chaînes sont dites complémentaires. Ainsi la séquence ACCTGCTAAA est appariée, en tenant compte de leur orientation antiparallèle, à une séquence TGGACGATTT sur l'autre brin.

La vie en langage codé

Comme pour le langage humain ou celui d'un ordinateur, basé le premier sur des mots, l'autre sur des chiffres, celui des organismes vivants utilise un vocabulaire, un « code », ici de nature chimique : les bases de son ADN. Ces langages présentent des équivalences. Les mots sont constitués d'une succession de lettres d'un alphabet (26 en français) ; le langage numérique est binaire, utilisant uniquement deux chiffres, 0 et 1 ; le langage du vivant jongle avec les quatre bases, organisées par trois, dites en triplets, qui forment ses unités de base : ATC, GTC, etc., soit 64 (4^3) possibilités en tout. L'ensemble de ces triplets, appelés codons, le long de la molécule d'ADN, est organisé, avec sa ponctuation, pour désigner les gènes, chacun formé de quelques centaines à quelques milliers de nucléotides. Ce code est décrypté au niveau des ribosomes, par l'intermédiaire de molécules d'ARN, elles-mêmes équivalentes, par complémentarité, de l'un ou l'autre brin de la molécule d'ADN. Les molécules d'ARN (y compris les génomes des virus dits « à ARN ») sont constituées sur le même principe structurel que l'ADN, mais ne forment pas de double hélice.

Dans ces molécules, le sucre est un ribose (R), et une autre base azotée, l'uracile (U), remplace la thymine T.

Du message génétique à la synthèse des protéines

Le code sert à reconnaître les « mots » utilisés pour construire les protéines, soit chacun des 20 acides aminés qui constituent ces molécules. Cependant, pour être fonctionnel, le message porté par ces codons sur l'ADN doit préalablement être transféré sur un autre support moléculaire, de l'ARN, dit messager, qui n'est autre qu'une transcription en ARN de la séquence en bases d'un des deux filaments de l'ADN, suivant la règle indiquée plus haut. Ce code dispose ainsi lui aussi de 64 codons ; or il n'y a que 20 « mots », 20 acides aminés. Les codons excédentaires ressortissent à deux catégories. Quatre ne sont pas « codant », mais ont un rôle de ponctuation : ils indiquent, pour l'un, où initier la lecture le long de la molécule d'ARN messager, et pour les trois autres, dits codons stop, où la terminer. Ces codons jouent un rôle équivalent à celui des blancs dans un texte écrit. Les autres codons en excès sont absorbés par le fait que la majorité des acides aminés peuvent être codés par deux, trois voire quatre, triplets différents.

Chaque molécule d'ARN messager, représentant un (ou quelques) gène(s), donc une (ou quelques) protéine(s), est prise en charge par les ribosomes, les machines chargées de traduire l'information portée par les codons en une succession d'acides aminés. Ces derniers sont soudés, bout à bout, en respectant leur séquence, formant ainsi la protéine codée par le gène correspondant.

UNICELLULARITÉ ET PLURICELLULARITÉ, DEUX MODÈLES D'ORGANISME

Une importante caractéristique de la dichotomie procaryotes/eucaryotes concerne la structure de l'organisme. L'unicellularité est l'unique modèle de construction de l'ensemble des procaryotes, mais c'est aussi celui de nombreux micro-organismes eucaryotes, appelés

globalement protistes, comprenant protozoaires, micro-algues et micro-champignons. Au modèle pluricellulaire correspondent tous les autres eucaryotes, plantes, animaux et champignons. Leur nombre de cellules diffère grandement suivant les organismes. Le ver nématode *Caenorhabditis elegans*, de structure plutôt simple, est constitué de 959 cellules somatiques (son « corps »), auxquelles s'ajoutent environ 2 000 cellules germinales (à l'origine des gamètes). L'organisme humain en comprend de dix mille à 1 million de milliards (10^{13} à 10^{15}), ressortissant à au moins 200 types distincts, bien que dérivant toutes d'une unique cellule initiale, l'ovule fécondé.

Au cours de l'évolution, sont d'abord apparus sur Terre des organismes unicellulaires procaryotes, puis eucaryotes, et longtemps après des eucaryotes multicellulaires, issus d'ancêtres unicellulaires. Ces innovations successives n'ont pas été acquises d'un coup, mais sont apparues de façon indépendante, entre 16 et 25 fois, à des époques différentes. Avec la pluricellularité, les cellules des organismes concernés se sont constituées en groupes spécialisés chacun dans une fonction propre. Ceci a permis à ces organismes de développer un plus large éventail de performances, plus ou moins corrélé à l'augmentation de leur taille. La structure et le métabolisme de ces cellules se spécialisent durant l'embryogenèse afin que chaque type ait une fonction précise au sein de l'organisme. Toutes ont le même matériel génétique, mais une partie seulement de celui-ci est exprimée, de façon différentielle, dans chacun de ces types. Une coordination de leur activité et un système de communication inter-cellules sont nécessaires afin que le système fonctionne harmonieusement. Ce schéma est vrai pour tous les organismes pluricellulaires, quel que soit leur niveau de complexité.

LA CLASSIFICATION DU VIVANT

Classer les organismes vivants, c'est mettre de l'ordre dans notre vision de la nature. La discipline biologique qui s'y consacre est la **taxinomie** (ou taxonomie) systématique, s'appuyant sur les relations

évolutives (phylogénétiques) entre les organismes. Un classement consiste à grouper les objets concernés suivant un ou plusieurs critères de ressemblance, comme nous l'avons tous fait pour nos collections de timbres, fossiles ou plantes. Ceci permet aussi de retrouver rapidement un objet particulier, et de ranger un nouvel élément soit dans un groupe existant, soit dans un nouveau créé à cette occasion.

L'intérêt pour la classification du vivant a toujours présenté deux aspects, l'un pratique (et économique), l'autre scientifique. La possession d'un inventaire du monde vivant est utile en pratique pour établir des listes (les bases de la nutrition humaine ou animale, les plantes ou champignons toxiques ou vénéneux, les organismes produisant des biomolécules d'intérêt économique ou liées à la santé, etc.). Les scientifiques y voient une approche pour décrire l'histoire naturelle du monde vivant : le moment d'apparition de différents groupes, leurs liens de parenté et de divergence, assigner un nom et une place à un nouvel individu.

La classification naturelle

Aristote (III^e^ siècle av. J.-C.) est le premier dont l'intérêt pour cette problématique nous est parvenu. Il catégorisait les objets de la nature en quatre « règnes » : minéral, végétal, animal et humain. L'Homme, considéré comme l'être le plus complexe après les divinités, n'était pas inclus dans le règne animal. Les animaux étaient définis par leur aspect, les « semblables » étant rassemblés dans de vastes groupes, ou « genres », dont chacun incluait diverses « espèces », deux concepts qui sont arrivés jusqu'à nous.

Malgré son principe simple, la classification du monde vivant se révèle ardue. Elle rencontre deux difficultés : l'ampleur de la diversité des espèces et du nombre de paramètres qui y sont liés complexifie la tâche ; mais surtout les organismes vivants ont une histoire et évoluent, ces deux aspects étant inséparables : les degrés de parenté plus ou moins étroits reflètent l'ancienneté d'appartenance à un ancêtre commun.

La première classification « naturelle » du vivant, qui a laissé des traces profondes jusqu'à aujourd'hui, a été proposée en 1758 par Carl Linné dans son *Systema Naturae*. Il a modernisé la nomenclature biologique, jusque-là très complexe, en utilisant une dénomination latine binominale, définissant le genre et l'espèce : ainsi une abeille devient *Apis* (genre) *mellifère* (espèce) (simplifiée en *A. mellifera* s'il n'y a pas d'ambiguïté), et non plus *Apis* pedibus postumus glacis (abeille dont les pattes postérieures portent des poils durs sur le côté intérieur). Linné place les plantes et les animaux en vastes niveaux subdivisés au fur à mesure du degré de description : successivement règnes, embranchements, classes, ordres, familles, genres et espèces. Contrairement à ses prédécesseurs, il classe les plantes non plus en tenant compte de l'organisme entier, mais en examinant l'anatomie de leur système reproducteur. Cette classification est encore partiellement présente dans les livres didactiques. Les travaux de Darwin ont ensuite conduit à concevoir la classification comme une représentation des liens entre les espèces, basée sur des déterminants de l'aspect externe des organismes : physiologie (type de métabolisme), capacité et type de mouvement, mode de reproduction, niche écologique, etc. Cette méthode est discutable, car elle dépend des critères de séparation ou de regroupement. Des espèces ayant des origines distantes peuvent avoir un même « aspect », posséder des caractéristiques physiologiques semblables, suivant un mécanisme dit de « convergence » : ainsi la capacité de voler se rencontre chez les oiseaux et chez certains mammifères comme les chauves-souris. Inversement, certains aspects d'espèces proches peuvent avoir divergé, un mécanisme dit « de régression ».

La taxinomie, un édifice non encore complété

La classification actuellement admise de façon universelle place au plus haut de l'échelle du monde vivant trois domaines, Archées, Bactéries et Eucaryotes, d'où dérivent tous les niveaux inférieurs. L'ensemble des ressortissants de ces trois domaines sont issus d'un même ancêtre commun (cf. Encadré 1.2).

ENCADRÉ 1.2 UN PEU D'HISTOIRE

Les classifications proposées jusqu'au XX^e siècle reposaient sur l'existence de deux règnes, animal et végétal, les champignons étant inclus dans ce dernier. Le monde microbien était assigné à l'un ou à l'autre de ces deux règnes, donc considéré comme, soit de « petits animaux » (protozoaires), soit de « petits végétaux » (protophytes). La position des « bactéries » était assez floue. En 1957, l'écologiste Robert Harding Whittaker présente une classification à 5 règnes, basée sur le type de nutrition des organismes : Monères (Bactéries), Protistes (autres unicellulaires), Mycètes (champignons), Végétaux, Animaux. Cette classification, après de nombreuses retouches, persiste encore parfois dans l'enseignement secondaire. L'ordre hiérarchique y est le suivant : domaine (autrefois empire), règne, division (ou phylum), classe, ordre, famille, genre et espèce. Le mot « taxon » désigne un niveau quelconque de regroupement. La nomenclature est internationalisée et latinisée suivant celle proposée par Linné. Une « souris grise », par exemple, est désignée par le nom *Mus musculus*, et sa « carte d'identité » complète devient : Règne *Animalia*, Embranchement *Chordata*, Sous-embranchement *Vertebrata*, Classe *Mammalia*, Ordre *Rodentia* (Rongeurs), Sous-ordre *Myomorpha* (qui ressemble à une souris – ce qui inclut plus du quart des mammifères), Famille *Muridae* (1 500 espèces, se distinguant des autres rongeurs par l'anatomie des pattes), Sous-famille *Murinae*, Genre *Mus*, Sous-genre *Mus Mus*, Espèce *Mus musculus*. Des remaniements, proposés de façon continue, consistent en l'insertion de niveaux taxinomiques intermédiaires tels Sous-règne, Super-classe, etc.

L'espèce est définie chez les organismes à reproduction sexuée comme une communauté d'organismes naturellement interféconds. Il est donc impossible de l'appliquer telle quelle aux procaryotes, dont la reproduction est asexuée. Elle est alors définie par un critère d'identité des séquences nucléotidiques de leurs ADN : l'appartenance à une même espèce exige un minimum de 95 % d'identité des génomes. En outre un nouveau taxon, la souche, placé en dessous de celui