

Le continuum du vivant

Blaise Mulhauser



Le continuum du vivant

Le continuum du vivant

Blaise Mulhauser



Grâce aux efforts de l'auteur, cet ouvrage a été imprimé avec l'énergie solaire, sur un papier FSC 100% recyclé, atteignant la neutralité carbone.

Impression: Villars Graphic SA, Neuchâtel, print-eco.ch

Direction générale: Lucas Giossi
Directions éditoriale et commerciale: Sylvain Collette et May Yang,
assistés de Manon Reber
Direction de la communication: Prisca Thür-Bédert
Responsable de production: Christophe Borlat
Éditorial: Jean-Baptiste Gugès, Alice Micheau-Thiébaud et Jean Rime
Graphisme: Kim Nanette
Marketing digital: Gabriel Hussey
Comptabilité: Daniela Castan
Logistique: Émile Razafimanjaka

Image de couverture: détail de *Tigre dans le sous-bois*, 2024. Œuvre sur papier réalisée par Blaise Mulhauser pour la parution de la présente édition. L'aquarelle est basée sur une observation du tigre le 16 décembre 2019 dans les forêts de teck et de bois de rose du parc national de Nagarhole, dans les montagnes des Nilgiris (Karnataka, Inde). Le grand prédateur y vit grâce à la présence de nombreux mammifères herbivores, eux-mêmes dépendants de la végétation herbacée et arborescente en contact avec les micro-organismes du sol. Sur l'aquarelle, le continuum est symbolisé par l'une des trois couleurs primaires, le jaune, dont la longueur d'onde est située au centre du spectre des couleurs, non loin des pigments verts du système chlorophyllien.

Première édition, 2024
© Épistémé, Lausanne, editionsepisteme.org
Épistémé est une maison d'édition de la fondation
des Presses polytechniques et universitaires romandes
ISBN 978-2-88915-627-6, version imprimée
ISBN 978-2-8323-2266-6, version ebook (pdf), doi.org/10.55430/8040VA01

Imprimé en Suisse

Ce livre est sous licence:



Ce texte est sous licence Creative Commons: elle vous oblige, si vous utilisez cet écrit, à en citer l'auteur, la source et l'éditeur original, sans modifications du texte ou de l'extrait et sans utilisation commerciale.

Sommaire

Avant-propos	9
--------------------	---

Remerciements	11
---------------------	----

Première partie

Ce qui est en «soi»	13
----------------------------------	-----------

1 Des souris et des hommes	15
---	-----------

2 Avoir les yeux plus gros que le ventre	25
---	-----------

3 Symbioses	37
--------------------------	-----------

Deuxième partie

Étudier le passé pour comprendre le présent	53
--	-----------

4 Aux origines du vivant	55
---------------------------------------	-----------

5 La Grande Oxydation, la plus grande révolution de l'histoire de la Vie sur Terre	65
---	-----------

6 Extinctions, action, réaction	77
--	-----------

7 L'humain descend d'un tout	89
---	-----------

Troisième partie

Postulat sur la Vie	99
----------------------------------	-----------

8 Théories de l'évolution, évolution des théories	101
--	------------

9 Une question de vie ou de mort	115
---	------------

10 Un cycle continu	125
----------------------------------	------------

11 Le continuum du vivant	133
--	------------

12 Un trafic génétique continu	145
--------------------------------	-----

13 Symbiote <i>versus</i> parasite, un équilibre fragile	159
--	-----

Quatrième partie

De la biologie à la symbiologie: un changement fondamental	175
---	-----

14 La conscience en tout être	177
-------------------------------	-----

15 La nécessité de la croyance	197
--------------------------------	-----

16 Qu'est-ce que la Vie?	205
--------------------------	-----

17 La symbiologie	219
-------------------	-----

Conclusion	229
------------	-----

Table des matières	231
--------------------	-----

L'homme tient à tout ce qui l'environne.
Jean-Jacques Rousseau

Avant-propos

Héritage d'une humanité désemparée face à un avenir qu'elle ne peut prédire, la science est née d'interrogations incessantes. Des théories ont été échafaudées par la force du raisonnement, en lien avec les capacités de l'humanité à observer ce qui l'entoure. Mais parce qu'il se trouve au centre de l'environnement qu'il étudie, l'être humain a logiquement construit une science anthropocentriste basée sur des notions d'identité et d'altérité, opposant dans l'espace et le temps le « moi » à tout ce qui n'est pas « soi », c'est-à-dire distinguant résolument et sans nuance l'individu de son environnement.

Si les physiciens ont été les premiers à s'affranchir de la contingence *Homo Sapiens* en proposant les lois de la mécanique quantique (un résultat intellectuel admirable), l'étude du vivant reste à ce jour, quant à elle, toujours autant anthropocentrique. Les théories de l'évolution, esquissées au XIX^e siècle par Lamarck et Darwin, souffrent de ce biais, entretenu durant tout le XX^e siècle par les diffuseurs de la théorie synthétique de l'évolution (ou « néodarwinisme »). Des théories induisant une vision partielle du vivant, encore peu remise en cause, qui nie par exemple la participation des phénomènes épigénétiques (c'est-à-dire l'influence de l'environnement sur l'expression des gènes d'un individu) dans l'évolution des espèces. Il est temps que les biologistes fassent, à leur tour, leur « révolution quantique ».

Grâce à de nouvelles techniques d'observation, le vivant apparaît à présent sous un jour nouveau. Les résultats d'études récentes confirment l'interaction étroite entre tous les organismes vivants, dans un jeu d'action-réaction ininterrompu. Ainsi, leur discipline étant l'une des plus développées de la biologie, les généticiens se retrouvent aujourd'hui face à de tels flux d'information insoupçonnés, notamment sur les transferts très rapides de gènes entre microbes, qu'ils ne peuvent plus considérer l'être humain comme sujet central de la recherche sur le vivant. En outre, une nouvelle vision de l'évolution des êtres vivants a émergé, d'abord dans les années 1970 sous l'impulsion de la biologiste américaine Lynn Margulis, spécialiste des bactéries, puis reprise, commentée et complétée par d'autres biologistes : les espèces évoluent en coopérant, par interactions symbiotiques.

Si je souscris à cette approche, l'exercice ne me semble toutefois pas complet tant que les biologistes ne changent pas leur manière de « voir les choses ». Car si la communauté scientifique admet de plus en plus l'idée selon laquelle les microbes sont les organismes primordiaux des processus d'évolution, elle ne renonce pas pour autant à son anthropocentrisme : elle considère la relation du seul point de vue de l'hôte en affirmant que nous accueillons ces microbes, bons ou mauvais, au sein de notre être pensant. Il s'agit aujourd'hui d'aller plus loin dans la réflexion, sans chercher à savoir si les espèces luttent ou fusionnent pour survivre, mais en assimilant, dans l'exercice de la discipline, que le vivant forme un tout et que les liens interspécifiques existent depuis toujours.

Le « nouveau » paradigme se situe à ce niveau : les êtres unicellulaires se fondent en symbiose et construisent des êtres symbiotiques dont *Homo Sapiens* n'est que l'un des représentants possibles dans le continuum du vivant. Dès lors, et pour aller jusqu'au bout de cette révolution, il s'agit de savoir à quoi sert notre conscience, à comprendre quelle est l'utilité du « moi » et à revoir notre rapport à la mort. Lu ainsi, cela paraît très anthropocentrique, pourtant il s'agit d'un passage obligé vers une libération des connaissances. Au-delà, l'enjeu est de répondre à l'une des questions les plus fondamentales qui soient : qu'est-ce que la vie ? En commençant nécessairement par distinguer « vie » dans le sens « individuel » du terme, et « Vie » quand elle désigne le vivant dans sa globalité ; deux graphies (avec ou sans majuscule) qui nous y aideront dans cet ouvrage.

Chères lectrices et chers lecteurs, vous découvrirez au fil des chapitres de ce livre l'histoire passionnante de l'évolution du vivant, ainsi que les possibilités qu'il a de diversifier ses modes de fonctionnement. La plupart du temps, la vision classique des exemples cités vous paraîtra logique, mais l'explication symbiologique vous ouvrira, je l'espère, des perspectives inédites.

Remerciements

Cet écrit n'aurait pas vu le jour sans le concours de ma famille ni celui de nombreux amis et de collègues.

Je tiens à remercier plus particulièrement le professeur Michel Aragno, microbiologiste spécialiste des premières formes de vie et des cycles qu'elles ont induits, ainsi que le professeur Yves Delamadeleine, éminent mycologue. Leurs relectures en profondeur et leurs propositions ont considérablement amélioré le contenu de l'ouvrage. Je remercie également ma compagne, Julie Rieder, géologue, dont la relecture a largement contribué à rendre mon écriture scientifique plus accessible, ainsi qu'à Jean-Baptiste Gugès, éditeur, qui a su apporter la rigueur nécessaire à la finalisation de ce texte.

Parmi les collègues spécialistes de diverses disciplines, j'aimerais remercier le professeur Éric Verrecchia, de l'Université de Lausanne, qui m'a fait profiter de son immense savoir dans le domaine des cycles biogéochimiques. De même, des discussions épisodiques plus ciblées avec d'autres collègues ont nourri ma réflexion pour aboutir à la proposition décrite aujourd'hui. Je pense notamment aux professeurs Edward Mitchell (biodiversité du sol), Jean-Michel Gobat (pédologie et phytosociologie), Christian Ghasarian (anthropologie réflexive) et Laure Kloetzer (psychologie socioculturelle).

Je n'oublie pas non plus mes compagnes et compagnons de recherches sur le terrain, dont plusieurs anthropologues, qui m'ont aidé à ouvrir le champ de mes réflexions. Merci donc à Leïla Baracchini, Élodie Gaille, Véronique Torriani, Sébastien Baud, Jean-Pierre Blanchet et Ruben Pensa, et aux nombreuses communautés qui m'ont accueilli de par le monde. D'autres terrains, pratiqués en famille, ont aussi été source de connaissances nouvelles. Merci donc à ma compagne Julie, ainsi qu'à mes filles Marie, Noélie, Camille et Louise de leur ouverture à vivre des expériences improbables. Bien que leur apport paraisse indirect dans ce livre, il constitue l'élément fertile d'une réflexion plus large sur les relations symbiotiques que l'être humain entretient avec toutes les composantes de son environnement.

Enfin, un grand merci à mes parents, Paul et Marie-Rose, à qui je dois le sens du respect et de la tolérance, tout comme la farouche intention d'œuvrer à une meilleure connaissance de la nature qui nous entoure, nous englobe et nous façonne.

Première partie

Ce qui est en «soi»

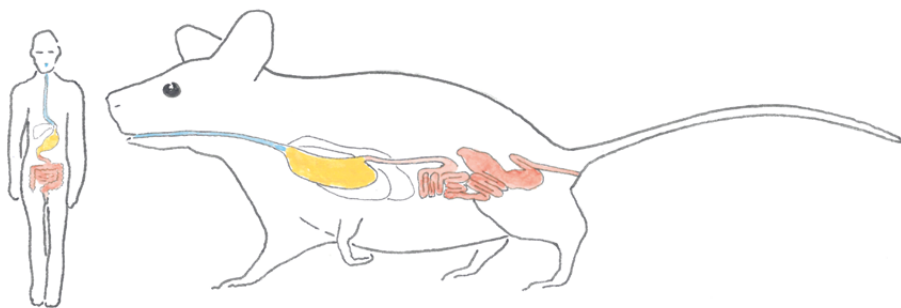


Image de la page précédente:

De la souris ou de l'humain, qui est le plus grand?, 2024, Blaise Mulhauser. Dessin au crayon et aquarelle.

Les dessins placés au début de chacune des quatre parties du livre représentent l'une des facettes du continuum du vivant. En ce qui concerne la relation entre la souris et l'humain, leurs systèmes digestifs se ressemblent beaucoup, ce qui permet de réaliser des études comparatives nécessaires pour avancer dans le domaine de la compréhension des pathologies et rechercher des solutions de soins. Les couleurs utilisées pour chacune des trois parties du système digestif valorisent les écosystèmes microbiotiques plutôt que l'individu holobionte qui les accueille. En bleu, la biocénose des microbes associés à la salive et à la préparation de la transformation des aliments. En orange, la biocénose du terrain hyperacide de l'estomac puis, en rouge, la zone des microbes du milieu intestinal au sens large. C'est dans cette région que les effets de neurotransmission provoqués sur le cerveau par les bactéries sont les plus dynamiques. Le rapport d'échelle entre la souris et l'humain représente les services que se rendent les deux espèces.

1 Des souris et des hommes

Par un beau jour de printemps 2010, ma compagne Julie remonta de la cave avec un petit être dans les mains. Il s'agissait d'un souriceau dont une patte était cassée. Cet accident l'avait sans doute empêché de fuir à l'approche du danger, avec le reste de la portée. Par chance pour le rongeur, Julie était plus encline à venir en aide à l'orphelin qu'à s'enfuir à son tour en criant à la bête! C'est ainsi que « Mérule » fit son entrée dans notre vie.

Ces rongeurs que nous connaissons si mal

La souris partagea notre quotidien – et celui de notre chat! – durant plusieurs mois. Il fallut d'abord apprendre à lui donner à manger car elle n'était pas sevrée au moment de son adoption. Le lait de vache ne semblant pas adapté pour un rongeur, nous optâmes pour de l'eau sucrée au miel que nous donnions au goutte-à-goutte ou dans la paume de notre main. Loin d'être une panacée, cette mixture a eu tout de même le mérite d'hydrater son organisme, tout en lui fournissant des calories. Par volonté sans doute, Mérule avait la vie chevillée au corps et de l'énergie à revendre. Elle prospéra rapidement, devenant un membre à part entière de la famille. Le seul regret que nous avions était de devoir l'enfermer dans une cage lorsque nous étions absents. Il était en effet évident que, malgré quelques comportements de protection

surprenants, le chat restait trop dangereux. Le premier d'entre nous qui rentrait à la maison libérait Mérule pour qu'elle explore son nouvel environnement. Pourtant, même sans le félin, nous dûmes nous rendre à l'évidence que la laisser vaquer n'était pas sans danger pour elle : sa confiance en nous la rendait vulnérable, nombreuses étant les fois où nous avons failli la blesser pour ne pas l'avoir vue trotter autour de nos pieds. Ses comportements, appris en notre compagnie, indiquaient que Mérule, biologiquement « souris », n'en était déjà plus vraiment une !

Son principal terrain de jeu devint la grande table de la salle à manger. Elle pouvait s'y ébattre sans risque d'être croquée par le félin ni d'être écrasée sous le pas d'un humain. Elle partageait nos repas en mangeant ce qui lui plaisait. N'allez pas croire que ses aliments de prédilection étaient le fromage ou des graines ; non, ses préférences allaient aux aliments carnés et souvent cuits, et le poulet rôti avait ses meilleures faveurs. Après le repas, nous pensions avoir un moment de pause pour digérer, mais c'était sans compter sur l'insatiable Mérule qui, après un toilettage complet du corps, se mettait en action. Elle rabattait alors ses oreilles et semblait agrandir ses yeux : elle nous invitait au jeu. Son préféré consistait à poursuivre nos doigts qui, tout en glissant sur la table, tapotaient le bois rapidement. La souris ne trottait pas, elle courait lestement. Lorsque la main stoppait, elle s'arrêtait aussi, rabattant à nouveau les oreilles et frétilant de la queue de manière saccadée. Je n'avais, à vrai dire, encore jamais imaginé qu'un représentant de la gent trottemenu puisse exprimer si clairement la volonté de partager une activité avec quelqu'un d'autre et, qui plus est, un être humain.

Lorsque Mérule disparut, j'eus envie d'en savoir davantage sur la vie des souris. Je me tournai naturellement vers les écrits des biologistes. Malheureusement, ceux qui étudiaient ce que l'on nomme « la faune sauvage » préféraient traquer le loup qu'observer ce qui se passait autour d'eux. À vrai dire, l'étude des comportements des rongeurs ne se faisait qu'en laboratoire, le plus souvent dans des labyrinthes ou des piscines qui testaient leur capacité à s'orienter, stresser ou... se noyer. Bien des assertions puisées dans la littérature ne semblaient pas correspondre aux observations que nous faisions avec Mérule. Bien entendu, seule de son espèce dans la compagnie des humains, elle ne pouvait faire l'objet de conclusions sérieuses en éthologie. Elle restait toutefois un être vivant doué d'une formidable capacité d'adaptation. Pour s'assurer d'une meilleure représentativité des comportements, nous devions donc étudier

non pas un individu esseulé, mais une population entière de souris; ce qui fait d'elles ce qu'elles sont dans une certaine normalité biologique.

C'est ainsi que, durant plus de deux ans, plusieurs générations de deux à quinze souris vinrent habiter chez nous. Aucune pourtant ne réitéra cette demande de jouer! Parmi les explications plausibles à ce fait, notons que ces souris formaient elles-mêmes une communauté et qu'aucune n'avait été adoptée seule et non sevrée. Néanmoins, cette nouvelle expérience fut l'occasion de réaliser une multitude d'observations sur leurs comportements sociaux, informations qui battaient en brèche tous les lieux communs que l'on peut lire dans des ouvrages généraux de zoologie. Des poncifs qui ne concernaient pas uniquement la nourriture, mais également les soins donnés aux jeunes et l'organisation sociétale. Outre le fait que mes sujets d'étude optaient tous pour un régime alimentaire riche en protéines animales, chacun d'eux présentait une personnalité très distincte de celle de ses parents ou congénères. Sur la trentaine d'individus que j'eus le loisir de bien observer, un fait significatif ressortit: lorsqu'une nichée était présente, la mère allaitait, mais ne s'occupait pas des petits une fois l'allaitement terminé. Si ceux-ci sortaient du nid, c'était toujours un mâle – et toujours le même – qui en prenait soin, ramenant les imprudents dans la zone de sécurité. Lorsque plus de six souriceaux s'éparpillaient, il faisait des allées et venues incessantes et montrait des signes d'épuisement une fois le calme revenu. Sans tomber dans un discours anthropocentrique, il était possible de distinguer la souris timide de l'extravertie, la téméraire de la craintive, ou encore la prévenante de l'agressive. C'est, du reste, une souris trop nerveuse qui mit fin à ces observations, car elle attaquait systématiquement toutes ses congénères au point que nous dûmes les séparer.

Plusieurs souris connurent la gueule du chat. Bien que ce dernier fût doux avec elles (il les tenait entre ses mâchoires sans leur faire de mal), nous intervenions le plus rapidement possible pour éviter tout accident plus grave. Le stress engendré les plongeait dans un état de prostration. Un parent bien précis (mais différent de cas en cas) léchait alors longuement la victime. Ce qu'on peut considérer comme une dispense de soins contrastait fortement avec l'indifférence généralisée du groupe face à une souris malade ou morte. Les deux maux les plus réguliers étaient des tumeurs qui se développaient sur différentes parties du corps et des paralysies de l'arrière-train. Les individus malades faisaient peine à voir. Dans le fol espoir que ceux-ci se rétablissent miraculeusement, je les laissais se mouvoir difficilement durant plusieurs

jours au milieu de leurs congénères sautillantes, avant de les libérer d'une vie devenue trop pénible. Un jour, l'une des souris étant par trop souffrante, je la pris dans la main et l'invitai à « partir » en lui murmurant que c'était le moment, tout en la caressant doucement. La chaleur de ma paume sembla la détendre, une torpeur l'enveloppa puis elle mourut d'une manière que l'on pourrait prétendre paisible. Cet événement me marqua fortement, si bien que j'offris à trois autres souris de « s'endormir » dans le nid chaud de mains humaines. Face à ce mystère, la question que cette expérience fit émerger dans mon esprit était la suivante : comment se fait-il qu'un être vivant n'ayant aucune expérience de l'accompagnement d'un congénère à la mort accepte sa propre mort au contact d'une autre espèce ?

Ainsi est née la tendresse particulière que j'éprouve pour les souris. Ce sentiment s'explique autant par l'émerveillement de découvrir leurs comportements insoupçonnés que par l'indifférence que leur portent la plupart des individus de ma propre espèce. L'humanité entière leur est pourtant redevable, car elles sont, avec d'autres rongeurs tels que les rats ou les cobayes, les substituts à d'innombrables expériences inhumaines. Le paradoxe apparaît encore plus crûment à la lumière de ces faits : nous ignorons encore bien des aspects de leur vie sociale, leurs comportements nous étant par exemple nettement moins connus que ceux des abeilles, alors que la littérature scientifique leur a consacré des dizaines de milliers d'études, surtout dans le domaine médical (test de médicaments), mais également dans celui de la physiologie animale comparative, comme substitut pratique à l'étude du corps humain. Car en vérité, la plupart des études consacrées à la biologie des rongeurs de laboratoire parlent surtout de l'être humain. C'est notamment le cas dans toutes les recherches en neurosciences où, depuis une dizaine d'années, les découvertes se succèdent sur la fonction du microbiote intestinal dans la transmission d'informations nerveuses essentielles au bon fonctionnement de l'organisme « souris » ou « rat ».

Microbiote et microbiome

Le microbiote se définit comme l'ensemble des micro-organismes, ou « microbes », vivant dans un environnement particulier, lui-même dès lors nommé « microbiome ». Entrent dans la catégorie des micro-organismes du microbiote : des procaryotes (êtres unicellulaires sans noyau, comme les bactéries et les archées), des eucaryotes

unicellulaires (êtres constitués d'une seule cellule avec présence d'un noyau, comme les amibes, champignons unicellulaires, etc.) et des eucaryotes multicellulaires de taille microscopique (champignons surtout). Cet espace de vie dans lequel s'épanouissent les microbes peut être aussi physique (source d'eau, sol, etc.) qu'organique (milieu végétal ou animal interne par exemple). Cette définition « classique » du microbiote possède d'emblée un biais simplificateur, n'établissant aucune distinction entre les êtres qui le composent, quand bien même peuvent cohabiter plus de mille espèces différentes dont les caractéristiques et le mode de vie ne sont pas les mêmes. C'est le cas par exemple du microbiote du système digestif d'un mammifère, appelé aussi « flore intestinale ».

En l'occurrence, ce sont surtout les études sur le rôle du microbiote intestinal pour la santé humaine qui se multiplient dans ce premier quart du XXI^e siècle. Puisqu'il s'avère souvent impossible de tester l'effet du changement d'une communauté de micro-organismes directement sur une population d'hommes et de femmes, les souris de laboratoire apportent un grand secours aux chercheurs. Le principe général est souvent le même : comparer les réactions d'individus présentant un microbiote équilibré avec celles de populations sans flore intestinale. Ces dernières réunissent des souris dites « axéniques » (littéralement « sans corps étranger ») qui ne vivent qu'à l'ombre de laboratoires dans lesquels règnent des conditions d'hygiène absolues ; elles ne pourraient pas prospérer à l'état sauvage car leur système digestif ne supporterait pas l'arrivée de micro-organismes inconnus. Elles naissent par césarienne dans un environnement sans germes, puis sont élevées sous bulle stérile, ainsi que toute leur descendance et les générations suivantes. Celles-ci se succédant rapidement, les chercheurs testent leurs hypothèses sur un cycle de vie de deux ans au maximum, ce qui constitue un avantage certain pour la valorisation de leurs résultats et les aspects souvent pharmaceutiques qui en découlent.

L'une des questions récurrentes est de savoir si les gènes d'un individu peuvent évoluer à la suite d'un changement opéré dans le microbiote de son système digestif et, le cas échéant, si cet individu peut transmettre ce changement à sa descendance. À la recherche de base (comparaison de réactions entre rongeurs axéniques et rongeurs « normaux ») s'ajoutent donc des variantes plus ou moins sophistiquées. L'une d'elles consiste à injecter du microbiote intestinal humain dans le système digestif de jeunes rongeurs stériles – l'âge des individus

jouant un rôle dans la réponse aux changements. Pour pouvoir établir l'influence d'un facteur de base, par exemple la présence d'un germe infectieux, la moitié des souris reçoivent l'agent pathogène se développant chez des humains malades, et l'autre moitié le même microbe mais provenant de porteurs sains. Chaque rongeur va réagir avec l'aide du microbiote dont il a été ainsi doté, induisant des réactions en chaîne et la production de métabolites différents. Une analyse métagénomique (c'est-à-dire de l'ensemble des génomes présents dans un échantillon, reflet de la diversité des espèces) permet de rendre compte de l'évolution de l'ensemble de la flore intestinale entre le début et la fin de l'étude. Les améliorations ou détériorations des états de santé des souris sont évidemment prises en compte dans l'analyse des résultats. Grâce à ces méthodes, nous savons désormais qu'une flore déséquilibrée du système digestif, et plus particulièrement celle de l'intestin, cause des douleurs intestinales (Luczynski *et al.* 2017) et des déficiences de la motilité intestinale (Ge *et al.* 2017), tout en développant l'anxiété (De Palma *et al.* 2017), voire des états dépressifs (Kelly *et al.* 2016 ; Zheng *et al.* 2016), ainsi que des accidents vasculaires (Benakis *et al.* 2016).

L'une des études les plus spectaculaires dans ce domaine a été celle de l'effet de la colonisation postnatale de la flore gastro-intestinale (c'est-à-dire le microbiote de l'ensemble du système digestif, y compris l'estomac) sur la régulation du stress des souris (Sudo *et al.* 2004). Il faut rappeler que, chez tous les vertébrés, sans exception, l'environnement fœtal est presque stérile. S'il a été démontré récemment qu'un échange de biote pouvait avoir lieu entre la mère et son enfant (Collado *et al.* 2016), la majorité des micro-organismes ne colonisent en effet le corps qu'au moment de la naissance. Il en va ainsi pour le tractus digestif. Partant du postulat que les premiers microbes colonisateurs jouent un rôle majeur dans la maturation du système immunitaire (Hooper & Gordon 2001), l'équipe japonaise a émis l'hypothèse que, selon sa composition, le microbiote intestinal pourrait avoir une incidence sur l'état de tension des individus. Elle a alors comparé la réponse au stress entre trois types d'individus : des souris axéniques, des congénères ayant un microbiote sans pathogènes, et d'autres dits « gnotobiotiques » dans l'intestin desquels seuls des micro-organismes choisis ont été injectés. L'état de stress a été mesuré grâce au changement des taux de deux hormones : l'adrénocorticotrophine et la corticostérone. Nommée également « hormone corticotrope » (fréquemment abrégée

ACTH en recherche médicale), la première est émise par l'hypophyse (ou «glande pituitaire») sous l'influence directe de l'hypothalamus du système nerveux central. En allant se fixer sur des récepteurs des glandes surrénales, elle active la production de la seconde hormone, la corticostérone. Cette dernière a une importance dans le contrôle des émotions, mais également de leur mémorisation. Chez l'humain (et sans doute aussi chez la souris), elle jouerait ainsi un rôle majeur dans le renforcement de souvenirs émotionnels, surtout ceux liés à la peur (Albrecht *et al.* 2013); c'est pourquoi on l'appelle communément «hormone du stress». Les résultats de l'étude ont montré que la colonisation de souriceaux par le microbiote a un effet sur leur système immunitaire et, de ce fait, sur la capacité à gérer leur état émotionnel. Les souris axéniques produisent beaucoup plus d'hormones que les souris possédant une flore intestinale normale, exempte de pathogènes. Chez les souris stériles, l'inoculation de bactéries favorables (*Bifidobacterium infantis*) diminue leur stress, alors que l'apport d'un pathogène (*Escherichia coli*) l'augmente. De plus, la reconstitution du microbiote des souris axéniques a un effet positif chez les souriceaux, mais pas chez les souris âgées, confirmant l'importance d'une exposition aux microbes dès le plus jeune âge, afin d'assurer un système de régulation neuro-hormonale pleinement efficient.

Une autre étude a détaillé l'incidence du manque de micro-organismes gastro-intestinaux sur l'état dépressif des rats (Kelly *et al.* 2016). Tout comme le stress, la dépression s'exprime par une activité accrue de l'axe corticotrope (*Hypothalamic-pituitary-adrenal*, abrégé HPA en recherche médicale) qui, évoqué dans le paragraphe précédent, relie le système nerveux central au système endocrinien par l'hypophyse et les glandes surrénales. Afin de mener cette recherche, l'équipe de l'Université de Cork (Irlande) a prélevé les fèces de trente-quatre patients souffrant de dépression grave et de trente-trois personnes en bonne santé. Une partie des échantillons a été utilisée pour une analyse directe de la richesse et de la diversité des espèces composant le microbiote. Elle révèle une pauvreté significative chez les personnes atteintes de dépression, notamment une carence importante de bactéries de la famille des Prevotellacées (*Prevotella sp.*). À noter que cette rareté a également été observée chez les personnes atteintes de la maladie de Parkinson (Gustafsson, Nordstrom & Nordstrom 2015; Scheperjans *et al.* 2015). L'autre partie des selles a été administrée à des

rats. Quatre tests comportementaux classiques dans l'étude de l'anxiété et de la motivation ont alors été appliqués :

- L'examen de préférence au saccharose (*sucrose preferenced test*), consistant à donner au rongeur le choix entre deux sources de nourriture liquide, l'une contenant de l'eau, l'autre une solution de saccharose, les bouteilles étant régulièrement interverties afin d'éviter une habitude du sujet testé (un rat sain boit préférentiellement la solution sucrée « source de plaisir », au contraire d'un congénère en état d'anhédonie¹ sévère qui ne présente aucune envie particulière) ;
- L'expérience du labyrinthe en croix surélevé (*elevated plus maze test*), au cours de laquelle un rongeur peut évoluer dans quatre corridors, dont deux sont fermés par des parois et deux sont ouverts (plus un animal est anxieux, moins il passe de temps à explorer les couloirs sans murs) ;
- Le test du champ ouvert (*open field test*), qui permet d'évaluer le stress d'un rongeur placé au centre d'une enceinte inconnue (un sujet stressé a tendance à se réfugier contre les parois) ;
- Le test de la nage forcée (*forced swim test*) qui consiste à mesurer le temps de réaction d'un rat placé au milieu d'une bassine d'eau (un individu dépressif a tendance au fatalisme, restant immobile plus longtemps qu'un individu sain).

À l'exception du test de la nage forcée où des différences existent sans être statistiquement significatives, les résultats de l'étude irlandaise montrent que les rats ayant reçu une flore intestinale de donneurs humains malades ont également développé des comportements dépressifs.

Extraits d'une littérature abondante aux conclusions identiques, les quelques exemples ci-dessus montrent que des liens existent entre la composition de la flore intestinale et la stimulation hormonale du système endocrinien par le système nerveux central. Qu'est-ce que cela implique ontologiquement ? Un état dépressif est considéré comme maladif, changeant la vision consciente qu'un individu a de la vie, allant même jusqu'à nier son utilité. Est-il donc possible que les microbes qui vivent dans le système digestif des animaux puissent les influencer au point d'altérer leur conscience ? Et si c'était le cas, cette conclusion pourrait-elle s'appliquer à l'humain ?

¹ Anhédonie : incapacité à ressentir des émotions positives.

Bibliographie

- Albrecht A., G. Çaliskan, M. S. Oitzl, U. Heinemann & O. Stork (2013). Long-lasting increase of corticosterone after fear memory reactivation: anxiolytic effects and network activity modulation in the ventral hippocampus. *Neuropsychopharmacology* 38: 386-394.
- Benakis C., D. Brea, S. Caballero, G. Faraco, J. Moore, M. Murphy, G. Sita, G. Racchumi, L. Ling, E. G. Pamer, C. Iadecola & J. Anrather (2016). Commensal microbiota affects ischemic stroke outcome by regulating intestinal $\gamma\delta$ T cells. *Nat Med.* 22: 516-523. doi.org/10.1038/nm.4068 (consulté le 30.01.2024).
- Collado M. C., S. Rautava, J. Aakko, E. Isolauri & S. Salminen (2016). Human gut colonisation may be initiated in utero by distinct microbial communities in the placenta and amniotic fluid. *Scientific Reports* 6: 23129.
- De Palma G., M. D. J. Lynch, J. Lu, V. T. Dang, Y. Deng, J. Jury, G. Umeh, P. M. Miranda, M. Pigrau Pastor, S. Sidani, M. In. Pinto-Sanchez, V. Philip, P. G. McLean, M.-G. Hagelsieb, M. G. Surette, G. E. Bergonzelli, E. F. Verdu, P. Britz-McKibbin, J.-D. Neufeld, S. M. Collins & P. Bercik (2017). Transplantation of fecal microbiota from patients with irritable bowel syndrome alters gut function and behavior in recipient mice. *Sci. Transl. Med.* 9(379): eaaf6397. doi.org/10.1126/scitranslmed.aaf6397 (consulté le 30.01.2024).
- Ge X., C. Ding, W. Zhao, L. Xu, H. Tian, J. Gong, M. Zhu, J. Li & N. Li (2017). Antibiotics-induced depletion of mice microbiota induces changes in host serotonin biosynthesis and intestinal motility. *J. Transl. Med.* 15: 13. doi.org/10.1186/s12967-016-1105-4 (consulté le 30.01.2024).
- Gustafsson H., A. Nordstrom & P. Nordstrom (2015). Depression and subsequent risk of Parkinson disease: a nationwide cohort study. *Neurology* 84(24): 2422-2429.
- Hooper L. V. & J. I. Gordon (2001). Commensal host-bacterial relationships in the gut. *Science* 292: 1115-1118.
- Kelly J. R., Y. Borre, C. O'Brien, E. Patterson, S. El Aidy, J. Deane, P. J. Kennedy, S. Beers, K. Scott, G. Moloney, A. E. Hoban, L. Scott, P. Fitzgerald, P. Ross, C. Stanton, G. Clarke, J. F. Cryan, & T. G. Dinan (2016). Transferring the blues: depression-associated gut microbiota induces neurobehavioural changes in the rat. *Journal of Psychiatric Research* 82: 109-118.
- Luczynski P., M. Tramullas, M. Viola, F. Shanahan, G. Clarke, S. O'Mahony, T. G. Dinan & J. F. Cryan (2017). Microbiota regulates visceral pain in the mouse. *eLife* 6:e25887. doi.org/10.7554/eLife.25887 (consulté le 30.01.2024).
- Scheperjans F., V. Aho, P. A. Pereira, K. Koskinen, L. Paulin, E. Pekkonen, E. Haapaniemi, S. Kaakkola, J. Eerola-Rautio, M. Pohja, E. Kinnunen, K. Murros & P. Auvinen (2015). Gut microbiota are related to Parkinson's disease and clinical phenotype. *Mov. Disord. Official J. Mov. Disord. Soc.* 30(3): 350-358.
- Sudo N., Y. Chida, Y. Aiba, J. Sonoda, N. Oyama, X.-N. Yu, C. Kubo & Y. Koga (2004). Postnatal microbial colonization programs the hypothalamic-pituitary-adrenal system for stress response in mice. *J. Physiol.* 558: 263-275.
- Zheng P., B. Zeng, C. Zhou, M. Liu, Z. Fang, X. Xu, L. Zeng, J. Chen, S. Fan, X. Du, X. Zhang, D. Yang, Y. Yang, H. Meng, W. Li, N. D. Melgiri, J. Licinio, H. Wei & P. Xie (2016). Gut microbiome remodeling induces depressive-like behaviors through a pathway mediated by the host's metabolism. *Mol. Psychiatry* 21(6): 786-796.

2 | **Avoir les yeux plus gros que le ventre**

Depuis quelques années, l'opinion publique dit de notre ventre qu'il constitue un «deuxième cerveau». Cela me semble être un bel abus de langage dont l'origine est à nouveau à trouver dans une logique anthropocentrique; ce «moi» est le résultat d'une capacité à se situer dans l'espace et le temps, au centre de tout ce qui n'est pas «soi», l'altérité d'un monde qui paraît obligatoirement extérieur. Instinctivement, nous plaçons la conscience de l'ego dans le cerveau, jamais très loin des yeux. Nous sommes donc convaincus que cet organe dirige tout, même s'il est évident que seul, il n'est pas apte à nous maintenir en vie. Or, la capacité de conscience trouve son origine dans une organisation beaucoup plus complexe qu'on ne le pense (Aru *et al.* 2019; lire aussi le chapitre 14 «La conscience en tout être»). Ainsi, si j'ajoutais à la fameuse phrase de Descartes la fonction vitale qui est celle de s'alimenter, cela donnerait: «Je mange, donc je pense, donc je suis». Notre système digestif n'est pas notre «second cerveau», il en est l'origine (Mulhauser *in* Baud 2018).

Le système nerveux entérique

Ballonnements, gargouillis, gaz, crampes: notre conscience souhaiterait cacher cette partie de notre intimité exempte d'un grand raffinement. La honte qu'on en éprouve vient évidemment du fait que

nous n'y pouvons rien. En effet, si notre cerveau contrôle involontairement la plupart de nos organes, il reste totalement incapable d'agir sur le système digestif. Un autre centre autonome prend la vie de notre ventre en charge : le système nerveux entérique digestif. Celui-ci est composé de plus de 200 millions de neurones qui transmettent des informations au cerveau. Ces signaux sont essentiels pour que l'organisme reste actif, en « état d'éveil », par exemple pour ressentir la faim ou une potentielle intoxication. Mais qui donne les impulsions d'information ? Ce que nous appellerions l'inconscient ou l'instinctif, et que nous savons si mal définir car échappant justement au contrôle de notre conscience ?

Des maladies neurodégénératives telles que la maladie de Parkinson, d'Alzheimer ou encore la démence à corps de Lewy, semblent toucher toutes les cellules nerveuses, y compris celles du système nerveux entérique digestif. Ces maladies se caractérisent par la présence, à l'intérieur des neurones du cerveau, de masses sphériques² anormales qui sont des agrégats de protéines³. Des recherches récentes ont permis d'identifier ces mêmes masses dans le ventre de patients atteints de l'une ou l'autre des pathologies citées ci-dessus. Aux stades les plus avancés de ces atteintes, les patients souffrent d'une altération de leur conscience, pouvant même provoquer des hallucinations ou aboutir à des aphasies. Quel peut donc être le lien entre le cerveau, le ventre et ces maladies ? Outre le facteur de vieillissement des gens, celui de la qualité des aliments ingérés paraît évident. Mais pour que cette nourriture soit diffusée dans l'ensemble du corps infiniment complexe de l'être humain (ou de tout autre animal), il faut bien qu'elle puisse être digérée.

Hormones et neurotransmetteurs, le microbiote à l'œuvre

Cependant, comme nous l'avons déjà vu dans le premier chapitre, ceux que l'on appelle vulgairement les microbes ne font pas que digérer : ils influencent aussi la production d'hormones dont les effets sont importants. Une synthèse des connaissances actuelles sur le sujet a été réalisée par le centre de découverte antimicrobienne (!) d'une université

² Appelées « corps de Lewy », du nom de son découvreur F. H. Lewy en 1912.

³ Alpha-synucléine et ubiquitine.

de Boston qui a passé en revue plus de soixante-dix recherches décrivant le lien entre l'activité de certaines bactéries du tractus digestif et l'action des neurotransmetteurs (Strandwitz 2018). Ces derniers sont des molécules synthétisées principalement dans le cerveau (mais pas seulement!), et qui permettent aux neurones de transmettre une information cérébrale en transformant l'influx électrique en message chimique. Grâce à cette synthèse, l'auteur a pu dresser la liste des microbes – plus de trente espèces⁴ – qui produisent eux-mêmes six types de neurotransmetteurs: la dopamine, la noradrénaline, la sérotonine, l'acide gamma-aminobutyrique (abrégé GABA en recherche médicale), l'acétylcholine et l'histamine. Tous ces éléments ont des implications sur notre état de santé psychique. Un déficit ou un excès de production de l'un ou l'autre peut engendrer des dysfonctionnements tels que de l'anxiété excessive, des troubles de la concentration et de la mémoire, des comportements impulsifs, de l'apathie ou encore un état dépressif. Pour illustrer brièvement l'importance de ces six molécules sur notre état de conscience et comprendre le lien qu'elles ont avec les micro-organismes qui vivent en nous, j'ai choisi de présenter un exemple d'étude pour chacune d'entre elles.

- La première série de travaux concerne les effets du tabac (*Nicotiana tabacum*), non pas dans sa capacité à développer des sources de cancer du système respiratoire⁵, mais dans celle de soigner des maladies dégénératives. Alcaloïde puissant servant à la plante pour se protéger contre la dent des herbivores (Mulhauser 2023), la nicotine semble également avoir des effets bénéfiques contre la maladie de Parkinson (Ritz *et al.* 2007). Structuellement proche de la dopamine, hormone régulatrice de notre stress, de nos humeurs et de notre capacité de prise de risque, la nicotine en stimule la production (Gjedde *et al.* 2010). Cette protéine bienfaisante, synthétisée par nos neurones mais aussi par des bactéries de notre flore intestinale, permet de lutter contre l'oxydation des cellules, ce qui freine leur vieillissement (Lu *et al.* 2017). Sur la base d'observations démontrant que les personnes atteintes de la maladie arrivent à s'abstenir de fumer, une équipe américaine suggère même que l'arrêt facile de l'addiction au tabac puisse être considéré comme un indice précurseur de la maladie de Parkinson (Ritz *et al.* 2014).

⁴ En l'état actuel des connaissances, mais la liste va très certainement s'allonger.

⁵ En réalité ici, le principal problème est la combustion puis la respiration de microparticules, et non pas les métabolites de la plante elle-même.

Toutefois, l'ensemble du processus est loin d'être expliqué et les micro-organismes « excités » par la substance pourraient bien aussi jouer un rôle (Scheperjans *et al.* 2015). D'autres chercheurs ont démontré qu'une synergie existe entre la nicotine et les neurotransmetteurs que sont la dopamine et l'acétylcholine, mais également avec d'autres alcaloïdes du tabac tels que la cotinine et ses métabolites (Barreto, Iarkov & Moran 2014). L'acétylcholine est un neurotransmetteur facilitant les processus de contraction musculaire, d'apprentissage et de mémorisation. Elle joue donc un rôle important dans les fonctions cognitives des animaux. Or, *Lactobacillus plantarum*, reconnue comme étant une « bonne » bactérie du tractus digestif, est également capable de synthétiser l'acétylcholine (Stanaszek, Snell & O'Neill 1977). Bien que son effet sur les capacités cognitives de l'être humain soit encore méconnu – la voie de transmission du microbe au cerveau n'est pas claire –, ce microbe est un facteur clé de l'équilibre du tractus digestif. On sait aujourd'hui que le microbiote peut également synthétiser la cotinine du tabac, cet alcaloïde semblant avoir « une action antidépressive, stimulant la biosynthèse de prostacycline, un vasodilatateur, tout en libérant la dopamine et la noradrélanine » (Mulhauser, 2023).

- La noradrénaline (ou « norépinephrine ») et l'adrénaline (ou « épinephrine ») appartiennent au même groupe de neurotransmetteurs que la dopamine. Outre leurs actions sur le système nerveux, ces catécholamines jouent également un rôle dans la circulation sanguine. Le stress a par exemple pour effet d'augmenter le taux de ces substances dans le sang, avec pour réponse une pression artérielle plus haute et une fréquence plus élevée des battements du cœur. Or, certaines espèces de la flore intestinale peuvent réagir à l'augmentation des taux de ces neurotransmetteurs de deux manières : soit en se multipliant (c'est notamment le cas de la bactérie potentiellement pathogène *Escherichia coli* [Freestone *et al.* 2002; Freestone, Haigh & Lyte 2007]), soit en produisant elles-mêmes ces molécules (Tsavkelova *et al.* 2000). En ce qui concerne la noradrénaline, ces faits sont corroborés par les résultats d'une étude sur des souris axéniques dont le niveau anormalement bas de ce neuromédiateur a été relevé après une injection de microbiote comportant plus de quarante-six espèces de bactéries de la famille des *Clostridiaceae* (Asano *et al.* 2012). Du reste, il a été démontré que l'influence de la flore intestinale sur le système de production des

catécholamines était importante pour le fonctionnement cérébral en situation de stress (Heijtz *et al.* 2011; Kiraly *et al.* 2016).

- La sérotonine – nommée également « hormone du bien-être » – s'avère être un neurotransmetteur essentiel pour le sommeil, l'alimentation ou le désir sexuel; j'y reviendrai dans le chapitre 14 « La conscience en tout être ». En travaillant sur des souris très jeunes, âgées d'un à quinze jours, les chercheurs ont constaté que l'injection de doses de sérotonine différentes d'un individu à l'autre induisait une qualité de sommeil également différente de ces rongeurs une fois parvenus à l'âge adulte. Ces résultats suggèrent donc que la qualité du repos nocturne, mais aussi la fragilité émotionnelle d'une personne, sont liées à un déséquilibre du système de production de cette hormone (Alexandre *et al.* 2006; Bonnavion *et al.* 2010; Popa *et al.* 2008). Nous savons qu'en situation de stress, de dépression ou aussi de sentiments amoureux, le taux de sérotonine diminue. Nous savons aussi que celui-ci a une incidence claire sur le développement de l'embryon chez la femme enceinte. Or la flore intestinale joue un rôle majeur dans la régulation du taux de sérotonine (Clarke *et al.* 2012), plus de 90 % de la production de ce neurotransmetteur étant stockée dans le tractus gastro-intestinal (Gershon & Tack 2007). On peut ainsi en conclure que l'expression « avoir la boule au ventre » se traduit dans la réalité par un fonctionnement altéré de notre microbiote digestif, et envisager une explication aux envies maternelles instinctives d'aliments sucrés. Notons enfin que des produits psychotropes tels que le LSD ou l'Ecstasy augmentent temporairement mais violemment le taux de sérotonine.
- Inhibiteur du système nerveux central chez l'adulte, mais proactif lors du développement embryonnaire, l'acide gamma-aminobutyrique joue un rôle capital pour le repos de nos neurones en leur évitant un *burn-out*. Il est aussi impliqué dans leur régénération. C'est pourquoi ce neuromodulateur est utilisé pour lutter contre des types d'épilepsie particulière ou des troubles de l'humeur tels que la dépression ou l'anxiété. Une étude montre du reste un lien direct entre l'introduction dans l'intestin de souris de *Lactobacillus rhamnosus*, un microbe fréquent de la flore intestinale, et l'augmentation de l'activité du neurotransmetteur, se traduisant par une baisse des comportements dépressifs (Bravo *et al.* 2011). De même, la présence de *Bifidobacterium* chez les rats provoque une hausse de la production d'acide gamma-aminobutyrique, réduisant parallèlement la

sensibilité de ces rongeurs à la douleur viscérale (Pokusaeva *et al.* 2017). Toutefois, la découverte la plus étonnante est celle d'une bactérie « neurodépendante » nommée « KLE1738 », qui ne se nourrit que de GABA. Comme elle n'accepte aucun autre carburant, elle est difficile à cultiver en dehors de son hôte. Les chercheurs ont tout de même réussi ce défi en extrayant de l'acide gamma-aminobutyrique de la bactérie *Bactéroïdes fragilis*, qui en produit beaucoup. Grâce à ce tour de force, ils ont mis en évidence que la densité des bactéries du genre *Bactéroïdes* était corrélée avec les signes cérébraux de la dépression (Strandwitz *et al.* 2019).

- Des six neurotransmetteurs cités, l'histamine (bêta-imidazol-éthylamine) est incontestablement celui qui est le plus difficile à étudier tant les rôles que cette molécule azotée endosse sont multiples. La plupart des organismes vivants (si ce n'est tous) synthétisent cette hormone, nous permettant de suspecter une origine bactérienne très ancienne. On la retrouve dans tous les tissus du corps, mais plus spécialement dans les poumons, le foie, l'estomac, la peau et le cerveau. L'histamine est stockée dans des récepteurs dits « histaminiques » (Brown, Stevens, Haas *et al.* 2001), prête à être libérée à la moindre alerte du système immunitaire. Elle aide ainsi à de nombreuses fonctions telles que la contraction musculaire, la vasodilatation, la régulation de la sécrétion gastrique et les différents types de réaction épidermique (eczéma, intoxication alimentaire, prurit, œdème, urticaire, etc.). Du reste, les médicaments qui cherchent à gommer les effets des réactions allergiques sont dits « antihistaminiques ». Elle est également considérée comme un neurotransmetteur ; sa diffusion en plus ou moins grande quantité étant responsable de l'état d'éveil ou de veille du cerveau (Brown, Stevens, Haas *et al.* 2001 ; Haas, Sergeeva, Selbach *et al.* 2008). Par conséquent, un nombre élevé d'études ont porté sur l'effet des substances neuroleptiques sur la production de l'histamine ou sa dégradation à l'aide d'une enzyme nommée « diamine-oxydase » (DAO). L'état de somnolence, voire d'effet d'endormissement subit, provoqué par une trop importante ingestion d'alcool, est passé au crible des laboratoires pharmacologiques qui cherchent à lutter contre l'alcoolisme (Zimatkin & Anichtchik 1999). Par exemple, une étude réalisée sur des souris de laboratoire a permis de mettre en évidence l'effet d'un médicament antagoniste au stockage trop important d'histamine dans les récepteurs histaminiques de type H₃.

Les souris adultes qui avaient le choix (libre et illimité) entre deux types de boissons alcoolisées (dont une enrichie par l'antagoniste) ont montré que la prise de l'antagoniste a réduit de manière significative la prise d'éthanol (Bahi *et al.* 2015). Le large spectre d'actions (immunitaire, digestive et neuronale) de cette hormone d'alerte montre à quel point l'interaction entre le microbiote et notre organisme dans son ensemble est complexe. Une trop forte absorption d'aliments riches en histamine (chocolat, poissons, fromages, alcool, certains légumes comme la tomate ou les aubergines, etc.) peut par exemple provoquer une augmentation de la synthèse d'histamine par les bactéries du tube digestif, cette dernière provoquant des réactions allergiques encore plus fortes. Afin de lutter contre ces déséquilibres, notre corps produit la diamine-oxydase (DAO), une enzyme de dégradation de l'histamine, produite principalement dans les intestins et les reins (McGrath *et al.* 2009).

Rappelons que, selon la synthèse établie par Strandwitz (2018), une trentaine d'espèces de microbes sont capables de produire des neurotransmetteurs. La bactérie la plus « productive » est un lactobacille (*Lactobacillus plantarum*) qui peut synthétiser l'acétylcholine, l'histamine, l'acide gamma-aminobutyrique et la sérotonine. En l'état actuel des connaissances, il s'avère possible d'opérer une distinction entre le groupe des bactéries qui synthétisent l'histamine et l'acide gamma-aminobutyrique (*Lactobacillus sp.*, *Streptococcus sp.*) et celui des productrices de noradrenaline et dopamine (*Bacillus sp.*, *Escherichia coli*, *Proteus vulgaris*, *Serratia marcescens*) (Özoğul 2004; Özoğul F. K., Özoğul Y. & Özoğul I. 2012). Pas moins de sept espèces du microbiote, appartenant à sept genres différents, produisent la sérotonine: *Escherichia coli*, *Hafnia alvei*, *Klebsiella pneumoniae*, *Lactobacillus plantarum*, *Lactococcus lactis*, *Morganella morganii* et *Streptococcus thermophilus*. Enfin, dans ce passage en revue très simplifié des bactéries actives dans la neurotransmission, celles du genre *Bifidobacterium* semblent très impliquées dans la production d'acide gamma-aminobutyrique (Barrett *et al.* 2012).

Je ne saurais terminer cette série d'exemples sans mettre en évidence une origine microbienne des troubles du comportement alimentaire tels que l'anorexie ou la boulimie (Fétissoff & Déchelotte 2011). En effet, lorsqu'elles sont en situation de stress, les bactéries de la flore intestinale produisent une protéine appelée ClpB, qui est le

sosie presque parfait de la mélanotropine, hormone de satiété. Comme à toute action répond une réaction, notre système immunitaire va mettre en place des anticorps pour lutter contre la protéine indésirable. Toutefois, comme la structure de la ClpB est très proche de celle de la mélanotropine, les anticorps vont également se fixer sur l'hormone de satiété, provoquant selon l'état hormonal du sujet un refus de manger ou au contraire une avidité à se nourrir.

Le système nerveux sous influence

Le message principal à retenir des exemples énumérés ci-dessus est que, selon la composition de sa flore intestinale, les comportements d'une souris s'en trouvent modifiés, ainsi que l'expression des gènes qui contrôlent le cerveau, suggérant un lien avec le développement du cerveau d'un rongeur nouveau-né (Heijtz *et al.* 2011). L'étude d'une équipe de l'Université de Cork a pu démontrer que, dans l'hippocampe de souris, partie du cerveau qui joue un rôle important dans les processus de mémorisation, la neurogenèse adulte, c'est-à-dire l'apparition de nouvelles cellules nerveuses dans un cerveau entièrement développé (donc « adulte »), est régulée par l'environnement microbiotique (Ogbonnaya *et al.* 2015). Grâce à des techniques d'immunohistochimie lumineuse, les chercheurs ont en effet documenté l'apparition de nouvelles cellules nerveuses dans la région dorsale de l'hippocampe de souris axéniques, après leur avoir injecté la flore intestinale de souris saines. Ces résultats renforcent la justesse de l'hypothèse tendant à considérer que le microbiote influence non seulement le fonctionnement, mais également la régénération du cerveau. Le microbiote exerce donc une influence sur le développement du système nerveux des rongeurs.

Tout porte à croire qu'il en va de même pour les hommes et les femmes. En effet, comme décrit dans le premier chapitre, les protocoles de recherche sont construits de manière à pouvoir réaliser des comparaisons significatives entre les maux dont souffrent les êtres humains et les réactions aux mêmes atteintes des cobayes d'étude. Des liens ont ainsi pu être mis en évidence entre la composition de la flore intestinale et des maladies neurodégénératives telles qu'Alzheimer (Minter *et al.* 2016) ou Parkinson (Sampson *et al.* 2016), des affections auto-immunes comme la sclérose en plaques (Berer *et al.* 2017; Cekanaviciute *et al.* 2017), ainsi que des troubles du développement appartenant par

exemple au spectre de l'autisme (Hsiao *et al.* 2013). Après avoir contracté ces symptômes par l'injection de microbes ciblés, les souris axéniques ont pu être « soignées » par l'administration d'une flore plus équilibrée. Cela a aussi permis aux chercheurs de tester sur les rongeurs toutes sortes de médicaments, des anxiolytiques aux somnifères, en passant par un large spectre d'antibiotiques.

Aujourd'hui encore, les médecins tiennent pour acquis que la plupart des maladies psychiques, psychosomatiques, dégénératives ou de dépendance auraient des causes génétiques. Par exemple, en France, un rapport de synthèse sur les déficiences intellectuelles basé sur plus de 2500 études constate que 35 % des causes de déficience seraient génétiques et 13 % « seulement » environnementales (Anonyme 2016); un important décalage avec les résultats des études sur les effets du microbiote. Ces recherches me suggèrent l'hypothèse selon laquelle l'altération du génome d'un individu pourrait être liée à des échanges d'informations par transfert de gènes des micro-organismes endosymbiotiques (voir le chapitre 12 « Un trafic génétique continu »), et de façon bien plus rapide qu'on ne le pense (sur une ou deux générations seulement). Ne serait-il pas souhaitable que les chercheurs en médecine orientent davantage leurs recherches dans ces desseins, et que par ailleurs nous appliquions impérativement le principe de précaution en bannissant toute substance « méconnue » ou dont l'effet n'est pas étudié sur le microbiote ? Je pense autant à des médicaments qu'aux pesticides, produits cosmétiques, plastiques et autres molécules de synthèse. Bien que déjà sensibilisée aux symbioses, l'approche des chercheurs reste largement anthropocentrique, puisque les recherches sont centrées sur l'être humain et les maladies y relatives. Une approche symbiologique, telle que je la conçois, se doit de considérer les organismes pour eux-mêmes afin de comprendre les liens qui les unissent.

Bibliographie

- Alexandre C., D. Pop, V. Fabre, S. Bouali, P. Venault, K. P. Lesch, M. Hamon & J. Adrien (2006). Early life blockade of 5-HT_{1A} receptor normalizes sleep and depression-like behavior in adult knock-out mice lacking the serotonin transporter. *J. Neurosci.* 26: 5554-5564.
- Anonyme (2016). *Déficiences intellectuelles. Synthèse et recommandations*. Inserm, Paris, collection « Expertise collective ».
- Aru J., M. Suzuki, R. Rutiku, M. E. Larkum & T. Bachmann (2019). Coupling the state and contents of consciousness. *Front. Syst. Neurosci.* 13: 43. doi.org/10.3389/fnsys.2019.00043 (consulté le 30.01.2024).

- Asano Y., T. Hiramoto, R. Nishino, Y. Aiba, T. Kimura, K. Yoshihara, Y. Koga & N. Sudo (2012). Critical role of gut microbiota in the production of biologically active, free catecholamines in the gut lumen of mice. *Am. J. Physiol. Gastrointest. Liver Physiol.* 303(11): 1288-1295.
- Bahi A., B. Sadek, S. M. Nurulain, D. Łażewska & K. Kieć-Kononowicz (2015). The novel non-imidazole histamine H₃ receptor antagonist DL77 reduces voluntary alcohol intake and ethanol-induced conditioned place preference in mice. *Physiol Behav.* 151: 189-197.
- Bansal T., D. Englert, J. Lee, M. Hedge, T. K. Wood & A. Jayaraman (2007). Differential effects of epinephrine, norepinephrine, and indole on *Escherichia coli* O157: H7 chemotaxis, colonization, and gene expression. *Infect. Immun.* 75(9): 4597-4607.
- Barreto G. E., A. Larkov & V. E. Moran (2014). Beneficial effects of nicotine, cotinine and its metabolites as potential agents for Parkinson's disease. *Front. Aging Neurosci.* 6(340).
- Barrett E., R. P. Ross, P. W. O'Toole, G. F. Fitzgerald & C. Stanton (2012). γ -Aminobutyric acid production by culturable bacteria from the human intestine. *J. Appl. Microbiol.* 113(2): 411-417.
- Berer K., L. A. Gerdes, E. Cekanaviciute, X. Jia, L. Xiao, Z. Xia, C. Liu, L. Klotz, U. Stauffer, S. E. Baranzini, T. Kümpfel, R. Hohlfeld, G. Krishnamoorthy & H. Wekerle (2017). Gut microbiota from multiple sclerosis patients enables spontaneous autoimmune encephalomyelitis in mice. *PNAS USA* 114(40): 10719-10724.
- Bonnayon P., J. F. Bernard, M. Hamon, J. Adrien & V. Fabre (2010). Heterogeneous distribution of the serotonin 5-HT_{1A} receptor mRNA in chemically identified neurons of the mouse rostral brainstem: implications for the role of serotonin in the regulation of wakefulness and REM sleep. *J. Comp. Neurol.* 518: 2744-2770.
- Bravo J. A., P. Forsythe, M. V. Chew, E. Escaravage, H. M. Savignac, T. G. Dinan, J. Bienenstock & J. F. Cryan (2011). Ingestion of *Lactobacillus* strain regulates emotional behavior and central GABA receptor expression in a mouse via the vagus nerve. *PNAS USA* 108: 16050-16055.
- Brown R. E., D. R. Stevens & H. L. Haas (2001). The physiology of brain histamine. *Prog. Neurobiol.* 63(6): 637-672.
- Cekanaviciute E., B. B. Yoo, T. F. Runia, J. W. Debelius, S. Singh, C. A. Nelson, R. Kanner, Y. Bencosme, Y. K. Lee, S. L. Hauser, E. Crabtree-Hartman, I. K. Sand, M. Gacias, Y. Zhu, P. Casaccia, B. A. C. Cree, R. Knight, S. K. Mazmanian & S. E. Baranzini (2017). Gut bacteria from multiple sclerosis patients modulate human T cells and exacerbate symptoms in mouse models. *PNAS USA* 114(40): 10713-10718.
- Clarke G., S. Grenham, P. Scully, P. Fitzgerald, R. D. Moloney, F. Shanahan, T. G. Dinan & J. F. Cryan (2017). The microbiome-gut-brain axis during early life regulates the hippocampal serotonergic system in a sex-dependent manner. *Molecular Psychiatry* 18(6): 666-673.
- Fétisssov S. O. & P. Déchelotte (2011). The new link between gut-brain axis and neuropsychiatric disorders. *Curr. Opin. Clin. Nutr. Metab. Care* 14(5): 477-482.
- Freestone P. P., P. H. Williams, R. D. Haigh, A. F. Maggs, C. P. Neal & M. Lyte (2002). Growth stimulation of intestinal commensal *Escherichia coli* by catecholamines: a possible contributory factor in trauma-induced sepsis. *Shock* 18: 465-470.
- Freestone P. P., R. D. Haigh, & M. Lyte (2007). Specificity of catecholamine-induced growth in *Escherichia coli* O157: H7, *Salmonella enterica* and *Yersinia enterocolitica*. *FEMS Microbiol. Lett.* 269(2): 221-228.
- Gershon M. D. & J. Tack (2007). The serotonin signaling system: from basic understanding to drug development for functional GI disorders. *Gastroenterology* 132: 397-414.

- Gjedde A., Y. Kumakura, P. Cumming, J. Linnet & A. Møller (2010). Inverted-U-shaped correlation between dopamine receptor availability in striatum and sensation seeking. *PNAS USA* 107(8) : 3870-3875.
- Haas H. L., O. A. Sergeeva & O. Selbach (2008). Histamine in the nervous system. *Physiol Rev.* 88(3) : 1183-1241.
- Heijtz R. D., S. Wang, F. Anuar, Y. Qian, B. Björkholm, A. Samuelsson, M. L. Hibberd, H. Forssberg & S. Pettersson (2011). Normal gut microbiota modulates brain development and behaviour. *PNAS USA* 108(7) : 3047-3052.
- Hsiao E. Y., S. W. McBride, S. Hsien, G. Sharon, E. R. Hyde, T. McCue, J. A. Codelli, J. Chow, S. E. Reisman, J. F. Petrosino, P. H. Patterson & S. K. Mazmanian (2013). Microbiota modulate behavioral and physiological abnormalities associated with neurodevelopmental disorders. *Cell* 155(7) : 1451-1463.
- Kiraly D. D., D. M. Walker, E. S. Calipari, B. Labonte, O. Issler, C. J. Pena, E. A. Ribeiro, S. J. Russo & E. J. Nestler (2016). Alterations of the host microbiome affect behavioral responses to cocaine. *Scientific Reports* 6 : 35455.
- Lu J. Y. D., P. Su, J. E. M. Barber, J. E. Nash, A. D. Le, F. Liu & A. H. C. Wong (2017). The neuroprotective effect of nicotine in Parkinson's disease models is associated with inhibiting PARP-1 and caspase-3 cleavage. *PeerJ* 5 : e1-e24. doi.org/10.7717/peerj.3933 (consulté le 30.01.2024).
- McGrath A. P., K. M. Hilmer, C. A. Collyer, E. M. Shepard, B. O. Elmore, D. E. Brown, D. M. Dooley & J. Mitchell Guss (2009). Structure and inhibition of human diamine oxidase. *Biochemistry* 48(41) : 9810-9822.
- Minter M. R., C. Zhang, V. Leone, D. L. Ringus, X. Zhang, P. Oyler-Castrillo, M. W. Musch, F. Liao, J. F. Ward, D. M. Holtzman, E. B. Chang, R. E. Tanzi & S. S. Sisodia (2016). Antibiotic-induced perturbations in gut microbial diversity influences neuro-inflammation and amyloidosis in a murine model of Alzheimer's disease. *Scientific Reports* 6 : 30028.
- Mulhauser B. (2018). Préface. In Baud S. *Histoire et usage des plantes psychotropes*. Imago, Paris : 7-9.
- Mulhauser B. (2023). Vers une approche communautaire de la santé par les plantes. In Mulhauser B. (dir.). *Plantes soignantes. Entre pouvoirs et partages*. Épistémé, Lausanne : 227-254.
- Ogbonnaya E. S., G. Clarke, F. Shanahan, T. G. Dinan, J. F. Cryan & O. F. O'Leary (2015). Adult hippocampal neurogenesis is regulated by the microbiome. *Biol. Psychiatry* 78 : e7-e9.
- Özoğul F. (2004). Production of biogenic amines by *Morganella morganii*, *Klebsiella pneumoniae* and *Hafnia alvei* using a rapid HPLC method. *Eur. Food Res. Technol.* 219 : 465-469.
- Özoğul F. K., Y. Özoğul, & I. Özoğul (2012). The function of lactic acid bacteria on biogenic amines production by food-borne pathogens in arginine decarboxylase broth. *Food Sci. Technol. Res.* 18 : 795-804.
- Pokusaeva K., C. Johnson, B. Luk., G. Uribe, N. Oezguen, Y. Fu, R. K. Matsunami, M. Lugo, A. Major, Y. Mori-Akiyama, E. B. Hollister, S. M. Dann, X. Z. Shi, D. A. Engler, T. Savidge & J. Versalovic (2017). GABA-producing *Bifidobacterium dentium* modulates visceral sensitivity in the intestine. *Neurogastroenterol. Motil.* 29(1). doi.org/10.1111/nmo.12904 (consulté le 30.01.2024).
- Popa D., C. Lena, C. Alexandre & J. Adrien (2008). Lasting syndrome of depression produced by reduction of serotonin uptake during postnatal development: evidence from sleep, stress and behaviour. *J. Neurosci.* 28 : 3546-3554.

- Ritz B., A. Ascherio, H. Checkoway, K. S. Marder, L. M. Nelson, W. A. Rocca, G. W. Ross, D. Strickland, S. K. Van Den Eeden & J. Gorell (2007). Pooled analysis of tobacco use and risk of Parkinson disease. *Archives of Neurology* 64 : 990-997.
- Ritz B., P. C. Lee, C. F. Lassen & O. A. Arah (2014). Parkinson disease and smoking revisited: ease of quitting is an early sign of the disease. *Neurology* 83 : 1396-1402.
- Sampson T. R. *et al.* (2016). Gut microbiota regulate motor deficits and neuroinflammation in a model of Parkinson's disease. *Cell* 167(6) : 1469-1480.
- Scheperjans F., V. Aho, P. A. Pereira, K. Koskinen, L. Paulin, E. Pekkonen, E. Haapaniemi, S. Kaakkola, J. Eerola-Rautio, M. Pohja, E. Kinnunen, K. Murros & P. Auvinen (2015). Gut microbiota are related to Parkinson's disease and clinical phenotype. *Mov. Disord. Official J. Mov. Disord. Soc.* 30(3) : 350-358.
- Stanaszek P. M., J. F. Snell & J. J. O'Neill (1977). Isolation, extraction, and measurement of acetylcholine from *Lactobacillus plantarum*. *Appl. Environ. Microbiol.* 34 : 237-239.
- Strandwitz P. (2018). Neurotransmitter modulation by the gut microbiota. *Brain Research* 1693 : 128-133.
- Strandwitz P. *et al.* (2019). GABA-modulating bacteria of the human gut microbiota. *Nature Microbiology* 4 : 396-403.
- Tsavkelova E. A., V. S. Kudrin, I. V. Botvinko & A. Oleskin (2000). Detection of neurotransmitter amines in microorganisms with the use of high-performance liquid chromatography. *Doklady biochemistry, Proc. Acad. Sci. USSR* 372(1-6) : 115-117.
- Zimatkin S. M. & O. V. Anichtchik (1999). Alcohol-histamine interactions. *Alcohol & Alcoholism* 34(2) : 141-147.

3 | Symbioses

Le terme « symbiose » a été proposé en 1878 par le microbiologiste allemand Anton de Bary, une année après celui de « symbiotismus » introduit par son compatriote Albert Frank. Tous deux se sont basés sur les recherches, dix ans plus tôt, du botaniste suisse Simon Schwendener, qui avait constaté au microscope que les cellules vertes baignant dans le tissu des lichens n'étaient pas des cellules de reproduction, mais des algues unicellulaires. Pionnier, Schwendener en avait conclu que les lichens étaient des associations étroites entre des champignons et des algues. Cette idée, qui semblait farfelue pour de nombreux biologistes, fut adoptée par les biologistes allemands, ainsi que par le Russe Andreï Famintsyne qui parvint à séparer les deux types d'organismes de cette symbiose en les cultivant isolément. Quelques années plus tard, au début du XX^e siècle, le botaniste français Gaston Bonnier fit le chemin inverse en associant algues et champignons pour retrouver du lichen (Selosse 2017). Ces démarches sont, à mon sens, des études empiriques de « symbiologie ».

La vie, ensemble

En 1879, Anton de Bary donne la première définition écrite en allemand et en français de ce qu'est une symbiose, soit « la vie ensemble d'organismes de noms différents ». Par organismes de noms différents,

il faut comprendre « espèces différentes », selon la classification systématique de l'époque, basée sur des caractères anatomiques et le principe selon lequel seuls deux individus appartenant à la même espèce peuvent, par reproduction sexuée, donner naissance à une descendance fertile. On reviendra plusieurs fois sur la notion d'espèce dans les chapitres suivants car, à la lumière de nouvelles observations sur l'échange de gènes, cette définition est aujourd'hui mise à mal. Dans l'esprit des biologistes de la fin du XIX^e siècle, la symbiose n'impliquait pas forcément une relation gagnant-gagnant entre les espèces protagonistes, comme le révèle ce texte de De Bary: « L'exemple le plus connu et le plus parfait de symbiose est le parasitisme complet, c'est-à-dire l'état dans lequel un animal ou une plante naît, vit et meurt sur ou dans un organisme appartenant à une autre espèce » (de Bary *in* Selosse 2017). Là encore, ce texte met en exergue un aspect essentiel de la classification des organismes vivants. La citation fait écho à un ouvrage du zoologue belge Pierre-Joseph van Beneden paru en 1875, et axé sur les notions de parasitisme et de commensalisme sur lesquelles focalisent la plupart des biologistes évolutionnistes, séduits par les principes de sélection naturelle, de compétition et de survie du plus apte décrits par Charles Darwin dans son livre sur l'origine des espèces (1859). Toutefois, van Beneden décrit également dans son livre des animaux mutualistes, c'est-à-dire des espèces qui, par leurs activités, « se rendent mutuellement des services ». Cette notion d'entraide va changer le sens du mot symbiose, ajoutant à la définition générale d'une association intime et durable entre des organismes hétérospécifiques (soit appartenant à des espèces différentes), l'idée d'un bénéfice réciproque pour les partenaires.

Cette conception a son importance dans l'approche ontologique : envisager les relations des êtres non pas en termes de compétition et de parasitisme, mais au contraire d'aide et de mutualisme, change totalement la perspective. L'esprit humain ne cherche-t-il pas constamment à distinguer le bon du mauvais (soit ce qui est bon ou mauvais pour lui) ? Ainsi naissent les termes de « parasite » et de « pathogène » (mauvais) auxquels se rattachent certains mots à connotation négative (microbe, virus), alors que le bon semble aller de soi et ne demande aucune aide de la part d'autrui. Le chapitre 13 « Symbiote *versus* parasite, un équilibre fragile » développe cette thématique.

Avant de démêler l'écheveau de nos « subjectivités objectives » par rapport au cycle de la Vie, il me paraît nécessaire de démontrer que la

«vie ensemble» – la symbiose – est une condition *sine qua non* de la Vie sur Terre. En bref, aucune espèce, au sens encore classique de sa définition, ne vit isolée des autres. Au contraire, chacune développe des relations obligatoires avec autrui. Ces interactions relient toujours les espèces multicellulaires (plantes, animaux, champignons) à des organismes microscopiques unicellulaires (bactéries, protozoaires, algues et champignons à une seule cellule). D'autres liens étroits existent également entre des êtres multicellulaires.

Je ne souhaite pas ici refaire une énumération de toutes les symbioses étudiées jusqu'à ce jour. Aux personnes qui aimeraient connaître davantage d'exemples, je conseille la lecture des ouvrages spécialisés des biologistes marins israéliens Eugene Rosenberg et Ilana Zilber-Rosenberg (2013) et des spécialistes suisses du sol Jean-Michel Gobat, Michel Aragno et Willy Matthey (2017), ou du livre plus accessible du biologiste français Marc-André Selosse (2017). Ayant déjà abondamment disserté sur la présence d'êtres symbiotiques chez les mammifères à travers les exemples de l'humain et de la souris, je propose en outre de quitter temporairement cet univers familier et d'élargir le champ de nos observations afin d'alimenter notre réflexion, en évoquant certains des si nombreux cas pertinents qui s'offrent à nous. À commencer par celui des symbioses qui se jouent entre les plantes et les organismes du sol; un sujet particulièrement crucial pour comprendre une grande partie des cycles terrestres de la Vie et dont on s'entretiendra plus tard.

Symbioses chez les plantes

Quoique trivial, il est tout d'abord nécessaire de rappeler le point suivant: les plantes sont non seulement essentielles pour l'alimentation humaine, mais elles fournissent également une bonne part de l'oxygène que l'on respire, bien qu'elles en réutilisent une partie. Cette relation plantes-animaux peut du reste être qualifiée de symbiotique puisqu'en échange d'air respirable, ces derniers (dont *Homo Sapiens*) restituent du gaz carbonique nécessaire à la photosynthèse des végétaux⁶. Il est dès lors essentiel que les plantes soient en bonne santé, et par ailleurs qu'elles ne présentent aucun corps étranger indésirable afin qu'elles ne produisent pas de toxines pour l'isoler.

⁶ Il faut toutefois noter que les végétaux eux-mêmes expulsent du gaz carbonique.

Les végétaux recèlent en différents endroits de nombreux champignons et bactéries. Ces micro-organismes symbiotiques se trouvent certes au niveau des racines (on parle alors de « mycorhize » ou de microbiote « rhizosphérique »), mais également dans le système aérien à la surface de leur « épiderme », que ce soit sur la tige (microbiote « caulosphérique ») ou les feuilles (microbiote « phyllosphérique »). Des microbes colonisent aussi l'intérieur de la plante (microbiote « endophyte »), pour l'aider à assimiler certains éléments nutritifs, la protéger de parasites et favoriser sa reproduction.

C'est ce qui prévaut par exemple pour le ginkgo bilobé (*Ginkgo biloba*) ou « arbre aux quarante écus », qui a établi une alliance originale avec une algue. Il appartient à la lignée des ginkgoales, apparue il y a plus de 200 millions d'années et dont les descendants n'ont pratiquement pas évolué au fil des différentes époques géologiques. Aujourd'hui unique survivant de ce groupe, le ginkgo bilobé fait ainsi figure de fossile vivant. Il possède des vertus médicinales reconnues notamment pour activer la mémoire, et s'avère très résistant à la pollution atmosphérique et aux radiations. De telles particularités suscitent de nombreuses recherches. On a ainsi identifié des champignons symbiotiques aidant les racines à l'assimilation de sels minéraux essentiels à la bonne santé de l'arbre. Toutefois, la découverte la plus étonnante est celle d'une algue verte du genre *Coccomyxa* dormant dans ses tissus cellulaires où elle n'a aucune fonction photosynthétique (Trémouillaux-Guiller *et al.* 2002). Son rôle ne semble actif que durant la phase de reproduction de l'arbre, car elle est présente principalement dans les ovules, les embryons et les tissus reproducteurs. Le ginkgo étant dioïque, il existe des plants mâles et des plants femelles. Le pollen produit en grande quantité par l'arbre mâle arrive sur les ovules charnus de l'arbre femelle et les féconde. Lorsque les « fruits » sont mûrs, ils chutent au sol où ils commencent à se liquéfier. Les chercheurs ont alors constaté que l'algue dormante « revient à la vie » lorsque meurt la cellule du ginkgo qui la contient (Trémouillaux-Guiller & Huss 2007), reprenant alors une activité photosynthétique dans les tissus en voie de nécrose. Elle peut même être totalement autonome dès cet instant et subsister dans un milieu aquatique, indépendamment de son hôte. La présence active de l'algue dans le milieu juteux produit par l'accumulation au sol des ovules liquéfiés pourrait stimuler la germination de la plantule qui doit se faire sans tarder.

Comme chez les animaux, c'est surtout dans l'aide à l'assimilation de nutriments que les relations symbiotiques se sont développées

entre les plantes, les champignons et les bactéries. De la présence de micro-organismes se développant au niveau des racines dépend le bon fonctionnement des cycles biogéochimiques naturels tels que celui du carbone, du phosphore, du fer, du soufre ou de l'azote. Attardons-nous un moment sur ce dernier élément. À l'instar du carbone, de l'oxygène et de l'hydrogène, l'azote est indispensable dans les processus vitaux de tous les êtres vivants, notamment lors de la synthèse des acides aminés qui s'assemblent en protéines. À titre d'exemple, 20 % des constituants de l'être humain sont des protéines actives dans tous les processus biologiques maintenant le corps en vie.

Assemblé par paire, le diazote (N_2), appelé « azote atmosphérique » dans le langage courant, constitue plus de 78 % du volume de l'air (Lide 2009). Les deux atomes composant le diazote sont retenus par une triple liaison qui rend la molécule très stable. Seules quelques espèces de bactéries arrivent à rompre cette liaison à l'aide d'un complexe enzymatique nommé « nitrogénase ». À elle seule, cette dernière information permet de se convaincre du caractère « universel » de l'état de symbiose dans lequel se trouvent tous les organismes vivants, et du rôle central joué par les microbes dans celui-ci. Ainsi, la fixation d'azote réalisée au sein de mycorhizes n'est le fait ni des végétaux ni des champignons, mais bien des bactéries qui gravitent autour de cet écosystème d'échanges particuliers entre le monde fongique et les plantes (Bowen 1973). En l'état des connaissances, les fixatrices d'azote identifiées en milieu terrestre peuvent être des bactéries anaérobies (vivant dans un environnement sans présence d'oxygène) telles que les *Clostridium* ou les *Citrobacter*, des aérobies des genres *Azomonas* ou *Azotobacter*, ou encore des cyanobactéries du genre *Nostoc* notamment. Quant aux bactéries endosymbiotiques qui se développent dans les tissus de diverses plantes, les plus connues appartiennent au genre *Rhizobium* en association avec les plantes de la famille des fabacées (légumineuses), ainsi qu'au genre *Frankia* que l'on retrouve dans les racines de plusieurs arbres et arbustes (aulnes en particulier). En milieu marin, d'autres cyanobactéries, unicellulaires et filamenteuses (genre *Trichodesmium*) sont aussi capables de fixer l'azote.

Grâce à la nitrogénase synthétisée par ces bactéries, une série de réactions chimiques mettant en jeu de l'hydrogène⁷ et des molécules d'adé-

⁷ Ou plus précisément mettent en jeu des électrons qui, s'alliant à des protons, forment des atomes d'hydrogène.

nosine triphosphate (abrégé ATP) permet de transformer une molécule d'azote atmosphérique en deux molécules d'ammoniac (NH_3) ainsi que des résidus de dihydrogène (H_2). En présence d'eau, cet ammoniac peut se transformer en ion ammonium (NH_4^+) qui est assimilé par les plantes tout en libérant un ion hydroxyde⁸. Toutefois, pour y parvenir, les végétaux ont dû créer des conditions proches de l'anaérobiose car la nitrogénase est inhibée par la présence d'oxygène. Des dizaines d'espèces, appartenant à de nombreuses familles botaniques, ont réussi cette conversion (Santi, Bogusz & Franche 2013). Chez les graminées, on peut citer entre autres, la canne à sucre (Welbaum *et al.* 2003), le riz (Peng *et al.* 2009) ou encore le maïs (Montanez *et al.* 2009).

De toutes les familles végétales, c'est celle des pois, des haricots, des trèfles et des luzernes (fabacées) qui semble avoir le mieux su gérer la « crise de l'azote » en accueillant des bactéries du genre *Rhizobium* dans de petites loges de leurs racines. Les colonies de ces bactéries se développent à l'intérieur de nodosités dans lesquelles s'effectuent les échanges bénéfiques aux deux organismes selon le principe de la nitrogénase évoquée ci-dessus (Guinel & Geil 2002). Grâce à l'action des bactéries fixatrices d'azote, la plante assimile cet élément pour le fonctionnement de son métabolisme. En retour, les microbes reçoivent des composés carbonés issus de la photosynthèse, sous forme de sucre. Cependant, l'action du complexe enzymatique de nitrogénase demande beaucoup d'énergie pour la transformation et le transport des éléments. L'une des molécules clés qui stocke cette énergie est l'adénosine triphosphate qui, comme son nom l'indique, a besoin de trois ions phosphate pour se former. Ceux-ci proviennent du sol grâce aux champignons (notamment les glomérormycètes) qui, dans le cadre de symbioses différentes, assurent le transit des ions par les racines du végétal. Si on y ajoute l'alimentation en eau, on voit apparaître une méta-symbiose (ou symbiose à multiples espèces) parfaite au niveau de la plante, dans laquelle se croisent quelques cycles biologiques majeurs (C, N, P, H_2O).

Nous savons désormais que quelques espèces d'arbres tels que les pins (Bal & Chanway 2012), les thuyas géants (Bal *et al.* 2012), les peupliers et les saules (Doty *et al.* 2009 ; Doty *et al.* 2016) abritent des bactéries fixatrices d'azote, non pas dans leurs racines mais dans les cellules de leurs feuilles. Ces endophytes permettent d'améliorer la croissance

⁸ Selon la formule $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$.

des ligneux dans des milieux acides et pauvres en nutriments tels que des lits de galets en bordure de rivière ou des crêtes de montagne. Par ailleurs, l'effet de la symbiose est plus large qu'une simple captation d'azote assimilable, puisqu'à partir du moment où le végétal peut synthétiser des acides aminés, son organisme s'en trouve nettement dynamisé. Il augmente en outre sa résistance aux agents infectieux.

Les végétaux qui ont le privilège d'entretenir des symbioses « azotées » sont souvent des plantes pionnières. Dans l'environnement des zones alluviales, des tourbières, des combes alpines ou encore des zones d'épanchement de laves pauvres en azote, les aulnes (genre *Alnus* de la famille des bétulacées) sont favorisés par une relation privilégiée avec l'actinobactérie *Frankia alni* (Schwencke & Caru 2001). Le micro-organisme n'est pas présent lors de la germination de la graine, mais il colonise la plante lorsque les racines sont déjà développées. Dès sa tentative de pénétration, l'aulne réagit en lignifiant et recourbant ses jeunes racines, puis en développant une capsule qui accueille la bactérie. Celle-ci migre alors dans l'épiderme de la racine, s'installe dans le nodule et s'y multiplie (Lalonde & Quispel 1977).

Focus sur les mycorhizes

Le monde des mycorhizes est tout aussi riche d'échanges que celui du microbiote de l'humain ou de la souris. Il est également complexe car les symbioses qui s'y développent n'y sont pas toujours stables. En effet, si à l'échelle de la vie d'un arbre, celui-ci paraît mycorhizé en permanence, on constate des colonisations temporaires ou des abandons localisés au niveau de chaque racine.

Il existe plusieurs types de mycorhizes. Les plus répandues sont les endomycorhizes, probablement apparues il y a plus de 500 millions d'années avec la colonisation des milieux terrestres par les végétaux, et que l'on retrouve dans 80 % des plantes actuelles. Il s'agit de champignons qui développent directement leur mycélium dans les cellules des végétaux. Ils appartiennent tous à la classe des glomérormycètes, groupe monophylétique distinct de celui des champignons macroscopiques que sont les ascomycètes (champignons tels que les morilles ou les truffes dont les spores, cellules reproductives, se forment dans des asques) et les basidiomycètes (champignons tels que les bolets ou les champignons à lamelles, dont les spores se forment à l'extrémité de cellules spécialisées, les basides). La particularité qui les distingue est

l'absence de cloisons à l'intérieur de l'hyphe. Ce filament, qui peut être considéré comme une sorte de cellule géante, contient toutefois de nombreux noyaux libres, mais aussi des endobactéries symbiotiques aidant au transport des nutriments (Desirò *et al.* 2014). Il se propage dans les racines des plantes, de cellule en cellule, développant parfois des boucles et d'autres fois des ramifications dites « arbusculaires ».

La spécialité du partenariat des plantes avec les glomérormycètes qui s'installent dans leurs cellules racinaires est le flux de phosphore⁹. Comme cet élément n'est pas présent dans l'atmosphère, il doit être puisé dans le sol, ce que parviennent à faire les champignons grâce à leurs capacités de solubilisation des roches. Autant chez les animaux que chez les végétaux, le phosphore est indispensable au métabolisme énergétique, le fonctionnement biochimique des membranes cellulaires et la structure moléculaire permettant l'empilement des nucléotides les uns après les autres dans les acides nucléiques (ADN, ARN) (voir chapitre 11 « Le continuum du vivant »). La captation se fait sous forme de polyphosphates que les glomérormycètes retirent des argiles ou des oxydes de fer, puis stockent rapidement dans leurs vacuoles (Koltai 2013). Des enzymes prennent ensuite le relais en cassant les chaînes de polyphosphates en orthophosphates (PO_4^{3-}) qui seront transférés aux cellules racinaires. Cette prouesse permet donc une mise à disposition de ces molécules indispensables aux plantes (Fortin, Planchette & Piché 2015).

Une autre particularité des glomérormycètes est de pouvoir sécréter, dans les parties extra-racinaires du mycélium, de la glomaline, une glycoprotéine hydrophobe qui stocke le carbone sous forme de glucides et de protéines (Wright, Rillig & Nichols 2000). Selon les chercheurs, cette substance collante aide à la formation structurée du sol en assemblant des agrégats d'argile, de sable et de limon, facilitant la rétention d'eau et de minéraux (Rillig, Wright & Eviner 2002). Le décryptage entier du génome de l'espèce *Rhizophagus irregularis* a permis de déterminer que ce champignon dépend entièrement des plantes pour subvenir à ses besoins énergétiques, car il ne peut pas synthétiser les enzymes indispensables à la dégradation de la cellulose ou de la lignine qui lui permettrait de pénétrer la racine végétale (Tisserand *et al.* 2013).

Les mycorhizes les plus visibles sont les ectomycorhizes, où le champignon recouvre la racine d'un manteau velouté d'hyphe (manchon)

⁹ Ou plus précisément de phosphate.

qui se fixe à son cortex, toutefois sans pénétrer dans ses cellules. Le mycélium s'infiltré entre ces dernières, provoquant une réaction chimique de la plante au niveau du parenchyme cortical. Celle-ci développe alors une excroissance en forme de massue qui est rapidement enserrée par un dense réseau de filaments. Cette association d'échanges semble assez généralisée, puisque plusieurs milliers d'espèces de champignons la pratiquent, tant chez les ascomycètes que chez les basidiomycètes. Les réseaux d'ectomycorhizes se développent aussi bien dans certains sols acides tropicaux (Read 1990), que dans ceux des régions tempérées ou froides. Dans ce dernier cas, ils ne s'établissent qu'avec un nombre limité de familles botaniques, comme les fagacées (chênes, hêtres ou encore châtaigniers), les salicacées (saules et peupliers), les bétulacées (aulnes, noisetiers, bouleaux), les malvacées (tilleuls), ainsi que les conifères (pins, sapins, épicéas, etc.) de la famille des pinacées (Garbaye 2013).

À propos de cette dernière famille, on observe chez les mélèzes et les pins un autre type d'échanges racinaires : l'ectendomycorhize. Il s'agit d'une forme intermédiaire de relation symbiotique grâce au champignon ascomycète *Wilcoxina mikolae*, qui se développe uniquement sur les semis et jeunes arbustes de quelques années. Les hyphes sécrètent des enzymes qui décomposent la paroi cellulaire de la plante, leur permettant de pénétrer dans chaque cellule et de s'accoler à leur membrane pour occuper la plus grande surface possible d'échanges. *Wilcoxina mikolae* est donc très fréquent dans les pépinières, jouant un rôle majeur en sylviculture. Ainsi, une nurserie de pins ou de mélèzes installée sur un sol sans cette espèce fongique ne s'épanouit que médiocrement. Après quelques années, le champignon laisse la place à d'autres espèces fongiques ou se contente d'une relation ectomycorhizienne classique comme celle qu'il entretient avec les épicéas, les sapins, les pruches ou encore les sapins de Douglas (Mikola 1998).

Le monde fongique a développé d'autres caractéristiques particulières avec les éricacées. Cette famille de plantes présente plusieurs types de mycorhizes nommées, de la générale à la plus spécialisée, « éricoïde », « arbutoïde » et « monotropoïde » (Kron *et al.* 2002). La mycorhize éricoïde est commune à la plupart des représentants de la famille (bruyères, callunes, myrtilles, aireselles, rhododendrons, camarines), mais absente chez d'autres éricacées telles que les monotropes dont les mycorhizes sont strictement de type monotropoïde, et les pyroles qui développent le type arbutoïde avec les arbusiers et les busseroles.

L'expression générale de ces symbioses suggère une origine générale des trois types de mycorhizes antérieure à l'apparition des éricacées au Crétacé, il y a plus de 100 millions d'années (Schwery *et al.* 2015). Les pézizes, ascomycètes dont la partie visible est souvent caractérisée par une forme de coupelle colorée, sont les espèces fongiques exclusives des mycorhizes éricoïdes. Elles organisent un vaste réseau d'hyphes colonisant le sol autour de la plante hôte, avant de produire des filaments latéraux capables de traverser les parois cellulaires et de se ramifier en pelote à l'intérieur des cellules. Cette symbiose est temporaire dans une jeune racine. En effet, les membranes et le cytoplasme des cellules réceptrices semblent usés par les activités d'échanges, se désagrégeant après quelques semaines de fonctionnement. Le champignon cherche alors à coloniser de nouvelles cellules. On peut du reste se demander jusqu'à quel point l'association ne vire pas au parasitisme. Toutefois, cette symbiose apporte à la plante de l'azote assimilable puisé ainsi dans le sol, élément rare dans les milieux de vie de la plupart des éricacées tels que les tourbières, les forêts de résineux sur substrat acide ou les sols de montagnes à roche silicatée (Cairney & Meharg 2003; van der Heijden & Sanders 2002).

Contrairement au cas précédemment traité, les mycorhizes arbutoïdes ne sont pas le fait d'ascomycètes, mais de basidiomycètes parmi lesquels les plus connus sont les tricholomes, les lactaires ou encore les laccaires. Ces champignons forment tous des ectomycorhizes avec les arbres vivant à proximité des arbousiers, des busseroles et des pyroles, éricacées aux mycorhizes de type arbutoïde. Ainsi, la distinction est impossible à faire à l'œil nu. En réalité, les filaments fongiques réussissent à percer la paroi cellulaire des racines de ces espèces et se développent en dense réseau mycélien à l'intérieur des cellules. Le processus endophyte est temporaire, tout comme dans le cas de la mycorhize éricoïde (Massicote *et al.* 1993). L'azote est, dans ce cas encore, l'apport fongique principal pour la plante, elle-même fournissant des sucres en échange. Néanmoins, le pont mycélien reliant ces quelques espèces d'éricacées aux arbres des alentours suggère un apport supplémentaire de carbone puisé directement par les basidiomycètes à la racine des conifères et des arbres à feuilles caduques. Cette manière de procéder est nommée « mycohétérotrophie ». Elle pourrait déjà se réaliser avec quelques espèces de pyroles dépourvues de chlorophylle, mais l'expression la plus spécialisée dans la famille des éricacées est celle des sucepins (Garbaye 2013).

«Sucepin» est le nom français de plusieurs espèces végétales du genre *Monotropa* qui poussent dans les forêts tempérées ou froides de conifères. Leurs parties aériennes sont peu spectaculaires, présentant une tige blanc-jaunâtre à laquelle semblent collées de petites écailles en guise d'embryon de feuilles, ainsi qu'une hampe de quelques fleurs de même couleur et parfois rosâtres. L'aspect de cette plante dépourvue de chlorophylle trahit sa nature parasitaire. Pour mieux la découvrir, il faut creuser le sol. On y trouve un amas de racines auquel s'ajoutent celles de conifères. Comme dans le cas précédent, ce sont des basidiomycètes qui développent les relations entre les résineux et les sucepins. Toutefois, leurs hyphes présentent des excroissances qui pressent contre les cellules corticales sans les perforer, se contentant de transférer par diffusion membranaire le carbone provenant des arbres et l'azote issu du sol dont la plante a besoin. Il faut encore préciser que l'espèce européenne *Monotropa hypopitys*, strictement inféodée aux tricholomes, ne peut faire germer ses graines qu'avec l'aide de son champignon symbiotique (Garbaye 2013).

Le conditionnement de la germination à la présence d'un allié fongique est une particularité qui s'observe également chez toutes les plantes de la famille des orchidées; une stratégie adaptative qui corrobore l'existence d'un ancêtre commun à cette famille apparue il y a environ 80 millions d'années (Ramírez *et al.* 2007). Grâce à sa taille minuscule (moins d'un dixième de millimètre), une graine d'orchidée peut être dispersée par le vent sur une très longue distance. Cependant, elle ne dispose de réserves nutritives que pour débiter la croissance de l'embryon en un petit amas de cellules nommé «protocorme», à la suite de quoi, elle doit impérativement s'associer à son partenaire symbiotique pour continuer son développement. Le mycélium pénètre dans les cellules du protocorme et croît en un réseau dense nommé «peloton», car ressemblant à une petite pelote (Peterson *et al.* 2006). Cette mycorhize dite «orchidoïde» ne provoque pas l'éclatement des membranes des cellules, mais les oblige à augmenter leur superficie, améliorant les transferts de nutriments. Le développement d'un peloton ne dure que quelques jours avant de disparaître, digéré par la cellule l'ayant accueilli. Néanmoins, plusieurs symbioses successives peuvent avoir lieu dans la même cellule.

Bien qu'elles ne soient caractéristiques que des plantes d'une seule famille, les mycorhizes orchidoïdes sont le fait de nombreuses espèces fongiques, aussi bien ascomycètes que basidiomycètes. Ce fait soutient

l'hypothèse selon laquelle ce type précis de symbiose est déterminé par le végétal (Garbaye 2013). Il faut rappeler que la famille des orchidées apparaît comme l'une des dernières venues dans le monde des plantes à fleurs. Grâce à la datation de fossiles calibrés, complétée par des méthodes de phylogénétique, les botanistes supposent que l'ancêtre commun à la famille est apparu durant le Crétacé supérieur, il y a –84 à –76 millions d'années (Ramírez *et al.* 2007). Toutefois, les deux sous-familles ayant le plus de représentants actuels – les orchidoïdées et les épidendroïdées – se seraient séparées au début du Paléocène (environ –65 millions d'années). Les épidendroïdées sont notamment apparues en Amérique tropicale il y a à peine 20 millions d'années, puis ont connu une radiation rapide sur l'ensemble du continent pour aboutir aujourd'hui à la présence de plusieurs milliers d'espèces dans la plupart des milieux terrestres d'Amérique centrale et du Sud (Pérez-Escobar *et al.* 2017). Bien que hautement spécialisées, les orchidées ont su adapter leurs besoins en développant des alliances nombreuses, non seulement avec les champignons, mais également avec les insectes pollinisateurs qui assurent la reproduction croisée par transport des grains de pollen d'un individu à l'autre.

De manière générale, on peut se demander ce que gagnent les champignons à « s'accrocher » ainsi aux racines des plantes. L'échange est gagnant-gagnant : les végétaux leur apportent essentiellement des sucres, source d'énergie aussi indispensable aux espèces fongiques qu'animales, qui appartiennent toutes aux organismes « hétérotrophes », c'est-à-dire incapables de créer leur propre source d'énergie et de carbone à partir du gaz carbonique. Les végétaux transmettent aussi des acides aminés et des vitamines. En sens inverse, j'ai déjà évoqué quelques apports du monde microscopique, surtout en ce qui concerne l'azote et le phosphore. Il est toutefois bon de dire que les mycorhizes sont aussi des zones d'échanges hydriques privilégiées. L'eau étant un élément indispensable à la photosynthèse, le bénéfice mutuel est ainsi clairement établi entre les deux partenaires. Enfin, les champignons et les bactéries avoisinantes protègent les racines des plantes contre diverses agressions de toxines ou de métaux lourds (Garbaye 2013).

Au vu des exemples cités dans ce chapitre, on remarque que l'alliance plante-champignon-bactérie ne constitue pas un « avantage adaptatif » au sens darwinien du terme, mais qu'elle répond à une condition obligatoire de diversification de la Vie par facilitation de

circulation des éléments dans les cycles biochimiques. En effet, un gradient écologique peut être observé entre les différentes mycorhizes, en fonction des sols et des climats qui les influencent. Pour les arbres et buissons, des pôles à l'équateur, la différence se marque ainsi : les mycorhizes éricoïdes dominent dans les toundras et tourbières arctiques, tandis que les forêts de taïga et de feuillus des zones tempérées favorisent l'expression des ectomycorhizes (et de quelques endomycorhizes). Les endomycorhizes investissent les zones subtropicales et tropicales où la litière ne peut pas s'accumuler longtemps, interdisant ainsi la formation d'une quantité importante d'humus (Garbaye 2013). De même, d'un socle à sol inexistant sur lequel pousse une végétation pionnière à un environnement riche en humus, la succession est la suivante : plantes sans mycorhizes, puis plantes à endomycorhizes et à ectomycorhizes, et dans les sols les plus acides, pauvres en azote et en phosphore, plantes à mycorhizes éricoïdes. Ainsi, que le climat évolue dans un sens (réchauffement) ou dans l'autre (refroidissement), les solutions du maintien des cycles biochimiques sont garanties dans la rhizosphère (Azcón-Aguilar *et al.* 2009).

En définitive, les différents types de symbioses que sont les lichens ou les mycorhizes impliquent des adaptations variées, survenues à différents moments de l'histoire évolutive du vivant. Elles expliquent également l'histoire des milieux, la naissance des sols et la création d'écosystèmes propres à des conditions particulières. On peut toutefois se demander depuis quand ces interrelations étroites se sont développées. Sont-elles des innovations récentes ou viennent-elles du fond des âges ?

Bibliographie

- Azcón-Aguilar C., J. M. Barea, S. Gianinazzi & V. Gianinazzi-Pearson (2009). *Mycorrhizas: functional processes and ecological impact*. Springer.
- Bal A. S. & C. P. Chanway (2012). Evidence of nitrogen fixation in lodgepole pine inoculated with diazotrophic *Paenibacillus polymyxa*. *Botany* 90 : 891-896.
- Bal A. S., R. Anan, O. Berge & C. P. Chanway (2012). Isolation and identification of diazotrophic bacteria from internal tissues of *Pinus contorta* and *Thuja plicata*. *Can. J. For. Res.* 42(4) : 807-813.
- Bowen G. D. (1973). Mineral nutrition of ectomycorrhizae. In G. C. Marks & T. T. Kozlowski (1973). *Ectomycorrhizae. Their Ecology and Physiology*. Academic Press, New York and London : 151-197.
- Cairney J. W. G. & A. A. Meharg (2003). Ericoid mycorrhiza: a partnership that exploits harsh edaphic conditions. *European Journal of Soil Science* 54(4) : 735-740.

- Darwin C. (1859). *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. John Murray, London.
- Desirò A., A. Salvioli, E. L. Ngonkeu, S. J. Mondo, S. Epis, A. Faccio, A. Kaech, T. E. Pawlowska & P. Bonfante (2014). Detection of a novel intracellular microbiome hosted in arbuscular mycorrhizal fungi. *ISME Journal* 8: 257-270.
- Doty S. L., A. W. Sher, N. D. Fleck, M. Khorasani, R. E. Bumgarner, Z. Khan, A. W. K. Ko, S.-H. Kim & T. H. DeLuca (2016). Variable nitrogen fixation in wild populus. *PLOS ONE*. doi.org/10.1371/journal.pone.0155979 (consulté le 30.01.2024).
- Doty S. L., B. Oakley, G. Xin, J. W. Kang, G. Singleton, Z. Khan, A. Vajzovic, J. T. Staley (2009). Diazotrophic endophytes of native black cottonwood and willow. *Symbiosis* 47(1): 23-33.
- Fortin J. A., C. Planchette & Y. Piché (2015). *Les mycorrhizes*. Quae, Versailles.
- Garbaye J. (2013). *La symbiose mycorrhizienne. Une association entre les plantes et les champignons*. Quae, Versailles.
- Gobat J.-M., M. Aragno & W. Matthey (2017). *Le sol vivant. Bases de pédologie. Biologie des sols*. 3^e éd. revue et augmentée. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.
- Guinel F. C. & R. D. Geil (2002). A model for the development of the rhizobial and arbuscular mycorrhizal symbioses in legumes and its use to understand the roles of ethylene in the establishment of these two symbioses. *Canadian Journal of Botany* 80(7): 695-720. doi.org/10.1139/b02-066 (consulté le 30.01.2024).
- Koltai H. (2013). Strigolactones activate different hormonal pathways for regulation of root development in response to phosphate growth conditions. *Annals of Botany* 112: 409-415.
- Kron K. A., W. S. Judd, P. F. Stevens, D. M. Crayn, A. A. Anderberg, P. A. Gadek, C. J. Quinn & J. L. Luteyn (2002). Phylogenetic classification of Ericaceae: molecular and morphological evidence. *The Botanical Review* 68(3): 335-423.
- Lalonde M. & A. Quispel (1977). Ultrastructural and immunological demonstration of the nodulation of the European *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. host plant by the North-American *Alnus crispa* var. *mollis* Fern. root nodule endophyte. *Can. J. Microbiol.* 23: 1529-1547.
- Lide D. R. (2009). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 90^e ed. CRC Press Inc.
- Massicote H.-B., L.-H. Melville, R. Molina & R.-L. Peterson (1993). Structure and histochemistry of mycorrhizae synthesized between *Arbutus menziesii* (Ericaceae) and two Basidiomycetes, *Pysolithus tinctorius* Pisolithaceae and *Lipoderma bicolor* Corticiaeae. *Mycorrhiza* 3: 1-11.
- Mikola P. (1998). *Ectendomycorrhiza* of conifers. *Silva fennica* 22(1): 19-27.
- Montanez A., C. Abreu, P. R. Gill, G. Hardarson & M. Sicardi (2009). Biological nitrogen fixation in maize (*Zea mays* L.) by N-15 isotope-dilution and identification of associated culturable diazotrophs. *Biology and Fertility of Soils* 45: 253-263.
- Peng G., W. Zhang, H. Luo, H. Xie, W. Lai & Z. Tan (2009). *Enterobacter oryzae* sp. nov., a nitrogen-fixing bacterium isolated from the wild rice species *Oryza latifolia*. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 59: 1650-1655.
- Pérez-Escobar O.-A., G. Chomicki, F. L. Condamine, A. P. Karremans, D. Bogar, N. J. Matzke, D. Silvestro & A. Antonelli (2017). Recent origin and rapid speciation of neotropical orchids in the world's richest plant biodiversity hotspot. *New Phytologist* 215: 891-905.
- Peterson R. L., H.-B. Massicote, L.-H. Melville & F. Phillips (2006). Mycorrhizas: anatomy and cell biology. *National Research Council of Canada, Ottawa*: CD-Rom.
- Ramírez S. R., B. Gravendeel, R. B. Singer, C. R. Marshall & N. E. Pierce (2007). Dating the origin of the Orchidaceae from a fossil orchid with its pollinator. *Nature* 448: 1042-1045.

- Read D. J. (1990). Ecological interactions by mycorrhizal fungi. *Endocytobiology* 4: 99-107.
- Rillig M. C., S. F. Wright & V. T. Eviner (2002). The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: comparing effects of five plant species. *Plant and Soil* 238: 325-333
- Rosenberg E. & I. Zilber-Rosenberg (2013). *The Hologenome Cioncept: Human, animal and plant microbiota*. Springer.
- Santi C., D. Bogusz & C. Franche (2013). Biological nitrogen fixation in non-legume plants. *Ann Bot* 111: 743-767.
- Schwencke J. & M. Caru (2001). Advances in actinorhizal symbiosis: Host plant-Frankia interactions, biology, and application in arid land reclamation. A review. *Arid Land Res. Manag.* 15: 285-327.
- Schwery O., R. E. Onstein, Y. Bouchenak-Khelladi, Y. Xing, R. J. Carter & H. P. Linder (2015). As old as the mountains: the radiations of the *Ericaceae*. *New Phytologist* 207: 355-367.
- Selosse M.-A. (2017). *Jamais seul. Ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations*. Actes Sud, Arles.
- Tisserrand E. *et al.* (2013). The genome of an arbuscular mycorrhizal fungus provides insights into the oldest plant symbiosis. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 110: 20117-20122.
- Trémouillaux-Guiller J. & V. A. R. Huss (2007). A cryptic intracellular green alga in *Ginkgo biloba*: ribosomal DNA markers reveal worldwide distribution. *Planta* 226: 553-557.
- Trémouillaux-Guiller J., T. Rohr, R. Rohr & V. A. R. Huss (2002). Discovery of an endophytic alga in *Ginkgo biloba*. *American Journal of Botany* 89(5): 727-733.
- Van Beneden P.-J. (1875). *Les commensaux et les parasites dans le règne animal*. Bibliothèque scientifique internationale. Librairie Germer Baillière, Paris.
- Van der Heijden M. G. A. & I. R. Sanders (2002). *Mycorrhizal Ecology*. Springer.
- Welbaum G. E., A. V. Sturz, Z. Dong & J. Nowak (2003). Endophytic nitrogen fixation in sugarcane: present knowledge and future applications. *Plant Soil* 252: 139-149.
- Wright S. F., M. C. Rillig & K. A. Nichols (2000). Glomalin: A soil protein important in carbon sequestration. *Abstracts of papers of the American Chemical Society* 220: 721-725.

Deuxième partie

Étudier le passé pour comprendre le présent

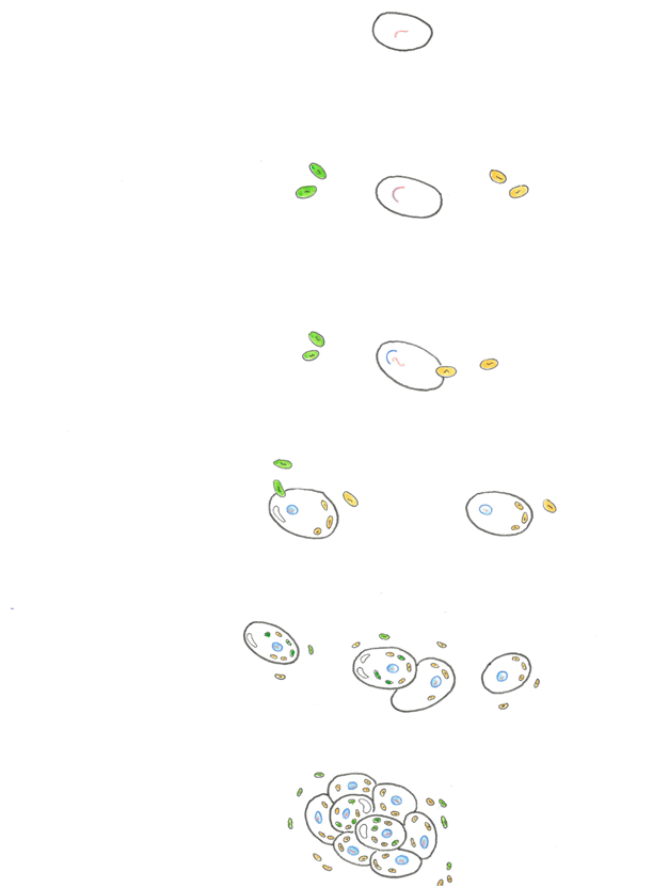


Image de la page précédente:

Lignée évolutive des procaryotes aux eucaryotes, 2024. Dessin au crayon et aquarelle.

Le continuum du vivant s'exprime ici sur plus de 3 milliards d'années. Le dessin 1 tout en haut présente une cellule de micro-organisme telle qu'elle pouvait exister il y a plus de 3,5 milliards d'années (3,5 Ga). Le génome est symbolisé par un brin de chromosome (en rouge) qui n'est pas contenu dans un noyau (procaryote). 0,5 Ga plus tard, la diversité des microbes est déjà importante. Dans le dessin 2, trois groupes nous intéressent particulièrement: les cyanobactéries (en vert), les alpha-protéobactéries (en orange) et les archées au centre (en blanc). Alors que les cyanobactéries révolutionnent le vivant en établissant un nouveau type de photosynthèse dite oxygénique (car elle génère de l'oxygène qui est libéré dans les eaux et l'atmosphère), des alpha-bactéries qui ont la capacité de réaliser une respiration aérobie sont «phagocytées» par des archées. C'est la première endosymbiose: la bactérie «devient» mitochondrie dans la cellule de l'eucaryote, dont le génome est désormais protégé par un noyau. Il y a environ 1,6 Ga, la deuxième endosymbiose est celle d'une cyanobactérie qui est acceptée par certains eucaryotes intégrant ainsi la capacité de réaliser la photosynthèse (dessin 4). C'est la «naissance» des plantes; la cyanobactérie est l'organite de la cellule que nous nommons aujourd'hui chloroplaste. Les êtres multicellulaires apparaissent très rapidement après cet événement, mais il faudra attendre plusieurs centaines de millions d'années pour qu'ils sortent de l'eau. Cette étape est franchie grâce à une troisième symbiose, celle d'un champignon et d'une algue (dessin 5). Le dessin 6, tout en bas, montre cette réussite, réalisée il y a environ 0,5 Ga: les cellules fongiques protègent les cellules végétales contre la dessiccation et les rayons ultraviolets. Durant toutes ces étapes, des bactéries restent libres et assurent les échanges d'informations entre elles et les nouveaux organismes.

4 | Aux origines du vivant

Du Soleil à la Terre

Notre univers serait apparu il y a 13,8 milliards d'années (Menegoni *et al.* 2009). Extrêmement chaud et dense à sa naissance, il se serait refroidi rapidement¹⁰ de plusieurs dizaines de milliards de degrés avant que les premiers électrons et protons ne s'unissent pour former de l'hydrogène (H) et de l'hélium (He). Cette gigantesque quantité d'atomes d'hydrogène se condensa en énormes nuages au centre desquels débutterent des réactions thermonucléaires donnant naissance à d'autres éléments chimiques plus lourds : carbone (C), azote (N) et oxygène (O). Ainsi naquirent les premières galaxies il y a plus de 13 milliards d'années. Quant à la Voie lactée, « notre » galaxie, elle pourrait être vieille de 8,3 ($\pm 1,8$) milliards d'années (del Peloso *et al.* 2005).

Les étoiles naissent par effondrement gravitationnel de « nuages moléculaires », c'est-à-dire de nébuleuses interstellaires suffisamment refroidies pour que de l'hydrogène moléculaire (ou « dihydrogène » [H₂]) puisse se former. C'est ainsi que notre Soleil naît il y a 4,57 milliards d'années (Bonanno *et al.* 2002) au centre d'un nuage moléculaire, dont la périphérie s'organise en un disque protoplanétaire. Alors que le Soleil consolide son cœur nucléaire, les planètes telluriques telles que

¹⁰ On compte tout de même plus de 370 000 ans (Hinshaw 2009).

la Terre, Mars, Vénus et Mercure, commencent à se former par agrégation de grains de poussière. Au rythme de quelques centimètres d'agré-gats métalliques et silicatés par année, ces planètes mettront plusieurs millions d'années pour atteindre leur taille actuelle (Lin 2008).

Le Soleil tire son énergie de la fusion nucléaire transformant, en son centre, l'hydrogène en hélium. L'énergie produite s'échappe dans l'espace par rayonnement. Lumière et chaleur atteignent ainsi la surface de la Terre, tout comme celle des autres planètes du Système, avec des intensités qui varient en fonction de leur distance par rapport au Soleil. Selon ce que nous supputons de l'émergence de la Vie, la Terre était à une distance idéale (et l'est toujours) pour cet événement : à la fois assez proche de l'astre pour que les gaz ne gèlent pas, et assez éloignée pour qu'ils restent soumis à l'attraction de la planète et ne s'échappent pas dans l'espace. Mars pouvait être également une bonne candidate pour que la Vie s'y développe, mais ses dimensions, six fois plus modestes que celles de la Terre, lui confèrent une gravité bien plus faible, rendant compliquée la conservation d'une atmosphère dense et protectrice des structures fragiles du vivant (Westall *et al.* 2013; Mulhauser *et al.* 2023).

Durant les premières centaines de millions d'années de son existence, notre globe était une boule de feu qui laissait s'échapper continuellement de la lave en fusion ; il n'existait ni mer ni continent. Quand le magma a commencé à se solidifier et la croûte terrestre à se former (Harrison *et al.* 2005), de nombreux minéraux se sont formés dans les roches magmatiques : quartz, feldspath, chlorite, pyrite, etc. L'un de ces minéraux, le « zircon » (ZrSiO_4), est particulièrement résistant à tout type d'altérations, notamment métamorphiques : si la gangue rocheuse qui le contient s'érode, il n'est pas détruit et peut se retrouver dans des roches nouvellement formées. Certains cristaux de zircon, vieux de 4,4 milliards d'années, sont les plus anciens minéraux connus existant encore sur Terre. Ce sont ainsi des témoins essentiels pour retracer certains événements des débuts de l'histoire de notre planète. L'une des particularités de ces minéraux est de contenir, par substitution, des atomes d'uranium à la place du zirconium, les deux éléments étant de dimensions proches. Ce sont donc des candidats parfaits pour utiliser la méthode de datation uranium-plomb. L'uranium est naturellement présent sous deux formes isotopiques ; ^{235}U dont la demi-vie est de 700 millions d'années et ^{238}U à demi-vie de 4,5 milliards d'années. Le premier se désintègre en un atome stable de $^{207}\text{plomb}$ et le second

en ^{206}Pb . En étudiant la présence des deux types d'isotopes et en définissant le rapport plomb/uranium de chacun d'entre eux, on arrive à dater l'âge du cristal avec une précision de 0,1 à 1 % (Schaltegger *et al.* 2015). Or, parmi les zircons vieux de 4,4 milliards d'années (soit à peine 200 millions d'années après la formation de la Terre), la présence de ^{18}O témoigne de la formation de ces cristaux en présence d'eau liquide (Valley 2005). Une eau qui ne s'est pas évaporée dans l'espace, comme ce fut notamment le cas sur Mercure.

Durant les quelques centaines de millions d'années qui suivirent, la Terre continua à se refroidir, à tel point que la croûte terrestre recouvrit une grande partie du globe (Harrison *et al.* 2005), en séparant les roches en fusion se trouvant en son cœur des couches supérieures plus froides. Toutefois, des zones de faille permettaient à la lave de continuer à se répandre en surface en formant de grandes couvertures basaltiques sur lesquelles purent se former, il y a 4,2 milliards d'années, les premières grandes étendues marines (Cavosie *et al.* 2005). Durant tout l'Hadéen (4,54 à 4 milliards d'années), le bombardement continu de la surface terrestre par des astéroïdes l'enrichit de dioxyde de carbone, d'azote, de méthane et d'eau. Une atmosphère primitive, chargée d'épaisses vapeurs d'eau, irrespirable puisque l'oxygène y faisait défaut, et dépourvue d'ozone dans sa couche supérieure, laissait de fait le champ libre à la dégradation d'éventuelles molécules par le rayonnement ultraviolet.

La naissance de la Vie en conditions extrêmes

Si nous devons supposer que la Vie était déjà présente durant l'Hadéen, elle ne pouvait donc l'être qu'en des zones bien protégées du rayonnement solaire et cosmique, où des flux de matière étaient disponibles pour que ce proto-système vivant se maintienne. Connaissant également l'importance de l'eau comme substance edificatrice, des microbiologistes et des océanographes ont suggéré que des sources sous-marines chaudes, riches en sulfates ou d'autres gaz riches en hydrogène, pouvaient être l'une des plus probables zones d'émergence de la Vie.

D'autres chercheurs pensent que c'est dans l'interface entre l'eau de surface et l'atmosphère primitive que les conditions, du fait d'une grande diversité d'états d'énergie, étaient les plus propices à une organisation organique des molécules. La fameuse expérience de Miller et

Urey (tout comme celles qui suivirent) donne du crédit à cette hypothèse (Miller 1953; Miller & Urey 1959). En impulsant durant une semaine des décharges électriques dans un mélange de vapeur d'eau, d'hydrogène, de méthane et d'ammoniac mais sans oxygène – l'état supposé de l'atmosphère terrestre primitive –, les chercheurs obtinrent la formation de différentes molécules, ainsi que de deux acides aminés, l'alanine et le glycocolle, que le monde scientifique ne pensait pouvoir être produits que par des êtres vivants. D'autres expériences plus récentes ont permis de démontrer que les cinq constituants de base de l'ADN et de l'ARN – l'adénine, la cytosine, la guanine, la thymine et l'uracile (voir chapitre 11 «Le continuum du vivant») –, communs à tous les organismes vivants, pouvaient être construits grâce au procédé de Miller et Urey.

Finalement, ce qui nous importe le plus dans le cadre de cet ouvrage n'est pas de connaître les conditions exactes d'émergence du vivant – ce d'autant plus que c'est peut-être leur hétérogénéité qui compte –, mais la manière dont il s'est construit. Ces conditions primitives impliquèrent nécessairement une interaction entre les atomes de carbone et d'hydrogène, puisqu'aujourd'hui encore ce sont les pièces essentielles des longues chaînes moléculaires du vivant. Le carbone des temps archéens (ou peut-être même déjà des temps hadéens) s'allia facilement à l'oxygène, au phosphore, au soufre ou encore à l'azote pour assembler toute une chaîne d'atomes dont les variantes contemporaines constituent presque la totalité des molécules organiques. Pourtant, dans l'environnement des débuts de l'histoire de la Terre, ces molécules fragiles devaient faire face à de multiples agressions parmi lesquelles des températures élevées et des radiations ultraviolettes continues.

En étudiant les bactéries hyperthermophiles actuelles, nous savons que celles-ci peuvent survivre, mais aussi se développer dans des eaux chaudes de 80 à plus de 100 °C. Un exemple parmi les plus extrêmes est celui de l'archée *Pyrolobus fumarii* qui vit, en compagnie de virus, et se reproduit autour des sources hydrothermales sous-marines de l'Atlantique, sous pression élevée et dans un gradient de température se situant entre 90 et 113 °C (Forterre 2007), ou encore celui de *Methanopyrus kandleri*, une autre archée des zones hydrothermales profondes (Stetter 2006; Aragno 2023). Certains biologistes supposent du reste que ce type d'organisme serait celui qui ressemblerait le plus à l'organisme cellulaire appelé «Luca» (pour *Last Universal Common Ancestor* ou «dernier ancêtre commun universel»), celui dont descenderaient toutes les espèces (Xue *et al.* 2003).

De fait, il faut effectivement attendre le début de l'Archéen (4 milliards d'années) pour que de grandes masses d'eau se refroidissent entre 70 et 100 °C, et deviennent « viables » sur le long terme. À cela s'ajoute une condition capitale, celle de l'absence d'oxygène atmosphérique qui, s'il avait été présent, se serait combiné avec les petites molécules naissantes, les dégradant et les « brûlant » au passage. Les acides aminés, ou d'autres constituants indispensables au système du vivant comme la molécule adénosine triphosphate (ATP) qui transporte l'énergie chez tous les organismes terrestres sans exception, n'auraient ainsi pas pu subsister dans cet environnement aquatique. Voilà qui est troublant : cet oxygène atmosphérique, dont nous ne pouvons pas nous passer aujourd'hui pour rester en vie, devait faire défaut pour que s'assemblent les premières substances organiques nécessaires au système du vivant.

Si les sources marines hydrothermales restent des candidates sérieuses à l'apparition de la Vie, la construction primitive de cette dernière – pour autant que nous sachions bien la définir – reste aussi du domaine des hypothèses. Au stade actuel de nos connaissances, le scénario privilégié est celui de la mise en place d'un système de réactions chimiques permettant l'assemblage de chaînes de molécules. Certaines d'entre elles réussissaient, tout en se maintenant, à favoriser la formation ou la transformation d'autres liaisons chimiques privilégiées. L'existence de ces molécules, appelées « catalyseurs », fut indispensable pour que le système puisse automatiquement s'entretenir. Indispensable, oui, mais pas éternelle. L'autocatalyse des substances demandait – et demande toujours – un recyclage continu organisé de la matière. Là est la clé de voûte de la Vie : un flux cyclique des éléments, tous interdépendants, mais apparaissant sans doute successivement au cours de l'évolution du vivant (Nisbet & Fowler 1999). Lynn Margulis le résume très bien : « Les processus cycliques sont très importants pour la Vie. Ils permettent de préserver des éléments clés du passé en dépit des fluctuations et des tendances au désordre de l'environnement général » (Margulis & Sagan 1986). J'ajouterais qu'ils déterminent toute l'évolution du vivant, impliquant non pas une compétition, mais plutôt une construction symbiotique interactive entre tous les acteurs de ces cycles.

Afin de maintenir cela, la matière moléculaire tend à « s'organiser » en un système bien identifié et qui lui est propre, impliquant un isolement protectif du milieu vital par la construction d'une membrane

permettant le « maintien interne » d'un métabolisme ; c'est ainsi qu'apparaissent les premières cellules (Aragno 2023). Enfin, ces dernières doivent avoir la capacité de se répliquer pour assurer l'acquis du passé. La réplication primitive va se muer en un codage de l'information qui, au fur et à mesure de l'augmentation de la complexité, aboutit à la biodiversité génétique actuelle.

Fermentations et respirations « primitives »

Durant plus de 2 milliards d'années, le monde vivant n'était composé que d'êtres unicellulaires qui avaient développé plusieurs voies métaboliques différentes, des fermentations et des respirations « primitives » pratiquées en milieu dépourvu d'oxygène par des bactéries et des archées. La formation de sucres dans la soupe primitive, tels que le ribose ou le glucose, donna une source potentielle d'énergie, peut-être grâce à des réactions exergoniques issues de fermentations particulières (Aragno & Mulhauser 2022). La fermentation est un processus transformant des glucides en différents composés tels que gaz, acides ou alcool. C'est durant cette réaction chimique que des formes d'énergie sont libérées, permettant notamment le transfert d'électrons provenant de petites molécules. Les fermentations des premiers êtres vivants devaient se réaliser directement dans l'environnement ambiant et non dans leurs cellules, ce qui limitait grandement la capacité d'autorégulation, les organismes étant fortement dépendants des conditions extérieures. Parmi les produits de dégradation de cette voie métabolique figurait le gaz carbonique.

L'une des premières étapes¹¹ dans l'organisation symbiotique du vivant a été la mise en place de l'autotrophie, c'est-à-dire la production de matière organique à partir d'une substance inorganique. La source d'énergie primaire pour la formation de chaînes carbonées fut naturellement le gaz carbonique (CO_2), « surabondant » dans les océans de l'Archéen : absorbé, avec de l'hydrogène, par la cellule naissante, il aboutit à un dégagement de chaleur, de méthane (CH_4) et d'eau. C'est la « méthanogenèse », l'une des voies cataboliques les plus importantes de la vie primitive (Kasting, Pavlov & Siefert 2001). À ce stade, le premier cycle primitif du carbone dépendait entièrement d'événements

¹¹ La chronologie de mise en place des différents systèmes productifs d'énergie est encore peu claire.

géologiques diffus, tels que des émanations de soufre dans les sources thermales sous-marines. En outre, la production de méthane rejeté dans l'atmosphère par les premiers organismes vivants avait pour conséquence l'installation d'un effet thermostatique en compensant la réduction d'un autre gaz à effet de serre, le CO_2 , transformé en carbonates piégés dans les roches.

On pense qu'un cycle primitif de l'azote aurait aussi bien pu débiter dès l'apparition de la Vie. Il devait être fortement marqué par l'alternance d'une phase abiotique sous forme de diazote (N_2) et d'une phase biologique dans laquelle entrait en jeu l'ammonium (NH_4^+), comme nous avons pu le lire dans le chapitre 3 «Symbioses». L'azote est, rappelons-le, un élément essentiel du vivant, entrant, avec l'hydrogène, l'oxygène et le carbone, dans la composition de nombreuses molécules et des composés tels que les acides aminés, constituants de base des protéines.

Il y a 3,7 milliards d'années, à la suite des processus primitifs de production d'énergie que sont la méthanogenèse et la fermentation, d'autres voies cataboliques se développèrent «rapidement», induisant au passage des cycles nouveaux : ceux du fer et du soufre (Gobat, Aragno & Matthey 2017). Des bactéries ferriréductrices (réduisant le fer trivalent Fe^{3+} ou encore l'oxyde de fer Fe_2O_3 en fer bivalent Fe^{2+}) et des bactéries sulfo- (réduisant le soufre natif en hydrogène sulfuré H_2S) ou sulfatoréductrices (réduisant le sulfate SO_4^{2-} en hydrogène sulfuré H_2S) mirent en place deux processus de respiration anaérobie.

En outre, ces microbes adoptèrent la «phototrophie» : grâce à la présence de pigments photorécepteurs, ils réussirent, sans oxygène, à capter le rayonnement électromagnétique et à le transformer en énergie nécessaire à leur métabolisme. On pense que la photosynthèse anoxygénique fut pratiquée très rapidement après l'apparition de la Vie sur Terre. Du matériel microbien fossile est en effet identifié dans des roches vieilles de 3,46 milliards d'années, notamment en Australie (Allwood *et al.* 2007 ; van Kranendonk *et al.* 2008) et en Afrique du Sud (Westall *et al.* 2006). Grâce à l'arrangement minéralogique des couches, les auteurs ont identifié des bactéries fermentaires, mais également des micro-organismes photosynthétiques ! Une hypothèse considère même que certains d'entre eux sont des photoferrotrophes faisant partie d'une lignée fantôme – c'est-à-dire un type organique qui n'existe plus aujourd'hui et dont on n'a trouvé aucun fossile, à l'exception des résultats chimiques de leur activité conservés dans les microbialithes

(Aragno & Mulhauser 2022). Des traces plus anciennes d'une activité biotique supposée ont été mises en évidence dans des roches du Groenland vieilles de 3,7 milliards d'années (Nutman *et al.* 2016; Westall, Hickman-Lewis & Cavalazzi 2019), mais une étude plus complète a fini par désavouer cette découverte (Allwood *et al.* 2018).

Bibliographie

- Allwood A. C., M. R. Walter, I. W. Burch & B. S. Kamber (2007). 3.43 billion-year-old stromatolite reef from the Pilbara Craton of Western Australia: ecosystem-scale insights to early life on Earth. *Precambrian Research* 158 (3-4) : 198-227.
- Allwood A. C., M. T. Rosing, D. T. Flannery, J. A. Hurowitz & C. M. Heirweh (2018). Reassessing evidence of life in 3,700-million-year-old rocks of Greenland. *Nature* 563 : 241-244.
- Aragno M. & B. Mulhauser (2022). Which types of organisms left their signature in the microbialites of North Pole Dome (Australia), 3.48 Ga ago? *Bull. Soc. Neuchâtel. Sci. Nat.* 142 : 5-29.
- Aragno M. (2023). De l'origine de la vie : sur Terre ou dans l'espace? In Mulhauser *et al.* La collection paléontologique de microbialithes. *Trésors des collections du Jardin botanique de Neuchâtel* 5 : 11-19.
- Bonanno A., H. Schlattl & L. Paternò, (2002). The age of the Sun and the relativistic corrections in the EOS. *Astronomy and Astrophysics* 390 : 1115-1118.
- Cavosie A. J., J. W. Valley S., A. Wilde & EIMF (2005) Magmatic $\delta^{18}\text{O}$ in 4400-3900 Ma detrital zircons: a record of the alteration and recycling of crust in the Early Archean. *Earth and Planetary Science Letters* 235(3-4) : 663-681. doi.org/10.1016/j.epsl.2005.04.028 (consulté le 30.01.2024).
- Del Peloso E. F., L. da Silva, G. F. Porto de Mello & L. I. Arany-Prado (2005). The age of the Galactic thin disk from Th/Eu nucleocosmochronology: extended simple. *Proceedings of the International Astronomical Union, Cambridge University Press* 1 : 485-486.
- Forterre P. (2007). *Microbes de l'enfer*. Belin, Paris.
- Gobat J.-M., M. Aragno & W. Matthey (2017). *Le sol vivant. Bases de pédologie. Biologie des sols*. 3^e éd. revue et augmentée. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.
- Harrison T. M., J. Blichert-Toft, W. Müller, F. Albarede, P. Holden & S. J. Mojzsis (2005). Heterogeneous haden hafnium: evidence of continental crust at 4.4 to 4.5 Ga. *Science* 310(5756) : 1947-1950.
- Hinshaw G. (2009). Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: data processing, sky maps, and basic results. *The Astrophysical Journal Supplement* 180 : 225-245.
- Kasting J. F, A. A. Pavlov & J. L. Siefert (2001). A coupled ecosystem-climate model for predicting the methane concentration in the archean atmosphere. *Orig. Life Evol. Biosph.* 31 : 271-285.
- Lin D. N. C. (2008). The genesis of planets, *Scientific American* 298 (5) : 50-59.
- Margulis L. & D. Sagan (1986). *Origins of Sex: Three Billion Years of Genetic Recombination*. Yale University Press.
- Menegoni E., S. Galli, J. G. Bartlett, C. J. A. P. Martins & A. Melchiorri (2009). New constraints on variations of the fine structure constant from CMB anisotropies. *Physical Review D* 80(8) : 87302.

- Miller S. L. & H. C. Urey (1959). Organic compound synthesis on the primitive Earth. *Science* 130 (3370): 245-251.
- Miller S. L. (1953). A production of amino acids under possible primitive Earth conditions. *Science* 117(3046): 528-529.
- Mulhauser B., M. Aragno, T. Bontognali & J.-L. Josset (2023). La collection paléontologique de microbialithes. *Trésors des collections du Jardin botanique de Neuchâtel* 5.
- Nisbet E. G. & C. M. R. Fowler (1999). Archaean metabolic evolution of microbial mats. *Proc. Biol. Sci.* 266: 2375-2392.
- Nutman A. P., V. C. Bennett, C. R. L. Friend, M. J. Van Kranendonk & A. R. Chivas (2016). Rapid emergence of life shown by discovery of 3,700-million-year-old microbial structures. *Nature* 537 (7621): 535-538.
- Schaltegger U., A. K. Schmitt & M. S. A. Horstwood (2015). U-Th-Pb zircon geochronology by ID-TIMS, SIMS and laser ablation ICP-MS: recipes, interpretations, and opportunities. *Chemical Geology* 402: 89-110.
- Stetter K. O. (2006). History of discovery of the first hyperthermophiles. *Extremophiles* 10: 357-362.
- Valley J. W. (2005). A Cool Early Earth? *Scientific American* 2005: 59-65.
- Van Kranendonk J., P. Philippot, K. Lepot, S. Bodorkos & F. Pirajno (2008). Geological setting of Earth's oldest fossils in the c. 3.5 Ga Dresser Formation, Pilbara craton, Western Australia. *Precamb. Res.* 167: 93-124.
- Westall F., C. E. J. de Ronde, G. Southam *et al.* (2006). Implications of a 3.472–3.333 Ga-old subaerial microbial mat from the Barberton greenstone belt, South Africa for the UV environmental conditions on the early Earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society: Biological Sciences* 361: 1857-1875.
- Westall F., D. Loizeau, F. Foucher, N. Bost, M. Bertrand, J. Bago & G. Kminek (2013). Habitability on Mars from a microbial point of view. *Astrobiology* 13(9): 887-897.
- Westall F., K. Hickman-Lewis & B. Cavalazzi (2019). Biosignatures in deep time. In Cavalazzi B. & F. Westall (éd.). *Biosignatures for Astrobiology. Advances in Astrobiology and Biogeophysics*. Springer, Cham.
- Xue H., K. L. Tong, C. Marck, H. Grosjean & J. T. Wong (2003). Transfer RNA paralogs: evidence for genetic code-amino acid biosynthesis coevolution and archaeal root of life. *Gene* 310: 59-66.

La Grande Oxydation, la plus grande révolution de l'histoire de 5 la Vie sur Terre

Pour comprendre l'évolution de la Vie, il faut se souvenir que les bactéries ont réussi à mettre au point la photosynthèse, un processus majeur qui permet de transformer la lumière en une source d'énergie utilisable par l'organisme. Il en existe plusieurs types, mais l'une d'elles, la photosynthèse oxygénique, va nous intéresser particulièrement.

De la Vie sans oxygène à la Vie oxydée

Lors des premières centaines de millions d'années de développement de la Vie sur Terre, l'oxygène était présent dans une grande partie de l'environnement aquatique sous forme de dioxygène (O_2). Mais celui-ci était toxique pour les organismes primitifs aquatiques qui se développaient donc exclusivement en milieu anoxique. Leur métabolisme demandait d'une part du carbone pour construire les chaînes carbonées de leurs « corps », et de l'hydrogène d'autre part. Cet apport d'énergie était réalisé soit par fermentation, soit par chimiosynthèse anaérobie (en absence d'oxygène libre), soit encore par « photosynthèse anoxygénique » (c'est-à-dire sans production d'oxygène) en puisant l'hydrogène dans des molécules d'hydrogène sulfuré (H_2S), d'ions ferreux (Fe^{+2}), d'hydrogène moléculaire (H_2), voire de composés organiques.

Du fait de sa propension à réagir avec les autres éléments minéraux, l'oxygène « libre » trouva d'abord des composés métalliques avec

lesquels s'associer, tels que le fer ou le manganèse. Ces métaux vinrent à manquer, laissant ainsi l'oxygène continuer sa migration dans les océans, puis dans l'atmosphère. De surcroît, en poursuivant son évacuation dans l'atmosphère, le dioxygène (O_2) se lia au méthane (CH_4) pour produire, par combustion, du gaz carbonique (CO_2) et de l'eau (H_2O). Il réagit également avec le dioxyde d'azote (NO_2) pour former de l'ozone (O_3) dans la haute atmosphère, un gaz que l'on sait être protecteur vis-à-vis des radiations ultraviolettes du Soleil.

Si tout ceci compose un équilibre essentiel pour la Vie d'aujourd'hui, il n'en était pas de même durant les temps archéens : l'oxygène libre restait un produit dangereux pour les êtres vivants, du fait de la propension de l'atome d'oxygène, à température relativement basse, à attirer un électron non apparié sur sa couche externe. Il forme alors ce qu'on appelle un « radical libre » (peroxyde, superoxyde). Les radicaux libres sont très instables, cherchant à réagir avec toute autre molécule disponible. Selon les molécules générées, une réaction de peroxydation peut avoir lieu avec les structures des membranes d'une cellule vivante. L'oxygène « brûle » les lipides, aboutissant au vieillissement puis à la mort de l'organisme. C'est ce qui se passait avec les membranes cellulaires des bactéries constituées de doubles couches de lipides polaires. Si ces liposomes protecteurs de la cellule étaient perméables à l'eau et au gaz carbonique, ils l'étaient bien moins vis-à-vis des autres composés dissous dans l'eau (Aragno 2023). Les radicaux libres de peroxydes changèrent la donne en « brûlant » les cellules et en les rendant perméables à tout échange gazeux, même toxique. Le vivant d'aujourd'hui n'a toujours pas réussi à effacer ce danger : les cellules de notre peau meurent autant par l'action des rayons ultraviolets que par une oxydation continue ; c'est pourquoi notre épiderme doit sans cesse être renouvelé.

L'oxygénation massive de l'environnement et ses conséquences

Il y a donc quelque 2,5 milliards d'années, la situation devenait intenable pour les bactéries ayant évolué depuis toujours dans un environnement pratiquement anoxique. Il leur fallait trouver une solution pour intégrer l'oxygène dans les cycles biogéochimiques, sans quoi elles auraient été inexorablement consumées. Le tour de force, véritable révolution dans l'histoire de la Vie, fut réalisé par les cyanobactéries, premiers organismes

à produire de l'oxygène libre par «photosynthèse oxygénique». Il s'agit d'êtres unicellulaires sans noyaux (procaryotes) qui peuvent s'unir en colonies sous la forme de longs filaments dont les couleurs, changeantes, sont dues à la présence de pigments bleus (phycocyanines), rouges (phycoérythrine) et verts (chlorophylle-a, chlorophylle-d, chlorophylle-f); une apparence qui leur vaut d'être parfois nommés «algues bleues» ou «algues bleu-vert», alors qu'ils appartiennent bien au groupe des bactéries (dit *Eucabacteria* pour «vraies bactéries»). Leur origine n'est pas claire. Il s'agirait peut-être d'une association symbiotique rassemblant dans une seule cellule le photosystème¹² particulier d'une bactérie sulfureuse verte et celui d'une bactérie sulfureuse pourpre (Mazliak 2009). En tous les cas, une analyse phylogénétique basée sur la comparaison des génomes entiers d'une quarantaine d'espèces différentes, appartenant aux trois classes de cyanobactéries, précise que l'ancêtre commun à ces trois groupes ne pratiquait pas la photosynthèse oxygénique et que seule la classe des cyanophycées (nommée scientifiquement *Oxyphotobacteria*) réussira à l'acquérir durant la période que nous allons à présent décrire (Soo *et al.* 2017).

Les archives géologiques nous permettent de dater le début de l'augmentation progressive mais massive de la teneur en oxygène dans l'atmosphère il y a 2,45 milliards d'années, jusqu'à ce qu'elle se stabilise à environ 4 % il y a 1,85 milliard d'années (Holland 2006). Une augmentation dont l'apparition de la photosynthèse oxygénique ne serait cependant pas la seule cause. En effet, une longue période de glaciation généralisée eut lieu sur l'ensemble du globe jusque dans les zones équatoriales, durant laquelle du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) aurait été stocké en masse dans les glaciers, à cause d'un rayonnement ultraviolet intense atteignant la surface de la Terre en l'absence d'une couche d'ozone (O_3). En fondant, la calotte glaciaire aurait relâché du peroxyde d'hydrogène dans les océans (Kopp *et al.* 2005). L'hypothèse qui prévaut est que, le réchauffement se faisant progressivement, tous les microbes survivants ont eu le temps de s'adapter à leur nouvel environnement chimique en construisant des mécanismes de protection du métabolisme contre l'oxygène et ses dérivés (peroxydes, superoxydes, oxygène singulet).

¹² Les photosystèmes I et II, tous deux présents chez les cyanobactéries, sont des complexes de pigments particuliers collectant les photons de la lumière et les transmettant à un centre photochimique où les charges électriques sont séparées et recueillies à l'aide de protéines dans une chaîne de transporteurs d'électrons.

Cette capacité à réaliser la photosynthèse en utilisant l'eau, à la place de l'hydrogène moléculaire ou de composés soufrés ou ferrugineux, fut à la base d'un profond changement, un tournant absolument majeur de l'histoire du vivant (Eberhard, Finazzi & Wollman 2008). L'oxygène (plus précisément le dioxygène), déchet produit par cette nouvelle activité photosynthétique, s'accumula dans l'atmosphère en une telle densité qu'elle créa une catastrophe naturelle, nommée « Grande Oxydation », beaucoup plus fondamentale que les cinq extinctions massives que connurent les organismes multicellulaires du paléozoïque jusqu'à nos jours. Si la plupart des paléontologues ne parlent pas de cette première catastrophe pour la Vie, c'est que la quantification des pertes en espèces est impossible. En effet, l'absence de parties dures empêche une fossilisation morphologique fidèle des organismes et, *de facto*, la classification systématique subjective qui en découle. Il faut donc se baser sur une explication géochimique du bouleversement pour en saisir l'importance à sa juste mesure.

Eucaryote, mitochondries et chloroplastes

Après avoir survécu à la Grande Oxydation, la Vie va poursuivre son adaptation en développant ses systèmes de protection du matériel génétique et des processus métaboliques majeurs tels que la respiration et la photosynthèse oxygénique. Il y a 1,5 à 2,5 milliards d'années, les processus évolutifs sont toujours en lien avec la question de l'oxygène. De manière très simplifiée, trois conséquences émergent de cette situation : l'apparition des cellules à noyau (eucaryote), celle de mitochondries dans toutes les cellules à noyau, et celle de chloroplastes dans toutes les cellules à noyau pratiquant la photosynthèse.

Une incertitude existe concernant l'apparition de la première cellule à noyau, ancêtre de tous les eucaryotes d'aujourd'hui, qu'ils soient plantes, champignons ou animaux. Mais certains éléments nous amènent à privilégier un scénario établissant un lien direct entre la crise majeure de l'histoire de la Vie qui s'est jouée il y a 1,85 à 2,45 milliards d'années et la mise en place d'un système symbiotique pour y survivre. Que s'est-il donc passé ? Contrairement aux bactéries et aux archées qui sont deux groupes d'organismes unicellulaires dont le matériel génétique est libre à l'intérieur de la cellule, les eucaryotes enferment leur matériel héréditaire, l'ADN chromosomique, dans un noyau entouré d'une double membrane (ou « enveloppe nucléaire »).

Dans le cytoplasme, animé par un mouvement intracellulaire généré par un « cytosquelette », gravitent plusieurs organites dont certains possèdent leur propre génome. C'est le cas des mitochondries qui se divisent à un rythme différent de celui de la cellule. Les mitochondries, présentes dans chacune de nos cellules, tout comme dans celles de tous les animaux, végétaux et champignons, sont le siège de la respiration cellulaire, activité indispensable à notre métabolisme. C'est une voie chimique qui permet de convertir l'énergie contenue dans nos aliments en adénosine triphosphate (déjà rencontré dans le chapitre 3 « Symbioses »), nucléotide qui fournit l'énergie nécessaire pour que les processus chimiques vitaux puissent avoir lieu (circulation, locomotion, division cellulaire, etc.). Pour se rendre compte de l'importance de la respiration cellulaire, notons que chaque jour, un être humain consomme et réactive son propre poids en adénosine triphosphate (Törnroth-Horsefield & Neutze 2008) !

Parce que leur mode de fonctionnement biochimique et leur matériel génétique sont proches de ceux des bactéries, la communauté scientifique accepte l'idée selon laquelle les mitochondries sont d'anciens microbes libres qui ont établi une symbiose avec un autre organisme (Martin & Mentel 2010; Martin, Garg & Zimorski 2015)¹³. Toutefois, plus d'une vingtaine de scénarios proposés par les chercheurs restent encore au stade d'hypothèses. La version la plus couramment privilégiée est celle d'une association étroite entre une archée dans le rôle de l'hôte « extérieur » et d'une alpha-protéobactérie dans celui du « visiteur intérieur ». La piste d'une archée comme structure cellulaire ancêtre de la cellule à noyau est liée à un certain nombre d'homologies fonctionnelles et génomiques entre elles et les eucaryotes actuels. L'interaction entre les deux organismes semble suffisamment étroite pour que la bactérie « se réfugie » à l'intérieur de l'archée lors d'épisodes environnementaux particulièrement défavorables pour elle. Cette endosymbiose aurait accéléré la formation d'un noyau, semble-t-il déjà en bonne voie, afin de mieux protéger, notamment contre les phénomènes d'oxydation, une partie du matériel génétique codant les protéines essentielles à la balance énergétique de ce nouveau type d'organisme (Pittis & Gabaldón 2016).

¹³ Ceci est établi avec certitude sur la base des séquences des ARN ribosomiques des chloroplastes, clairement cyanobactériens, et des mitochondries, clairement a-protéobactériens (comm. pers. Michel Aragno).

Des chloroplastes aux algues

Si les premiers eucaryotes sont logiquement constitués d'une seule cellule, cette même logique de protection vis-à-vis de leur environnement ne tarde pas à se traduire également par leur agrégation, parfois obligatoire, en des êtres multicellulaires aux capacités de protection accrues. La date exacte d'apparition des organismes multicellulaires reste hypothétique, car l'interprétation des fossiles est délicate. Les paléontologues ont trouvé d'énigmatiques « rubans » courbés, tous de même facture, dans des couches géologiques du Michigan (États-Unis) vieilles de 2,1 milliards d'années. La nature de ces rubans nommés *Grypania spiralis*, tout d'abord présentés comme des algues fossiles (Han & Runnegar 1992), reste toutefois incertaine (Henderson 2010). Car comme le souligne mon collègue microbiologiste, le professeur Michel Aragno, « il existe de nombreuses cyanobactéries multicellulaires, filamenteuses et parfois tridimensionnelles, mais l'interprétation des microfossiles est extrêmement hasardeuse. On interprète souvent, pour ne pas dire systématiquement, comme étant des cyanobactéries, des chaînes de cellules qui pourraient aussi bien ressembler à des bactéries sulfato-réductrices filamenteuses, comme le genre *Desulfonema*, d'origine probablement bien plus ancienne ».

En l'état actuel de nos connaissances, les plus vieux fossiles avérés d'algues – en l'occurrence des algues rouges (rhodophytes) – sont datés de 1,6 milliard d'années (Bengtson *et al.* 2017). Or, selon des calculs théoriques basés sur le taux de transmission des gènes (notamment ceux qui codent l'initiation florale chez les plantes et la multiplication cellulaire chez les animaux), c'est aussi à cette période que serait intervenue la séparation des « règnes » animal et végétal (Meyerowitz 2002). Cette séparation aurait débuté avec le phagocytage d'une cyanobactérie libre dans la cellule d'un eucaryote primitif ou d'une archée (Margulis 1981). Une symbiose stable se serait alors mise en place grâce à la cyanobactérie emprisonnée dans une vésicule du cytoplasme de son hôte. La relation d'échanges serait devenue obligatoire, la cyanobactérie ne pouvant plus survivre à l'état libre. Cette cyanobactérie aurait alors donné naissance au chloroplaste, soit l'organe de la photosynthèse chez les végétaux (McFadden 2014). Il faut toutefois préciser que les groupes d'organismes à chloroplastes ne sont pas monophylétiques; aujourd'hui encore, il n'est donc pas possible d'exclure que l'endosymbiose chloroplastique ne s'est pas produite plusieurs fois durant l'évolution du vivant.

Il peut y avoir un ou plusieurs chloroplastes par cellule végétale. Ils se situent dans le cytoplasme, soit l'espace contenu entre la membrane de la cellule et le noyau (celui-ci renfermant le matériel génétique héréditaire). Leur taille, ne dépassant pas quelques micromètres, reste comparable à celle de leur ancêtre libre. Ces organites ont conservé leur propre matériel génétique sous forme d'ADN (nommé «ADN chloroplastique») et se répliquent par division autonome, ce qui les différencie clairement du reste de la cellule. Leur forme ressemble un peu à celle d'une graine de haricot, à l'intérieure de laquelle s'empilent des «petits coussins plats» nommés «thylakoïdes». Le processus de photosynthèse se situe à ce niveau, grâce à la présence de pigments sensibles que sont les chlorophylles et les caroténoïdes. Les différents types de chlorophylles (il en existe cinq) et les caroténoïdes absorbent une grande partie du spectre lumineux, à l'exception du vert; raison pour laquelle le feuillage des plantes nous apparaît de cette couleur.

La photosynthèse résulte de la mise en commun de deux ensembles métaboliques distincts, originellement autonomes: la phototrophie et l'autotrophie. Dans la phase phototrophe, les pigments absorbent les radiations des rayons solaires par oxydation de l'eau, l'énergie ainsi récupérée permettant la phosphorylation (+P) de l'adénosine diphosphate (ADP) et ainsi sa transformation en adénosine triphosphate (ATP)¹⁴. Les électrons «perdus» doivent alors être remplacés. Un certain nombre de donneurs externes (S_2 , S^0 , Fe_{2+} , H_2) sont sollicités selon le type de photosynthèse, aboutissant, après «capture» des électrons, à la production de différents «déchets» (SO_4^{2-} , Fe_2O_3 , etc.). Dans la phase autotrophe de la photosynthèse, le pouvoir réducteur engendré dans la première phase est réutilisé pour convertir le gaz carbonique en biomasse¹⁵. Celle-ci se traduit par la formation de sucres, une «forme d'énergie» que les plantes peuvent stocker. Dans le cadre de la photosynthèse oxygénique, l'eau est donneuse d'hydrogène, libérant du dioxygène un déchet rejeté dans l'atmosphère (Blankenship 2002).

¹⁴ Plus précisément les pigments absorbent l'énergie lumineuse, qui va activer la chlorophylle réduite, la rendant apte à réduire à son tour les donneurs d'électrons (NADH, Ferrédoxines) responsables de l'autotrophie. Une partie des électrons activés va être transmise à une chaîne de transporteurs, couplée via l'ATP synthase à une synthèse d'ATP (comm. pers. Michel Aragno).

¹⁵ Via l'une des voies de l'autotrophie: cycle de Calvin chez la plupart des végétaux, cycle tricarboxylique inversé chez les Chlorobiaceae, et hydroxypropionate chez les Chloroflexaceae (comm. pers. Michel Aragno).

Cette endosymbiose se serait logiquement réalisée peu après la différenciation entre des « végétaux » primitifs et les ancêtres des phylums hétérotrophes (animaux, champignons, etc.). Ainsi serait née la première espèce d'algue photosynthétique, sans doute unicellulaire. Était-ce une algue brune ou brun-doré (division des ochrophytes), rouge (division des rhodophytes) ou verte (division des chlorobiontes) ? Peut-être aucune d'entre elles, mais la présence de chlorophylle-a partagée par tous les groupes d'algues et de cyanobactéries, ainsi que la structure de leurs membranes cellulaires, nous mènent sur les traces d'un ancêtre commun (de Reviers 2002). Et parce que les algues rouges ne possèdent ni les chlorophylles-b des algues vertes et des plantes terrestres, ni les chlorophylles-c des algues brunes et brun-doré, elles pourraient être la première lignée d'algues multicellulaires à apparaître dans l'histoire du vivant, comme le suggèrent les découvertes paléontologiques (Bengtson *et al.* 2017).

Les algues n'ont pas seulement apporté la diversité des pigments chlorophylliens au monde vivant, mais également toute une armada de composés métaboliques pour lutter contre les radiations ultraviolettes. Nous l'avons du reste vu au chapitre précédent : la conquête des milieux terrestres par les végétaux aquatiques a été accompagnée de différentes adaptations symbiotiques pour lutter contre le dessèchement et le rayonnement solaire. Si le champignon associé a pu offrir ses tissus de protection pour lutter contre la dessiccation, l'algue a développé de nombreux éléments photoprotecteurs tels que des acides aminés (MLAA ou *Mycosporine-like amino acid* en anglais) ressemblant à la mycosporine¹⁶ (Bhatia *et al.* 2011), des pigments tels que les caroténoïdes et des tanins antioxydants. Du reste, de nombreux animaux marins vivant à faible profondeur cherchent à s'associer aux algues pour profiter de leurs métabolites. Ainsi, certains oursins se nourrissent d'algues pour protéger leurs œufs contre le rayonnement (Fong & Mann 1980), de même que les tanins des algues brunes ont des effets protecteurs lors de l'embryogenèse des poissons-zèbres (Cha *et al.* 2012). La consommation de métabolites spécialisés et pigments protecteurs est également commune chez certains échinodermes tels que

¹⁶ La mycosporine est un métabolite synthétisé par les champignons. Comme ce composé a d'abord été découvert dans le monde fongique, on a utilisé la racine *myco* (champignon) pour le caractériser. Le terme *mycosporine-like* permet de souligner la similarité de ces acides aminés, dénotant peut-être une origine symbiotique très ancienne qui aiderait à établir la genèse des champignons dont on a peu de preuves paléontologiques.

les concombres de mer (Shick *et al.* 1992; Bandaranayake & Des Rocher 1999).

La réalité est donc bien différente de l'image que nous avons de l'activité des algues, trop souvent associée, voire réduite, à une forme de pollution. À ce titre, il est bon de rappeler que le plancton d'algues marines (ou « phytoplancton marin ») est également d'une importance majeure dans la production d'oxygène : il stocke dans les océans plus du tiers des émissions de gaz carbonique produit sur la planète, et restitue plus d'oxygène que l'ensemble des plantes terrestres, y compris celles des forêts tropicales et de l'immense taïga située dans l'hémisphère nord. Pourtant, nous constatons depuis quarante ans une baisse importante de l'activité planctonique dans de vastes régions océaniques tropicales (Boyce, Lewis & Worm 2010), avec pour conséquence un déficit en capacité de stockage du carbone qui se compte en plusieurs centaines de millions de tonnes par année. Cette carence a un effet notoire sur le dérèglement du climat. C'est l'un des signes les plus probants du début de la crise induite par l'extinction massive que nous vivons aujourd'hui, puisqu'il peut déséquilibrer les cycles biologiques marins.

Épilogue

La Grande Oxydation a finalement amené le monde vivant (à l'exception de quelques systèmes fermés en milieu marin) à adopter une nouvelle forme de fonctionnement qui place aujourd'hui l'oxygène au centre des cycles biologiques qui nous maintiennent en vie. Une « adoption » conclue il y a 800 millions d'années, lorsque le taux d'oxygène atmosphérique, stable depuis près d'un milliard d'années, recommence à croître après l'intense nouvelle glaciation du Cryogénien (–720 à –645 millions d'années) qui précède l'Édiacarien (–635 à –541 Ma) (Canfield *et al.* 2013). La hausse du taux d'oxygène atmosphérique aurait été particulièrement importante dès l'extension des plantes terrestres au Dévonien (–416 à –359 Ma), pour atteindre un maximum probable de 30 % durant le Carbonifère (–359 à –299 Ma). Ce taux aurait ensuite connu une chute spectaculaire jusqu'à moins de 15 % durant le Permien (–299 à –252 Ma), aurait oscillé entre 12 et 20 % au Trias (–252 à –201 Ma) et Jurassique (–201 à –154 Ma), puis serait remonté à 25 % durant le Crétacé (–145 à –65 Ma) avant de redescendre et se stabiliser à environ 21 % depuis quelques millions d'années (Holland 2006).

L'air que nous respirons aujourd'hui est donc une conséquence directe de cette très ancienne et longue révolution, ainsi que le fait que nous soyons là pour le respirer.

Bibliographie

- Aragno M. (2023). De l'origine de la vie : sur Terre ou dans l'espace ? In Mulhauser B. *et al.* La collection paléontologique de microbialithes. *Trésors des collections du Jardin botanique de Neuchâtel* 5 : 11-19.
- Bandaranayake W. M. & A. Des Rocher (1999). Role of secondary metabolites and pigments in the epidermal tissues, ripe ovaries, viscera, gut contents and diet of the sea cucumber *Holothuria atra*. *Marine Biology* 133 : 163-169.
- Bengtson S., T. Sallstedt, V. Belivanova & M. Whitehouse (2017). Three-dimensional preservation of cellular and subcellular structures suggests 1.6 billion-year-old crown-group red algae. *PLOS Biology* 15(3) : e2000735. doi.org/10.1371/journal.pbio.2000735 (consulté le 30.01.2024).
- Bhatia S., A. Garg, K. Sharma, S. Kumar, A. Sharma & A. P. Purohit (2011). Mycosporine and mycosporine-like amino acids: a paramount tool against ultra violet irradiation. *Pharmacogn. Rev.* 5(10) : 138-146.
- Blankenship R. E. (2002). *Molecular mechanisms of Photosynthesis*, Blackwell Science Ltd.
- Boyce D. G., M. R. Lewis & B. Worm (2010). Global phytoplankton decline over the past century. *Nature* 466(9) : 591-596.
- Canfield D. E., L. Ngombi-Pemba, E. U. Hammarlund, S. Bengtson, M. Chaussidon, F. Gauthier-Lafaye, A. Meunier, A. Riboulleau, C. Rollion-Bard, O. Rouxel, D. Asael, A.-C. Pierson-Wickmann & A. El Albani (2013). Oxygen dynamics in the aftermath of the Great Oxidation of the Earth's atmosphere. *PNAS USA* 110(42) : 16736-16741.
- Cha S.-H., C.-I. Ko, D. Kim & Y.-J. Jeon (2012). Protective effects of phlorotannins against ultraviolet B radiation in zebrafish (*Danio rerio*). *Veterinary Dermatology* 23(1) : 51-56.
- De Reviers B. (2002). *Biologie et phylogénie des algues*, vol. 1. Belin, Paris.
- Eberhard S., G. Finazzi & F. A. Wollman (2008). The dynamics of photosynthesis. *Annual Review of Genetics* 13 : 283-296.
- Fong W. & K. H. Mann (1980). Role of gut flora in the transfer of amino acids through a marine food chain. *Can. J. Fisheries and Aquatic Sciences* 37(1) : 88-96.
- Han T. M. & B. Runnegar (1992). Megascopic eukaryotic algae from the 2.1-billion-year-old neogaeon iron-formation, Michigan. *Science* 257(5067) : 232-235.
- Henderson M. A. (2010). A morphological and geochemical investigation of grypania spiralis: implications for early Earth evolution. *Master's Thesis, University of Tennessee*. trace.tennessee.edu/utk_gradthes/715 (consulté le 30.01.2024).
- Holland H. D. (2006). The oxygenation of the atmosphere and oceans. *Philosophical Transactions of the Royal Society: Biological Sciences* 361 (1470) : 903-915.
- Kopp R. E., J. L. Kirschvink, I. A. Hilburn & C. Z. Nash (2005). The Paleoproterozoic snowball Earth: a climate disaster triggered by the evolution of oxygenic photosynthesis. *PNAS USA* 102(32) : 11131-11136.
- Margulis L. (1981). *Symbiosis in Cell Evolution*. Freeman and co, San Francisco.
- Martin W. & M. Mentel (2010). The Origin of Mitochondria. *Nature Education* 3(9) : 58.
- Martin W. F. & M. Müller (1998). The hydrogen hypothesis for the first eukaryote. *Nature* 392(6671) : 37-41.
- Martin W. F., S. Garg & V. Zimorski (2015). Endosymbiotic theories for eukaryote origin. *Philosophical Transactions of the Royal Society: Biological Sciences* 370(1678) : 20140330.

- Mazliak P. (2009). *L'évolution chez les végétaux. Des bactéries aux arbres et aux plantes à fleurs*. Vuibert. ADAPT-SNES.
- McFadden G. I. (2014) Origin and evolution of plastids and photosynthesis in eukaryotes. *Cold Spring Harb. Perspect. Biol.* 6(4) : a016105.
- Meyerowitz E. M. (2002). Plants compared to animals: the broadest comparative study of development. *Science* 295(5559) : 1482-1485.
- Pittis A. A. & T. Gabaldón (2016). Late acquisition of mitochondria by a host with chimaeric prokaryotic ancestry. *Nature* 531(7592) : 101-104.
- Shick J. M., W. C. Dunlap, B. E. Chalker, A. T. Banaszak & T. K. Rosenzweig (1992). Survey of ultraviolet radiation-absorbing mycosporine-like amino acids in organs of coral reef holothuroids. *Marine Ecology Progress Series* 90(2) : 139-148.
- Soo R. M., J. Hemp, D. H. Parks, W. W. Fischer & P. Hugenholtz (2017). On the origins of oxygenic photosynthesis and aerobic respiration in Cyanobacteria. *Science* 355(6332) : 1436-1440.
- Törnroth-Horsefield S. & R. Neutze (2008). Opening and closing the metabolite gate. *PNAS USA* 105(50) : 19565-19566.

6 | Extinctions, action, réaction

À l'heure où une partie de l'humanité vit dans l'angoisse d'un changement radical de son mode de vie en lien avec le dérèglement climatique qu'elle a induit par une utilisation inconsidérée des ressources de sa planète, il est possible de distinguer trois points de vue sur les changements climatiques observés et leurs conséquences. Celui des négationnistes est de prétendre que les activités de l'*Homo Sapiens* n'y sont pour rien dans l'évolution du climat. La vision des catastrophistes est de dire que la fin du monde sera pour bientôt. Celle des réalistes, enfin, est de considérer que l'espèce humaine précipite sa perte, mais que la Vie lui survivra. La lecture de l'histoire paléontologique de la Terre rend cette troisième version plus probable. Cinq extinctions massives d'espèces ont eu lieu durant ce dernier demi-milliard d'années, mais toutes ont permis à de nouveaux groupes d'organismes de voir le jour. En réponse à de nouvelles conditions environnementales, le monde vivant a poursuivi son mouvement évolutif, développant de nouveaux liens tout comme elle a pu le faire lors de la Grande Oxydation. Il est particulièrement instructif de suivre l'histoire du vivant en se focalisant sur les événements les plus spectaculaires que sont les extinctions et en décrivant ce qu'il se passe à la suite de l'effondrement de la diversité biologique. Chacun de ces épisodes induit un bouleversement d'un ou plusieurs cycles biologiques.

L'extinction de la fin de l'Édiacarien

À la suite de la Grande Oxydation, faune, flore et fonge aquatiques se sont développées durant plus d'un milliard d'années dans un état d'équilibre suffisant pour que des êtres de plus en plus complexes évoluent. Cet équilibre a toutefois été rompu par des épisodes d'extinction comme ce fut le cas à la fin du Précambrien (il y a 541 millions d'années) lorsqu'une biocénose énigmatique, nommée « faune d'Édiacara »¹⁷, a disparu (Narbonne 1998). Ses restes fossiles se présentent le plus souvent sous forme d'empreintes géométriques sub-sphériques au centre desquelles partent souvent des marques radiales régulièrement espacées. Le terme « faune » est un peu abusif, car les premières analyses convaincantes récentes n'ont pas encore réussi à classer la plupart de ces créatures à téguments mous (voir ci-dessous). En revanche, leur exceptionnelle fossilisation a pu être expliquée : le maintien d'empreintes de tissus sans parties dures a été possible grâce à un recouvrement rapide de particules fines (cendres, argiles) agglomérées par des substances collantes produites par des bactéries (Runnegar & Fedonkin 1992). Plus de vingt-cinq sites de l'Édiacarien¹⁸ sont éparpillés à travers le monde. En comparant ces sites, les paléontologues ont identifié trois assemblages de fossiles, baptisés chacun du nom de l'un des lieux de leur découverte. Celui d'Avalon (Canada) est composé essentiellement d'organismes rangéomorphes¹⁹ dont on pense qu'ils étaient des « animaux » filtreurs se nourrissant de matière organique en suspension (Clapham, Narbonne & Gehling 2003). L'assemblage de Nama (Namibie) caractérise des individus peut-être fouisseurs, vivant dans des zones sablonneuses marines à l'embouchure de rivières, en bordure de deltas (Grazhdankin 2004). Enfin celui d'Édiacara (Australie), s'il suggère aussi une biocénose vivant à l'embouchure de rivières, reste encore très énigmatique car les fossiles sont préservés sous forme d'empreintes délicates à interpréter (Erwin 2008).

Le site de la mer Blanche (Russie) retient plus particulièrement l'attention car les trois assemblages y sont présents, mettant en exergue l'interdépendance des trois écosystèmes. De plus, une partie du mystère de

¹⁷ *Ediacara's biota* en anglais.

¹⁸ L'Édiacarien est la dernière période du Protérozoïque, s'écoulant entre -635 et -541 millions d'années.

¹⁹ Rangéomorphes : clade d'organisme en forme de plumes ou de feuilles ayant vécu durant l'Édiacarien.

la « faune d'Édiacara » a pu y être levée grâce à l'emploi de biomarqueurs, soit des molécules organiques piégées depuis 550 millions d'années dans les sédiments fossilisés de curieuses formes rondes, que de nombreux paléontologues avaient pris pour des méduses. En réalité, la présence de molécules d'hopane²⁰ et d'autres alcanes²¹ révèle une activité organique semblable à celle de cyanobactéries benthiques (Bobrovskiy *et al.* 2018b). De surcroît, cette substance prélevée à proximité des colonies de bactéries est bien différente des molécules lipidiques de type cholestérol, trouvées près de fossiles du genre *Dickinsonia*. Concernant ce dernier, là aussi grâce aux biomarqueurs, les paléontologues ont pu confirmer que l'empreinte fossilisée était celle d'un animal qu'ils ont proposé de classer dans le clade des *Petalonamae* (Bobrovskiy *et al.* 2018a; Hoyal Cuthill & Han 2018); il s'agit donc de la plus ancienne évidence d'un organisme multicellulaire hétérotrophe, si l'on excepte les gaboniontes, représentants de l'énigmatique groupe fossile des *Gabonionta*, vieux de 2,1 milliards d'années (El Albani *et al.* 2019).

Le développement de la biocénose d'Édiacara semble se faire à la fin d'une période glaciaire particulièrement intense, provoquée par la dislocation du supercontinent Rodinia et l'ouverture de nouveaux océans dans lesquels une quantité très importante de dioxyde de carbone s'était retrouvée piégée, interrompue par l'effet de serre causé par l'émission massive de gaz carbonique et de méthane de l'activité volcanique liée à la fracturation de la masse continentale. Les conditions climatologiques ont alors rapidement changé, marquées par une augmentation significative de l'oxygène atmosphérique (Canfield, Poulton & Narbonne 2007), touchant également les masses océaniques (Fike *et al.* 2006). À la suite de cette débâcle, le niveau de la mer s'est élevé, contribuant semble-t-il à la diminution de ressources alimentaires et à un changement drastique des formes de vie (Brasier 1992); la plupart des espèces ont alors disparu.

De l'extinction du Cambrien-Ordovicien à la conquête du milieu terrestre

Il y a moins d'un demi-milliard d'années, nous arrivons à un élément clé de l'histoire du vivant : la conquête du milieu terrestre. Elle s'est

²⁰ Hydrocarbure pentacyclique formée de carbone et d'hydrogène dont la formule est $C_{30}H_{52}$. Ce composé organique joue un rôle important dans la composition des membranes de nombreuses bactéries.

²¹ Longue chaîne d'hydrocarbures composée de carbone et d'hydrogène.

jouée entre deux périodes de refroidissement intense ; celle de la fin du Cambrien, il y a 485 millions d'années, et celle du passage de l'Ordovicien au Silurien, il y a 445 millions d'années, durant laquelle 85 % des espèces animales se sont éteintes (Servais *et al.* 2010). Des glaciations qui ont eu pour conséquence un abaissement du niveau de la mer, mais également une plus faible circulation des eaux, entraînant un manque d'oxygène disponible pour la respiration des organismes aquatiques (Munneke *et al.* 2010). C'est à cette époque qu'a débuté la colonisation des roches continentales émergées par les eucaryotes photosynthétiques de la lignée verte (Mulhauser & Tritz 2016). Coïncidence ou nécessité ? Il est difficile de trancher, mais des faits marquants, retrouvés dans les dépôts sédimentaires de cette période, donnent à penser que les événements sont liés. Dans les roches ordoviciennes étudiées, la présence en grand nombre d'isotopes d'azote ainsi que de porphyrines (molécules entrant dans la composition des chlorophylles, donc jouant un rôle majeur dans la photosynthèse), prouve l'accumulation massive de cellules végétales mortes provenant des algues marines. De plus, le taux d'accumulation n'est pas resté stable, mais a augmenté rapidement au fil des quelques millions d'années de glaciation. Le fait que les tissus de ces cellules végétales se soient déposés rapidement au fond de la mer plutôt que d'être décomposés et recyclés reste encore une énigme pour les scientifiques. Toutefois, une chose est mathématiquement claire : cette non-décomposition d'un nombre gigantesque d'algues a induit une séquestration du carbone sans précédent. Le modèle proposé par les auteurs de l'étude émet l'hypothèse que la production de CO₂, l'un des principaux gaz à effet de serre, a chuté de moitié sur l'ensemble du globe, entraînant une baisse des températures suffisante pour amorcer une glaciation à vaste échelle (Lenton *et al.* 2012 ; Shen *et al.* 2018).

La création de calottes glaciaires a toujours été accompagnée d'une baisse importante du niveau des mers. À l'Ordovicien, les organismes des bordures littorales, notamment des estrans, se sont retrouvés emprisonnés dans des îlots d'eau dont la surface allait diminuant. Leur unique chance de survie a été de se contenter de la terre ferme et du régime des précipitations. Pour y parvenir, une symbiose entre deux organismes aquatiques, une algue et un champignon, s'est avérée indispensable. Le défi était grand. Il faut en effet se rappeler qu'il y a plus de 450 millions d'années, le sol n'existait pas et que la « Vie terrestre émergée » se résumait à des biofilms de fines pellicules de bactéries.

Autotrophes, les algues utilisent, par photosynthèse, l'énergie de la lumière pour former de la biomasse à partir du gaz carbonique. Dès lors, une fois sur la roche, comment résister au dessèchement de leurs tissus par évaporation, dans un environnement uniquement aérien et sur un socle minéral nu ? À ces contraintes s'ajoutent celles d'un milieu pauvre en éléments nutritifs, bombardé par les rayons ultraviolets et présentant des écarts de températures sévères. Pour l'algue, la seule manière de faire face à ces problèmes semble d'avoir recherché la protection de champignons aquatiques, qui ont entouré l'organisme photosynthétique, un peu à la manière des lichens.

Nous l'avons déjà vu dans le chapitre 3 « Symbioses », l'avantage du champignon est aussi de pouvoir excréter des substances qui solubilisent les minéraux contenus dans la roche, et ainsi d'accéder à des éléments précieux tels que le calcium ou le phosphore. Dans des fossiles extrêmement bien conservés de psilophytes du Dévonien, on a retrouvé le même type d'association entre les glomérromycètes et les premières plantes terrestres connues (Berbee & Taylor 2007). Cette exceptionnelle fossilisation a permis de situer l'apparition de telles symbioses à une date antérieure à -410 millions d'années. En définitive, plus que le témoin d'une étape cruciale, la symbiose entre l'algue et le champignon a été une association décisive et obligatoire pour conquérir le milieu terrestre. Les psilophytes d'aujourd'hui – classés dans la division des fougères (PPG 2016) – sont les témoins survivants, avec les lichens et les cyanolichens (association de champignons et de cyanobactéries), de la conquête des terres à l'ère primaire.

Dès l'instant où des êtres autotrophes (les algues), alliés à des mineurs de roches hétérotrophes (les champignons), ont pu s'installer en dehors des eaux, ils ont mis en place des conditions favorables à la création des sols. Grâce à cette interface entre l'air et la roche-mère, de nouveaux cycles d'éléments – azote, carbone, phosphore – ont été générés à la surface des continents, permettant une plus large distribution de la Vie. Les animaux ont suivi, complétant ainsi la balance respiratoire des organismes multicellulaires.

De l'extinction du Dévonien à l'apparition des arbres

Bien que différente par les processus mis en jeu, l'extinction du Dévonien qui s'est déroulée en trois étapes successives entre -383 et -359 millions d'années présente également l'équilibre délicat qui existe entre les

conditions abiotiques et l'activité photosynthétique des végétaux. Cet événement a touché essentiellement la vie marine avec la disparition de trois quarts des espèces, surtout dans les zones peu profondes sensibles aux variations du niveau de l'eau (Algeo, Scheckler & Maynard 2001; Bond & Wignalla 2008). Pourtant, il semble qu'il ait existé une corrélation étroite avec le développement massif de la végétation sur les terres émergées. La présence d'argiles noires dans les sédiments coïncide avec les trois pics d'extinction notifiés en 20 millions d'années. Ces résidus fossiles très riches en matière organique témoignent d'une accumulation de débris végétaux anormalement supérieure à la moyenne. Ce serait en lien avec un développement important des plantes sur la terre ferme qui, après avoir mis en place un système vasculaire et des tissus de soutien tels que le bois, ont pu s'enraciner et se développer en hauteur. Par exemple, le genre *Archeopteris* – premier arbre certifié (c'est-à-dire montrant dans ses tissus fossilisés un agencement de cellules identique à celui du bois) – est un progymnosperme apparu au Dévonien moyen et qui pouvait mesurer 40 m de hauteur (Beck & Wight 1988). Son système racinaire, accompagné sans doute de champignons facilitant les transferts de nutriments, a induit la création de sols plus profonds et riches en matière organique. Toutefois, une grande partie de cette matière encore mal stabilisée a été emportée par les eaux lors d'événements érosifs conséquents. L'apport de débris organiques a enrichi les eaux marines superficielles, favorisant la prolifération d'algues ayant contribué à l'intoxication du milieu (Algeo, Scheckler & Maynard 2001). Ce scénario ne semble toutefois pas s'être répété au Carbonifère, période qui a vu le développement de grandes étendues de fougères et de prêles géantes sans extinction. La mer aurait-elle appris à digérer cet apport de carbone emporté par les fleuves, ou bien l'hypothèse explicative de l'extinction de masse du Dévonien serait-elle à revoir ?

Des extinctions du Permien et du Trias à la naissance puis à l'expansion des plantes à fleurs

L'extinction suivante, celle du Permien, a lieu il y a 252 millions d'années, à la suite d'un réchauffement massif durant 5 millions d'années, lié à l'activité d'un gigantesque volcan en Sibérie (Sun, Joachimski & Wignall 2012). Les paléontologues estiment que lors de cet événement du Protérozoïque, 95 % des espèces animales et végétales marines et

70 % des espèces terrestres auraient disparu, ce qui en fait l'extinction la plus notable de toutes, marquant la fin de l'ère primaire.

Cette catastrophe planétaire serait due à une multiplicité de facteurs, dont l'événement central semble être la migration des plaques continentales qui se sont rassemblées en un seul supercontinent, la « Pangée », aboutissant de fait à la régression des plateaux continentaux de faible profondeur où vivait une grande diversité d'organismes marins. Les courants du super-océan Téthys se sont réorganisés en fonction de l'unique continent, changeant considérablement le climat. Les terres émergées sont devenues plus arides, ce d'autant plus qu'une activité volcanique de grande envergure (trapps de Sibérie), provoquée par l'affaissement des dorsales océaniques, a surchauffé l'atmosphère. Des laves basaltiques marines, s'épanchant en énormes coulées, ont libéré de grandes quantités de dioxyde de carbone, provoquant une anoxie (disparition de l'oxygène) des eaux (Clarkson *et al.* 2015). Toujours en lien avec les éruptions volcaniques, une quantité substantielle de sulfure d'hydrogène s'est diffusée dans l'atmosphère, amincissant la couche d'ozone qui protège les êtres vivants du rayonnement solaire ultraviolet.

La conséquence majeure du changement de la chimie des eaux a été la régression des algues et des bactéries pratiquant la photosynthèse oxygénique au profit de microbes bien plus anciens tels que les bactéries sulfato-réductrices, les bactéries ferri-réductrices et surtout les archées. Ces dernières sont des procaryotes (cellule sans noyau) qui diffèrent des bactéries par des éléments caractéristiques fondamentaux de leur métabolisme. Ce sont notamment les seuls organismes capables de produire du méthane à partir de différents composés carbonés en lieu et place de l'oxygène. Or, la particularité du moment a été l'utilisation du nickel, produit par le volcanisme, comme catalyseur de la méthanogenèse par une archée nommée *Methanosarcina* (Rothman *et al.* 2014). On sait également que *Methanosarcina* est le seul genre d'archées qui puisse réaliser les trois voies hydrogénotrophe, méthylotrophe et acétotrophe de la méthanogenèse (Liu & Whitman 2008).

Si, dans les eaux, ce bouleversement chimique a été à l'origine de l'effondrement des espèces, le réchauffement excessif des terres émergées a engendré lui aussi une chute spectaculaire de la Vie. Une étude réalisée sur la teneur en isotope d'oxygène de plus de 15 000 fossiles a conclu à l'hypothèse d'un réchauffement extrême durant 5 millions d'années, avec des températures à l'équateur pouvant atteindre 40° C

à la surface de l'eau et 50 à 60 °C sur le continent (Sun, Joachimski & Wignall 2012).

À la suite de cette extinction, de nouvelles formes vivantes apparaissent et de nouveaux liens se tissent. La relation équivoque du couple plante-pollinisateur pourrait être une conséquence de ce bouleversement. Si on est bien au clair sur le pourquoi des fleurs, le quand et le comment font toutefois encore l'objet de débats intenses parmi les paléobotanistes. L'origine des angiospermes (ou « plantes à fleurs ») n'est, de loin, pas résolue. Les dates d'apparition du groupe, en lien avec l'existence supposée de leur lignée d'origine (fougères à graines, progymnospermes ou gymnospermes?) sont encore hypothétiques. La plus ancienne date proposée se situe il y a 250 millions d'années (Hochuli & Feist-Burkhardt 2013), soit juste après l'extinction massive de la fin du Permien. Un autre scénario, contemporain à cette première hypothèse, met en scène des fossiles de gigantoptérides (des gymnospermes disparus lors de cet événement) dans lesquels on a retrouvé de l'oléane, un métabolite caractéristique des angiospermes (Taylor *et al.* 2006). Une autre proposition place l'apparition des plantes à fleurs entre -198 et -178 millions d'années (Foster & Ho 2017), soit juste après l'extinction qui a eu lieu à la fin du Trias, il y a 200 millions d'années. Cet épisode pourrait être lié à un événement que j'ai déjà évoqué, la fracturation de la Pangée et des éruptions volcaniques massives qui en résultent (Whiteside *et al.* 2011). Plus de 20 % des animaux marins et une grande proportion des animaux terrestres disparaissent. Enfin, la date la plus prudente situe l'émergence du groupe il y a 160 millions d'années (Adams 2013).

En revanche, la communauté scientifique s'accorde à placer le début de l'expansion des plantes à fleurs il y a 140 millions d'années, durant le Jurassique, avec une accélération au milieu du Crétacé, il y a 100 millions d'années (Moore *et al.* 2007). Celles-ci ont déployé des trésors d'ingéniosité pour que leur descendance ne soit pas livrée au seul caprice du vent, mais que graines et pollens puissent être transportés par les animaux qu'elles attirent par des récompenses substantielles.

L'origine des plantes à fleurs est « rapidement » liée à un développement mutualiste en compagnie de certaines mouches, guêpes ou papillons émergeant au Crétacé. Dans bien des cas, l'épopée de la coévolution entre les végétaux et leurs pollinisateurs a abouti clairement à une symbiose, mêlant parfums, nectars et pollens. Il est passionnant de noter que l'évolution de la structure des fleurs est concomitante

avec celle des pièces buccales des insectes dont la tendance va être la formation d'un proboscide²², puis son allongement. Les premiers insectes à long proboscide seraient peut-être des mouches du groupe des nemestrinoidés vivant au Jurassique supérieur, soit au début de l'expansion des plantes à fleurs. Toutefois, la relation n'est pas clairement établie car ces insectes pourraient aussi avoir été spécialisés dans la récolte du pollen de groupes de plantes parallèles, les gnétales ou les bennettitales (Crane 1996; Peñalver *et al.* 2015). S'il existe, au début du Crétacé, des groupes marquant une préférence pour l'anthophilie (visite des fleurs), tels que des guêpes solitaires (*Masarinæ*) ou des papillons à trompe (glossates), les fleurs restent petites et peu différenciées. Ce n'est qu'au Crétacé supérieur, il y a 100 millions d'années, que s'observe une diversification des familles de plantes à fleurs entomophiles (Crepet 1996). Fait marquant, la plupart des insectes actuels descendants de ces familles ont leur optimum écologique dans des régions semi-arides où la végétation, de type méditerranéen, est dominée par des buissons et des plantes couchées aromatiques. Le scénario le plus probable sur lequel s'accordent les paléobotanistes est une diversification et une spécialisation de nombreuses familles d'angiospermes durant la période sèche du Crétacé (Taylor & Hickey 1992; Grimaldi 1999). Comme à cette époque les végétaux ont dû lutter contre des insectes phytophages, ils ont développé des substances aromatiques complexes pour s'en protéger (Rasman 2023; Mulhauser 2023). Parallèlement, ils ont perfectionné l'attractivité de leurs fleurs auprès de pollinisateurs de plus en plus spécialisés afin de faciliter leur reproduction. Couleurs des pétales et parfum ont alors été conçus pour indiquer la source de nourriture; celle-ci étant composée de nectar sucré caché au fond de la fleur, cela a dès lors obligé les insectes à entrer en contact avec les étamines et le pistil, les pièces reproductrices de la plante.

Donner à manger à des insectes pour éviter que d'autres insectes ne vous mangent: cela semble paradoxal. Toutefois, il ne faut pas oublier que le feuillage est le centre d'une activité photosynthétique vitale pour la plante. Outre son rôle dans la reproduction sexuée, l'émergence de la fleur pourrait donc avoir été un dérivatif malin, une source de nourriture (nectar) pour des insectes sociaux tels que des fourmis

²² Rassemblement des pièces buccales en une « trompe », comme on peut l'observer chez les abeilles ou les papillons.

qui vont établir une protection plus efficace du feuillage de la plante. Néanmoins, plusieurs insectes sont devenus hautement spécialisés, nourrissant leurs larves avec le pollen d'une seule espèce végétale. La relation est alors devenue obligatoire, conduisant à l'apparition d'une symbiose par échanges mutuels.

Ces quelques épisodes d'extinctions, documentés de plus en plus précisément, montrent qu'à la suite de tels événements, la Vie a toujours su s'adapter ; des associations d'espèces inconnues jusqu'alors ont ainsi émergé progressivement. Aux yeux de très nombreux scientifiques, il ne fait aucun doute que, depuis environ deux siècles, *Homo Sapiens* provoque le début d'une nouvelle extinction, potentiellement massive, du fait de l'impact de ses activités économiques et de son expansion. Nous avons pourtant les moyens de stopper ce phénomène car nous connaissons toutes les solutions qui s'imposent, même si notre inertie est telle que plusieurs générations d'humains devront sans doute œuvrer avant que la situation puisse se stabiliser. Rappelons toutefois que le dérèglement climatique est la conséquence de causes plus dramatiques encore, parmi lesquelles la disparition de la Vie dans les sols et les eaux. Pour lutter contre cette menace, gardons à l'esprit les liens indéfectibles qui unissent tous les êtres vivants et prenons conscience qu'ils sont l'aboutissement de la longue et passionnante évolution d'un tout dont nous ne sommes que l'expression particulière.

Bibliographie

- Adams K. *et al.* (2013). Genomic clues to the ancestral flowering plant. *Science* 342(6165) : 1456-1457.
- Algeo T. J., S. E. Scheckler & J. B. Maynard (2001). Effects of the middle to late devonian spread of vascular land plants on weathering regimes, marine biota, and global climate. In P. G. Gensel & D. Edwards (éd.) (2001). *Plants Invade the Land: Evolutionary and Environmental Approaches*. Columbia University Press, New York : 213-236.
- Beck C. B. & D. C. Wight (1988). Progymnosperms. In C. B. Beck (1988). *Origin and Evolution of Gymnosperms*. Columbia University Press, New York : 57-61.
- Berbee M. L. & J. W. Taylor (2007). Rhynie chert: a window into a lost world of complex plant-fungus interactions. *New Phytologist* 174(3) : 475-479.
- Bobrovskiy I., J. M. Hope, A. Ivantsov, B. J. Nettersheim, C. Hallmann & J. J. Brocks (2018a) Ancient steroids establish the Ediacaran fossil Dickinsonia as one of the earliest animals. *Science* 361(6408) : 1246-1249.
- Bobrovskiy I., J. M. Hope, A. Krasnova, A. Ivantsov & J. J. Brocks (2018b). Molecular fossils from organically preserved Ediacara biota reveal cyanobacterial origin for *Beltanelliformis*, *Nature Ecology & Evolution* 2 : 437-440.
- Bond D. P. G. & P. B. Wignalla (2008). The role of sea-level change and marine anoxia

- in the Frasnian-Famennian (Late Devonian) mass extinction. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 263(3-4): 107-118.
- Brasier M. (1992). Global ocean-atmosphere change across the Precambrian—Cambrian transition. *Geological Magazine* 129(2), 161-168.
- Canfield D. E., S. W. Poulton & G. M. Narbonne (2007). Late-Neoproterozoic deep-ocean oxygenation and the rise of animal life. *Science* 315(5808): 92-95.
- Clapham M. E., G. M. Narbonne & J. G. Gehling (2003). Paleoeecology of the oldest known animal communities: ediacaran assemblages at mistaken point, newfoundland. *Paleobiology* 29(4): 527-544.
- Clarkson M. O., S. A. Kasemann, R. A. Wood, T. M. Lenton, S. J. Daines, S. Richoz, F. Ohnemüller, A. Meixner, S. W. Poulton & E. T. Tipper (2015). Ocean acidification and the Permo-Triassic mass extinction. *Science* 348(6231): 229-232.
- Crane P. R. (1996). The fossil history of the Gnetales. *Int. J. Pl. Sci.* 157(suppl.): S50-S57.
- Crepet W. L. (1996). Timing in the evolution of derived floral characters: upper Cretaceous (Turonian) taxa with tricolpate and tricolpate-derived pollen. *Rev. Palaeobot. Palynol.* 90(3/4): 339-359.
- El Albani A. *et al.* (2019). Organism motility in an oxygenated shallow-marine environment 2.1 billion years ago. *PNAS USA* 116(11): e1-e6.
- Erwin D. H. (2008). Wonderful Ediacarans, wonderful Cnidarians? *Evolution & Development* 10(3): 263-264.
- Fike D. A., J. P. Grotzinger, L. M. Pratt & R. E. Summons (2006). Oxidation of the Ediacaran ocean. *Nature* 444 (7120): 744-747.
- Foster C. S. P. & S. Y. W. Ho (2017) Strategies for partitioning clock models in phylogenomic dating: application to the angiosperm evolutionary timescale. *Genome Biol. Evol.* 9(10): 2752-2763.
- Grazhdankin D. (2004). Patterns of distribution in the Ediacaran biotas: facies versus biogeography and evolution. *Paleobiology* 30(2): 203-221.
- Grimaldi D. (1999). The co-radiations of pollinating insects and angiosperms in the Cretaceous. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 86: 373-406.
- Hochuli P. A. & S. Feist-Burkhardt (2013). Angiosperm-like pollen and Afropollis from the Middle Triassic (Anisian) of the Germanic Basin (Northern Switzerland). *Front. Plant Sci.* 4: 344.
- Hoyal Cuthill J. F. & J. Han (2018). Cambrian petalonamid Stromatoveris phylogenetically links Ediacaran biota to later animals. *Palaeontology* 61(6): 813-823.
- Lenton T. M., M. Crouch, M. Johnson, N. Pires & L. Dolan (2012). First plants cooled the Ordovician. *Nature Geoscience* 5: 86-89.
- Liu Y. & W. B. Whitman (2008). Metabolic, phylogenetic, and ecological diversity of the methanogenic Archaea. *Ann NY Acad Sci* 1125(1): 171-189.
- Moore M. J., C. D. Bell, P. S. Soltis & D. E. Soltis, (2007). Using plastid genome-scale data to resolve enigmatic relationships among basal angiosperms. *PNAS USA* 104(49): 19363-19368.
- Mulhauser B. & J. Tritz (2016). *Le Jardin de l'évolution. Histoire de la lignée verte*. Éd. Jardin botanique de Neuchâtel.
- Mulhauser B. (2023). De la plante productrice à l'animal réceptif. Un flux continu de principes actifs. In Mulhauser B. (dir.). *Plantes soignantes. Entre pouvoirs et partages*. Épistémé, Lausanne: 49-66.
- Munneke A., M. Calner, D. A. T. Harper & T. Servais (2010). Ordovician and Silurian sea-water chemistry, sea level and climate. A synopsis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 296(3-4): 389-413.

- Narbonne G. M. (1998). The Ediacara biota: a terminal Neoproterozoic experiment in the evolution of life. *GSA Today* 8(2): 1-6.
- Peñalver E., A. Arillo, R. Pérez-de-la Fuente, M. L. Riccio, X. Delclòs, E. Barrón & D. A. Grimaldi (2015). Long-Proboscis flies as pollinators of Cretaceous gymnosperms. *Current Biology* 25(14): 1917-1923.
- PPG I (Pteridophytes Phylogeny Group 1) (2016). A community-derived classification for extant lycophytes and ferns. *Jnl of Sytematics Evolution* 54: 563-603.
- Rasmann S. (2023). La raison d'être de la diversité phytochimique. In Mulhauser B. (dir.): *Plantes soignantes. Entre pouvoirs et partages*. Épistémé, Lausanne: 31-47.
- Rothman D. H., G. P. Fournier, K. L. French, E. J. Alm, E. A. Boyle, C. Cao & R. E. Summons (2014). Methanogenic burst in the end-Permian carbon cycle. *PNAS USA* 111 (15): 5462-5467.
- Runnegar B. N. & M. A. Fedonkin (1992). Proterozoic metazoan body fossils. In J. W. Schopf (1992). *The Proterozoic Biosphere*. Cambridge University Press: 369-388.
- Servais T. *et al.* (2010). Understanding the Great ordovician biodiversification event (GOBE). Influences of paleogeography, paleoclimate and paleoecology, *GSA Today* 19(4/5). doi.org/10.1130/GSATG37A.1 (consulté le 30.01.2024).
- Shen J., A. Pearson, G. A. Henkes, Y. G. Zhang, K. Chen, D. Li, S. D. Wankel, S. C. Finney & Y. Shen (2018). Improved efficiency of the biological pump as a trigger for the Late Ordovician glaciation. *Nature Geoscience* 11: 510-514.
- Sun Y., M. M. Joachimski & P. B. Wignall (2012). Lethally hot temperatures during the early Triassic Greenhouse. *Science* 338(6105): 366-370.
- Taylor D. W. & L. J. Hickey (1992). Phylogenetic evidence for the herbaceous origin of angiosperms. *Pl. Syst. Evol.* 180: 137-156.
- Taylor D. W., H. Li, J. Dahl, F. J. Fago, D. Zinniker, D. Moldowan & J. Michael (2006). Biogeochemical evidence for the presence of the angiosperm molecular fossil oleanane in Paleozoic and Mesozoic non-angiospermous fossils. *Paleobiology*. 32(2): 179.
- Whiteside J. H., D. S. Grogan, P. E. Olsen & D. V. Kent (2011). Climatically driven biogeographic provinces of Late Triassic tropical Pangea: *PNAS USA* 108: 8972-8977.

7 | L'humain descend d'un tout

Bien qu'elle débute il y a environ 3,8 milliards d'années avec l'apparition supposée des premiers organismes vivants sur Terre, l'histoire des primates va se préciser à la suite d'une extinction spectaculaire, celle des dinosaures et des ptérosaures, il y a 66 millions d'années, à la fin du Crétacé. De nombreux groupes marins et des familles de végétaux ont également disparu durant cet événement exceptionnel. L'épisode est visible sur le terrain grâce à un dépôt d'argile dont le taux d'iridium, un élément chimique rare, est mille fois plus élevé que celui des couches directement inférieure et supérieure. Cette anomalie, due sans doute à une activité volcanique particulièrement étendue, en relation avec un ou plusieurs impacts de météorites (Renne *et al.* 2015), marque la limite Crétacé-Paléogène (–66 millions d'années), terminant le Mésozoïque (ou «ère secondaire») pour laisser place, dans le système de classification des spécialistes des sciences de la Terre, au Cénozoïque («ères tertiaire» et «quaternaire» confondues).

L'extinction de la fin du Crétacé et ses conséquences

Plus précisément, la phase d'extinction de la fin du Crétacé aurait débuté avec la chute de météorites, dont une en particulier serait tombée à Chicxulub, près des côtes marines du Yucatan au Mexique (De Palma *et al.* 2019). Elle aurait provoqué une onde sismique sans

précédent, puis une ouverture de la croûte terrestre aboutissant à une série d'éruptions volcaniques à des milliers de kilomètres du lieu d'impact. Celles du Deccan (ouest de l'Inde) prennent le relais de ce cataclysme planétaire en crachant 4 millions de km³ de lave s'accumulant sur une superficie de 2 millions de km². Leur épaisseur la plus importante (empilement nommé « Trapps du Deccan ») atteint 2400 m de hauteur. Aux laves s'ajoutent l'expulsion de gaz toxiques tels que le sulfure d'hydrogène (H₂S) et le dioxyde de carbone (CO₂) qui, mélangés au nuage de poussière de l'impact météoritique, vont modifier chimiquement et physiquement l'atmosphère (Renne *et al.* 2015). En effet, les fines particules en suspension dans l'air créèrent un écran qui entrava la lumière du Soleil et diminua par conséquent la capacité de photosynthèse des plantes.

La végétation réagit instantanément à ce changement, en particulier les angiospermes; leur pollen n'est pas retrouvé dans les dépôts géologiques de ce cataclysme, ce qui démontre que les épisodes de floraison ont été pratiquement inexistants (Wolfe & Upchurch 1986), contrairement aux fougères, dont les spores sont toujours traçables dans les sédiments, prouvant une activité reproductive de ces plantes (Tshudy & Tshudy 1986). Ce bouleversement au niveau de la végétation terrestre a eu un impact majeur sur les paysages (Vajda, Raine & Hollis 2001) et la faune qui en dépendait (Wilf & Johnson 2004).

Il en est allé de même des milieux marins, où les espèces photosynthétiques du plancton ont fortement régressé (Pope, D'Hondt & Marshall 1998), voire disparu totalement aux alentours de la zone d'impact de la météorite de Chicxulub (Pospichal 1996). La baisse significative de l'activité photosynthétique ayant eu un impact direct sur les consommateurs primaires (planctoniques ou herbivores), les pyramides alimentaires se sont écroulées par manque de nourriture (Bambach, Knoll & Wang 2004; Pope, D'Hondt & Marshall 1998). Dans les mers, cela a particulièrement impacté les espèces du zooplancton, leurs consommateurs et les carnivores. Sur terre, les principales victimes ont été tous les groupes d'herbivores et de carnivores, notamment les dinosaures et les ptérosaures. Les espèces généralistes s'en sont mieux sorties, surtout les détritivores qui, par voie de conséquence, ont vu la manne nourricière augmenter.

À cette époque, les mammifères et le groupe des dinosaures aviens (duquel descendent toutes les lignées d'oiseaux actuels) étaient suffisamment omnivores pour survivre, ainsi que les crocodiles, les

squamates (lézards et serpents), les amphibiens et de nombreux groupes de poissons. Cependant, sans production primaire de longue durée des végétaux terrestres, ces groupes auraient aussi fini par disparaître, car le fonctionnement des cycles biologiques (autant du carbone que de l'oxygène) ne pouvait continuer sans les êtres photosynthétiques. Le salut est venu de la capacité qu'ont les organismes autotrophes à s'enkyster ou à se protéger de manière durable. Graines, spores, sores, thèques, kystes calcaires ou siliceux ; tous ces moyens ont été utilisés pour protéger la semence durant des années, voire peut-être des décennies avant que les poussières atmosphériques ne se dissipent et que les rayons solaires ne favorisent à nouveau le monde photosynthétique (Bown 2005 ; Fawcett, Maere & Van de Peer 2009).

Dès ce moment, les plantes à fleurs ont pu s'épanouir à nouveau, et des familles particulières ont pris leur essor. Il s'agit notamment des solanacées (dont les tomates, les pommes de terre et le tabac [Wilf *et al.* 2017 ; Rasmann 2023]) qui ont su développer des alcaloïdes puissants pour se protéger de la dent des « nouveaux » herbivores émergeant et se spécialisant durant le Cénozoïque, soit durant les 65 derniers millions d'années. Une autre famille, déjà citée, est apparue au Paléocène, soit après l'épisode d'extinction massive de la fin du Crétacé. Il s'agit des fabacées, dont on connaît l'importance en agriculture grâce à leur symbiose développée avec des bactéries fixatrices d'azote (Lloret & Martinez-Romero 2005 ; Bruneau *et al.* 2008). Enfin, dans cet aperçu beaucoup trop court des innovations végétales « post-apocalyptiques », nous pouvons également citer la famille des graminées (ou « poacées ») qui, bien que se développant au début du Crétacé (on en a retrouvé des traces dans des excréments de dinosaures selon Prasad *et al.* 2005), a connu son développement principal durant le Miocène. Certaines de ces herbes sont sorties des forêts-refuges pour s'établir dans les savanes et les steppes, aboutissant au passage à une variante de la voie photosynthétique de fixation du carbone, nommée « photosynthèse en C_4 », adaptée aux régions chaudes, sèches et pauvres en azote, et que d'autres familles de plantes vont aussi privilégier par la suite (Osborne & Beerling 2006 ; Edwards & Smith 2010).

Faune et flore du Paléogène

L'histoire de l'ordre des primates (et celui des rongeurs qui apparaît au même moment ; Kay & Hoekstra 2008) est intimement liée à l'évolution

de la végétation et donc, par conséquent, à l'épisode d'extinction massive. Au Crétacé déjà, ce groupe de mammifères se serait distingué des toupayes par une lignée de petits animaux insectivores discrets et peut-être nocturnes, vivant une existence parallèle à celle des dinosaures et des ptérosaures (Benton 2010). Au Paléocène, il y a environ 60 millions d'années, le réchauffement du climat permet le développement de forêts sur de très grandes étendues. Dans les couches géologiques de ce type d'environnement, on retrouve des fossiles de plésiadapiformes, un groupe primitif de primates qui s'est adapté au couvert forestier tropical en ayant des globes oculaires dirigés vers l'avant (Mulhauser, Haenni & Dufour 2008). La vision binoculaire, caractéristique majeure des primates, serait née en forêt ! Un museau raccourci et des dents élargies sont d'autres traits importants, marquant le passage d'un régime insectivore à une diète omnivore sous couvert des arbres. À partir de cet instant, deux lignées se sont différenciées : celle des tarsiers, loris et lémurien d'une part et celle des simiens d'autre part. Ces derniers, les « vrais singes », se seraient différenciés il y a 45 millions d'années dans les sylves tropicales d'Asie du Sud-Est. Par la suite, la séparation entre les singes du Nouveau monde et celui de l'Ancien monde aurait eu lieu il y a moins de 40 millions d'années (Chatterjee *et al.* 2009).

Presque tous les primates sont restés inféodés à la sylve tropicale, à l'exception de quelques groupes s'adaptant à des milieux plus ouverts, tels que les babouins dont l'histoire diverge durant le Miocène, il y a environ 15 millions d'années, et quelques hominidés qui ont donné naissance au genre *Homo* il y a moins de 3 millions d'années (Hublin 2015).

Notre histoire se précise. Elle s'inscrit dans celle plus générale des grands singes (Hominoïdes), dont l'apparition date de la fin de l'Oligocène, il y a 25 millions d'années, suivie d'une radiation rapide des espèces au début du Miocène (Begun 2013). Cette période géologique est tout d'abord marquée par un réchauffement régulier et un climat tropical étendu, marquant l'apparition de forêts chaudes et humides dans des limites bien plus septentrionales que maintenant. On note par exemple en Islande l'extension de forêts de bouleaux et de conifères auxquels se mêlent des magnolias, des lauriers et des sassafras (Denk *et al.* 2011). De nombreux types de végétation boisée se développent, augmentant massivement la diversité de la flore, des champignons et des animaux. Des grands singes occupent les forêts de palmiers et de lauriers de la future Europe (Croitor 2018).

Par conséquent, rappelons-nous que le plus important centre de diversification des faunes et flores actuelles est sans conteste le milieu forestier tropical du Miocène inférieur (–23 à –16 millions d'années). Outre le développement important des arbres, des mammifères et des oiseaux, la flore des lianes et des épiphytes (plantes poussant sur un autre support que le sol terrestre, le plus souvent sur des arbres) s'enrichit aussi, développant des alliances complexes avec d'autres organismes symbiotiques, au nombre desquels les champignons à endomycorhizes (voir chapitre 3 «Symbioses»).

Parallèlement au développement de cette flore émerge une riche diversité de pollinisateurs. On peut par exemple relever, il y a 20 millions d'années, la formidable expansion des orchidées épiphytes d'Amérique du Sud (Pérez-Escobar *et al.* 2017), parmi lesquelles nombreuses sont celles qui attirent, grâce à leurs phéromones et à la physionomie de leurs fleurs, des insectes leur étant spécifiquement liés. L'exemple le plus classique est celui du vanillier dont les capsules (nommées communément «gousses») produisent la vanille²³.

Si la fécondation des fleurs du sommet de la canopée est l'affaire des insectes, des oiseaux et de quelques chauves-souris, la dispersion des graines semble plus diversifiée. Le vent (anémochorie) et l'eau (hydrochorie) sont des canaux possibles de diffusion (Puig 2002). De nombreux arbres produisent aussi des fruits lourds qui se contentent, sous l'effet de la pesanteur, de chuter à leur pied (barochorie). Une fois à terre et sous l'effet de la chaleur, leurs chairs vont mûrir en produisant une odeur suave qui va attirer divers mammifères frugivores, au nombre desquels des éléphants, des félins, certaines antilopes et des cochons sauvages, mais aussi les grands singes. Après avoir mangé, cette faune se disperse en digérant. En traversant leur tube digestif riche en microbiote, les graines obtiennent un meilleur pouvoir germinatif et sont expulsées avec les excréments, parfois à des kilomètres de leur plante-mère. Nommée «endozoochorie», cette méthode de dispersion originale se révèle très efficace pour assurer le renouvellement

²³ S'il en existe plus de 100 espèces à travers le monde, seules deux ou trois de ces orchidées sont commercialisées, notamment *Vanilla planifolia*, originaire du Mexique et de l'Amérique centrale et arrivée tardivement en Amérique du Sud (Bouetard *et al.* 2010). Afin de répondre aux demandes des consommateurs, elles sont mises en culture dans la plupart des régions tropicales, mais les cultivateurs sont obligés de pratiquer l'autopollinisation de chaque fleur à la main afin de les féconder, car l'abeille *Euglossa viridissima*, spécialiste naturelle de cette opération, fait totalement défaut dans les régions d'importation (Ecott 2004).

de nombreuses espèces d'arbres. Or, lorsque les grands mammifères font défaut, les fruits pourrissent et la régénération naturelle ne se fait plus, menaçant la survie de leur espèce. On nomme cette menace « syndrome des forêts vides » (Boesch, Grundmann & Mulhauser 2011). Je me permets donc d'insister sur le fait que les primates omnivores, attirés par le sucre des fruits, sont apparus bien après les premières plantes à fleurs, ayant par conséquent développé leurs sens en fonction d'une flore déjà présente qui a su présenter des fruits attirants aux nouveaux venus.

Homo Sapiens

Avec 98,4 % de ses gènes identiques à celui des chimpanzés et des bonobos (Goodmann *et al.* 1998), ses cousins vivants les plus directs, *Homo Sapiens* partage le destin récent des autres représentants de la famille des hominidés que sont les orangs-outans, les chimpanzés et les gorilles, telle que définie par les termes de la classification biologique en vigueur (Boesch, Grundmann & Mulhauser 2011); sans entrer dans le détail, retenons simplement que la lignée hominoïde des grands singes arboricoles s'est subdivisée pour donner naissance à celles des hominidés et des gibbons. Mais ce qui nous distingue nettement de tous les autres hominoïdes, y compris nos cousins hominidés, c'est notre bipédie permanente, suggérant un milieu de spéciation bien différent de celui des forêts.

Dès le milieu du Miocène, le climat devient plus sec. La diminution de l'humidité de l'air va de pair avec une baisse des températures. L'aridification touche l'ensemble du continent africain, berceau du genre *Homo* qui apparaît il y a moins de 3 millions d'années (Hublin 2015; Coppens 2017). Les milieux forestiers stricts laissent place à des zones beaucoup plus ouvertes de savanes. Le Sahara, dont une partie avait été occupée par des forêts quelques millions d'années plus tôt, passe de l'état de savane arborée à celui de savane steppique, avant de devenir le désert que l'on connaît aujourd'hui. La lecture des rares fossiles africains de la seconde moitié du Miocène et l'évolution des paysages tendent à expliquer que la lignée des humains (Brunet & Jaeger 2017), que l'on pourrait aussi nommer « grands singes piétons », serait apparue dans des milieux arborés très ouverts et non pas dans les forêts tropicales, comme c'est strictement le cas pour les orangs-outans et les gibbons, mais sans doute aussi pour les chimpanzés, bonobos et gorilles.

Il nous aura fallu quatre chapitres pour comprendre que l'être humain descend d'un tout. Il a « émergé » de milieux dans lesquels la végétation a développé des alliances indispensables afin de satisfaire aux cycles biologiques : avec des insectes, des oiseaux, des mammifères, mais aussi des champignons et des bactéries du sol. Un sol né il y a moins de 500 millions d'années, à la suite de la conquête du milieu terrestre par des organismes venus des eaux, eux-mêmes issus d'un monde exclusivement unicellulaire peuplé d'archées, de bactéries et de virus, au sein duquel de multiples symbioses successives ont permis l'éclosion de formes multicellulaires, de la respiration et de la photosynthèse.

Pour résumer, nous sommes, de même que les écosystèmes et toutes les espèces vivantes actuels, le résultat remarquable mais temporaire d'un mouvement évolutif inéluctable, fait de crises et de réajustements de la Vie face aux changements de l'environnement. En avoir totalement conscience nous permet de prendre la mesure des menaces que nous faisons peser sur notre milieu de vie, ou plus exactement de « survie », et donc de la nécessité absolue de changer de paradigme...

Bibliographie

- Bambach R. K., A. H. Knoll & S. C. Wang (2004). Origination, extinction, and mass depletions of marine diversity. *Paleobiology* 30(4) : 522-542.
- Begun D. R. (2013). The Miocene hominoid radiations. In Begun D. R. (éd.) (2013). *A Companion to Paleoanthropology*, Oxford, Wiley-Blackwell : 398-415.
- Benton M. J. (2010). The origins of modern biodiversity on land. *Philosophical Transactions of the Royal Society: Biological Sciences* 365 : 3667-3679.
- Boesch C., E. Grundmann & B. Mulhauser (2011). *Manifeste pour les grands singes*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, collection « Le Savoir suisse » 76.
- Bouetard A., P. Lefeuvre, R. Gigant, S. Bory, M. Pignal, P. Besse & M. Grisoni (2010). Evidence of transoceanic dispersion of the genus *Vanilla* based on plastid DNA phylogenetic analysis. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 55(2) : 621-630.
- Bown P. (2005). Selective calcareous nannoplankton survivorship at the Cretaceous-Tertiary boundary. *Geology* 33(8) : 653-656.
- Bruneau A., M. Mercure, G. P. Lewis & P. S. Herendeen (2008). Phylogenetic patterns and diversification in the caesalpinoid legumes. *Canadian Journal of Botany* 86(7) : 697-718.
- Brunet M. & J.-J. Jaeger (2017). De l'origine des anthropoïdes à l'émergence de la famille humaine. *C. R. Palevol* 16 : 189-195.
- Cardinal S. & B. N. Danforth (2011). The antiquity and evolutionary history of social behavior in bees. *PLOS ONE* 6(6) : e21086.
- Chatterjee H. J, S. Y. W. Ho, I. Barnes & C. Groves (2009). Estimating the phylogeny and divergence times of primates using a supermatrix approach. *BMC Evolutionary Biology* 9(259) : e1-e19.

- Coppens Y. (2017). Les derniers préhumains et les premiers humains. *C. R. Palevol* 16: 196-199.
- Croitor R. (2018). Paleobiogeography of early human dispersal in western Eurasia: preliminary results. *C. R. Palevol* 17: 276-286.
- De Palma R. A., J. Smit, D. A. Burnham, K. Kuiper, P. L. Manning, A. Oleinik, P. Larson, F. J. Maurrasse, J. Vellekoop, M. A. Richards, L. Gurche & W. Alvarez (2019). A seismically induced onshore surge deposit at the KPg boundary, North Dakota. *PNAS USA* 116 (17): 8190-8199.
- Denk T., F. Grímsson, R. Zetter & L. A. Símonarson (2011). The classic surtarbrandur floras. In Denk *et al.* Late cainozoic floras of Iceland. 15 million years of vegetation and climate history in the Northern North Atlantic. *Topics in Geobiology* 35: 233-254.
- Ecott T. (2004). *Vanilla. Travels in Search of the Ice Cream Orchid*. Grove Press, New York.
- Edwards E. J. & S. A. Smith (2010). Phylogenetic analyses reveal the shady history of C_4 grasses. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107(6): 2532-253.
- Fawcett J. A., S. Maere & Y. Van de Peer (2009). Plants with double genomes might have had a better chance to survive the Cretaceous-Tertiary extinction event. *PNAS USA* 106(14): 5737-5742.
- Goodmann M., C. A. Porter, J. Czelusniak, S. L. Page, H. Schneider, J. Shoshani, G. Gunnell & C. P. Groves (1998). Toward a phylogenetic classification of Primates based on DNA evidence complemented by fossil evidence. *Mol. Phylogenet. Evol.* 9(3): 585-598.
- Hublin J.-J. (2015). Paleoanthropology: how old is the oldest human? *Current Biology* 25(11): 453-455.
- Kay E. H. & H. E. Hoekstra (2008). Rodents. *Current Biology* 18(10): R406-R410.
- Lloret L. & E. Martínez-Romero (2005). Evolución y filogenia de *Rhizobium*. *Microbiología* 47(1-2): 43-60.
- Mulhauser B., J.-P. Haenni & C. Dufour (2008). *Le propre du singe*. Éd. Muséum d'histoire naturelle de Neuchâtel.
- Osborne C. P. & D. J. Beerling (2006). Nature's green revolution: the remarkable evolutionary rise of C_4 plants. *Philosophical Transactions of the Royal Society: Biological Sciences* 361(1465): 173-194.
- Pérez-Escobar O.-A., G. Chomicki, F. L. Condamine, A. P. Karremans, D. Bogar, N. J. Matzke, D. Silvestro & A. Antonelli (2017). Recent origin and rapid speciation of neotropical orchids in the world's richest plant biodiversity hotspot. *New Phytologist* 215: 891-905.
- Pope K. O., S. L. D'Hondt & C. R. Marshall (1998). Meteorite impact and the mass extinction of species at the Cretaceous/Tertiary boundary. *PNAS USA* 95(19): 11028-11029.
- Pospichal J. J. (1996). Calcareous nannofossils and clastic sediments at the Cretaceous-Tertiary boundary, northeastern Mexico. *Geology* 24(3): 255-258.
- Prasad V., C. A. E. Stroemberg, H. Alimohammadian & A. Sahni (2005). Dinosaur coprolites and the early evolution of grasses and grazers. *Science* 310(5751): 1177-1180.
- Puig H. (2002). *La forêt tropicale humide*. Belin, Paris.
- Rasmann S. (2023). La raison d'être de la diversité phytochimique. In Mulhauser B. (dir.): *Plantes soignantes. Entre pouvoirs et partages*. Épistémé, Lausanne: 31-47.
- Renne P. R., C. J. Sprain, M. A. Richards, S. Self, L. Vanderkluysen & K. Pande (2015). State shift in Deccan volcanism at the Cretaceous-Paleogene boundary, possibly induced by impact. *Science* 350(6256): 76-78.
- Tshudy R. H. & B. D. Tshudy (1986). Extinction and survival of plant life following the Cretaceous Tertiary Boundary event, Western Interior, North America. *Geology* (14): 667-670.

- Vajda V., J. I. Raine & C. J. Hollis (2001). Indication of global deforestation at the Cretaceous–Tertiary Boundary by New Zealand Fern Spike. *Science* 294(5547): 1700-1702.
- Wilf P. & K. R. Johnson (2004). Land plant extinction at the end of the Cretaceous: a quantitative analysis of the North Dakota megafloral record. *Paleobiology* 30(3): 347-368.
- Wilf P., M. R. Carvalho, M. A. Gandolfo & N. R. Cúneo (2017). Eocene lantern fruits from Gondwanan Patagonia and the early origins of Solanaceae. *Science* 355(6320): 71-75.
- Wolfe J. A. & G. R. Upchurch (1986). Vegetation, climate and floral changes at the Cretaceous Tertiary Boundary. *Nature* 324: 148-152.

Troisième partie

Postulat sur la Vie



Image de la page précédente :

Les différents types de transferts horizontaux des gènes, 2024. Dessin au crayon et aquarelle.

La capacité que les micro-organismes ont de réaliser un transfert horizontal des gènes, c'est-à-dire d'intégrer du matériel génétique d'un autre organisme sans lui être apparenté, est sans doute la meilleure illustration des échanges d'informations permanents qui s'effectuent au sein du continuum. À gauche, la conjugaison (transfert d'un brin d'ADN d'une bactérie à une autre bactérie; le brin échangé est symbolisé en rouge. « Lire » les différentes étapes de haut en bas). Au milieu, la transformation, soit l'intégration directe d'un fragment d'ADN étranger par un organisme dans son propre génome. Dans ce cas, la bactérie va se servir chez un individu mort, pas forcément de la même espèce. Il s'agit d'une méthode appropriée pour lutter par exemple contre les antibiotiques et développer des résistances. À droite, la transduction, proche du principe de la transformation, mais le brin d'ADN a été « pris en charge » par un virus. C'est lui qui, en s'insérant dans un nouveau microbe, lui apporte le nouveau matériel. Après libération du fragment, il doit nécessairement y avoir une recombinaison homologue initiée par une cassure du matériel héréditaire transporté pour qu'il soit intégré dans l'ADN chromosomique du second microbe (voir explications dans le chapitre 12. Un trafic génétique continu).

Théories de l'évolution, évolution

8 des théories

Il ne s'agit pas ici de refaire l'histoire des diverses visions qui ont nourri nos réflexions sur la Vie, du créationnisme à l'hypothèse Gaïa, en passant par le fixisme ou la théorie des équilibres ponctués, mais bien de faire le point sur ce qui freine notre compréhension des processus du vivant. Cela semble nécessaire, à l'heure où les disciplines du génie génétique, de la biologie de synthèse, de l'intelligence artificielle et du transhumanisme avancent dans des projets éthiques inquiétants, dits de «l'amélioration de l'être humain».

Du darwinisme à la théorie synthétique de l'évolution

Depuis la parution de l'ouvrage *De l'origine des espèces...* (Darwin 1859), malgré des centaines de querelles d'experts, la conception du mécanisme de l'évolution a relativement peu changé. Grosso modo, les biologistes d'aujourd'hui acceptent une version néodarwinienne de la théorie de l'évolution telle que décrite dans l'ouvrage du savant britannique: une version enrichie des acquis de la génétique, postérieurs à sa publication. Ainsi, la «théorie synthétique de l'évolution», établie dans les années 1930, influence actuellement la pensée dominante. Elle continue d'évoquer des processus de «sélection naturelle», de «sélection négative» ou de «dérive génétique» qui, s'exerçant par mutations aléatoires du patrimoine génétique, consolident ses vues (voir

Dobzhansky 1973 pour la théorie synthétique de l'évolution et Kimura 1991 pour la théorie neutraliste de l'évolution). Elle refuse en revanche l'idée de transmission de caractères acquis durant la vie des individus qui forment une population. Elle ne reprend pas non plus l'idée de l'entraide, vue par le naturaliste russe Pierre Kropotkine comme l'un des moteurs de l'évolution (Kropotkine 1906).

Sans trop entrer dans les détails, car ce n'est pas le sujet principal de ce livre, je résume l'idée qui a cours au début de ce XXI^e siècle : l'évolution « est en marche » lorsqu'au moins un allèle est en train de se modifier dans la population d'une espèce. Pour bien comprendre, il nous faut donc expliquer ces trois termes : « allèle », « population » et « espèce ».

- *L'allèle* peut être défini comme la « variante » d'un gène. Ce dernier est construit en longue séquence de sous-unités d'ADN, les « nucléotides ». Lorsque cette séquence est modifiée à cause d'un événement X, les généticiens parlent de « mutation », dans le sens où le résultat de la modification est un « allèle du gène de base » (mais, et ceci, c'est moi qui l'ajoute, qui peut définir ce qu'est le gène de base ?). Malgré ce jargon, nous pouvons comprendre les différences entre allèles d'un « même gène de départ », par exemple s'agissant des groupes sanguins chez l'humain : les personnes du groupe A possèdent un allèle codant la molécule A, celles du groupe B un allèle codant la molécule B, tandis que celles du groupe O n'ont ni l'un ni l'autre ; il existe donc dans ce cas trois versions d'un même gène, autrement dit trois allèles. Je livre là une version encore très simpliste de ce qu'est le sang humain, l'important étant de bien comprendre les termes utilisés.
- En biologie, la *population* est un groupe d'individus d'une même espèce. Cette définition est réduite à sa plus simple expression. Si on y ajoute la notion d'espace, on comprend que deux populations d'une même espèce peuvent se mélanger. Du mélange ou du non-mélange dépend le brassage génétique et le phénomène de spéciation, c'est-à-dire d'apparition d'une nouvelle espèce, le plus souvent par isolement d'une population.
- La définition de ce qu'est une *espèce* pose un certain nombre de problèmes, car il s'agit d'un concept, plutôt que d'une réalité biologique intangible. Le sens le plus largement intégré dans notre langage est le suivant : l'espèce est une notion d'ensemble de tous les individus pouvant engendrer entre eux une descendance féconde.

Ainsi, pour donner un exemple clair de résultat de l'évolution, nous pouvons dire que les individus de deux populations d'une même espèce, totalement isolées l'une de l'autre, subiront des mutations qui, au bout d'un certain temps, aboutiront à des génomes si différents qu'ils ne pourront plus engendrer de descendance féconde par croisement des individus lorsqu'elles seront à nouveau réunies. Chacune de ces deux populations formera les « corpus » de deux espèces à part entière.

Dans cette conception, on se rend donc compte que le « moteur » de l'évolution agit sur le matériel génétique des individus. Le problème de cette « théorie synthétique de l'évolution »²⁴ est que, pour de nombreux processus incompris, elle fait entrer en jeu l'aléatoire. Pourquoi? Tout simplement parce que, comme bien souvent, l'observateur humain a adopté une vision anthropocentrique en faisant de ses gènes des éléments centraux de sa réflexion. Partant de son imperfection intrinsèque, il a fait des comparaisons avec toutes sortes d'organismes pouvant avoir une certaine ressemblance avec sa propre construction : autres mammifères, oiseaux, reptiles, amphibiens, poissons et éventuellement les premiers chordés. Ainsi s'est répandue une idée selon laquelle, en fonction d'un changement de conditions environnementales ou physico-chimiques de leur milieu, les individus d'une population expriment des allèles par hasard « préadaptés », mais qui étaient « dormants » ou neutres jusqu'alors. Voici ainsi ce que l'on peut lire dans l'article « Mutation génétique » de l'encyclopédie libre Wikipédia en 2024 :

Au niveau de la génétique des populations, la mutation se définit comme une erreur dans la reproduction conforme du message héréditaire. Elle va transformer un allèle en un autre, nouveau ou déjà présent dans la population. Le rôle de la mutation dans l'évolution est primordial, car c'est la seule source de gènes nouveaux. Mais une fois qu'un nouveau gène est apparu par mutation, ce n'est pas elle qui va déterminer son devenir : si le nouvel allèle est défavorable, ou s'il est plus favorable que les anciens, c'est principalement la sélection qui va déterminer l'évolution ultérieure de sa fréquence²⁵.

Est-ce vraiment cela « l'évolution »? L'apparition d'un caractère héréditaire (passant donc d'une génération d'individus à l'autre) qui se

²⁴ Que l'on peut aussi nommer « néodarwinisme ».

²⁵ Avec pour référence le livre de Jean-Pierre Henry et Pierre-Henry Gouyon (2008) : *Précis de génétique des populations*. Dunod, Paris.

propage par hasard dans l'ensemble du groupe, le rendant plus adapté ? Une « erreur » dans la reproduction conforme du message héréditaire ? Ou bien n'est-ce pas plutôt là l'expression d'une belle croyance ?

Et que dire de la « sélection naturelle » ? Décrite à l'origine par Darwin comme « principe, en vertu duquel une variation si insignifiante qu'elle soit se conserve et se perpétue, si elle est utile », on peine aujourd'hui à lui trouver une définition tangible. Celle de l'*Encyclopædia Universalis*²⁶ en est peut-être la plus fidèle à l'idée de départ : « préservation des variations favorables dans la lutte pour la vie et rejet des variations préjudiciables ». Il faut toutefois se souvenir que le naturaliste anglais propose le terme pour distinguer ce principe de celui de « sélection artificielle » pratiquée par les êtres humains en agriculture (Darwin & Wallace 1858 ; Darwin, 1859). Mais c'était là une erreur fondamentale à plus d'un titre :

- 1) Sa définition oppose l'humain à la nature, en accordant de fait une importance particulière au premier (anthropocentrisme) ;
- 2) Le terme « sélection » induit la notion de choix (contredisant *de facto* l'idée que les mutations se font au hasard, ce que prônent les partisans du néodarwinisme) ;
- 3) Le mot « naturel », mal choisi et ambigu (fait-il référence au « vivant » ou à « tout processus biotique ou abiotique, qui s'exprime de soi sans intervention humaine » ?), aboutit à un truisme (la sélection hasardeuse de la Vie conserve les variations favorables à la lutte pour la vie) ou à un non-sens (l'explosion de notre Soleil, fondamentalement naturelle et inéluctable, n'aboutit à aucun principe de préservation de variations favorables dans la lutte pour la vie).

Darwin a convaincu ses semblables que l'évolution des espèces était un fait réel, ce qui est autant un grand mérite qu'une réalité. Malheureusement, il a très mal choisi ses termes. La troisième notion discutable introduite par Darwin est celle de « survie du plus apte » (ou du plus adaptable, selon l'acception du terme anglais « *fittest* ») qui sous-tend le principe de sélection naturelle en introduisant l'idée d'une compétition entre individus (et non entre espèces), renforçant la tautologie (la suite de la proposition logique de « survie du plus apte » est « mort du moins apte », bien que la mort soit inéluctable pour tout individu, avec ou sans compétition). Enfin, alors qu'il base son analyse

²⁶ Version 2024, consultable par voie électronique.

du processus d'évolution sur l'observation des individus, Darwin augmente la confusion en mentionnant parfois la notion de « survie du plus apte » au niveau des espèces : « Ce n'est pas la plus forte des espèces qui survit, ni la plus intelligente qui survit. C'est celle qui est la plus adaptable au changement » (Darwin, 1859).

Les failles du néodarwinisme

La construction de la théorie néodarwinienne, axée sur les gènes des êtres multicellulaires, occulte deux faits majeurs. Le premier, vu dans les chapitres précédents, est que tous ces organismes sont les résultats de symbioses avec des organismes unicellulaires tels que les bactéries, et qu'ils sont par conséquent interdépendants. Le second complète le premier : les générations de bactéries se succèdent à un rythme rapide²⁷ et des transferts de gènes s'observent continuellement, touchant en moyenne un individu sur cent mais de manière continue. Or, par exemple chez un mammifère, il y a plusieurs milliards de bactéries qui vivent en symbiose. Cela représente une capacité d'échange de gènes quasi ininterrompue (voir le chapitre 12 « Un trafic génétique continu ») ; raison pour laquelle le terme de « continuum » s'impose pour caractériser le vivant sur notre Terre. Un petit calcul théorique très minimaliste illustre bien cette idée : à raison d'une mutation par mois de 1 % d'un tout petit milliard des bactéries qui cohabitent dans notre corps, c'est tout de même plus de 120 millions de mutations qui interviennent par année, c'est-à-dire plus d'un milliard durant la vie d'un être humain ! Peut-on alors encore voir ces mutations comme des « erreurs », et ne devrait-on pas plutôt les considérer comme une condition *sine qua non* du processus d'évolution ?

Bien qu'elle ne fût pas la première à voir les failles du système néodarwinien, la microbiologiste Lynn Margulis fut celle qui opposa le plus clairement ses vues :

Les partisans du néodarwinisme, vautés dans leur interprétation de Darwin du point de vue de la zoologie, du capitalisme, de la compétition, des coûts-bénéfices, ont complètement faussé sa pensée. Le néodarwinisme, qui insiste sur l'accumulation lente de mutations par la

²⁷ En laboratoire, une demi-heure pour les plus rapides, jusqu'à un mois pour les plus lentes (comm. pers. Michel Aragno).

sélection naturelle au niveau du gène, est une théorie de trouillards (Mann 1991).

Il faut préciser que l'Américaine sut convaincre la communauté scientifique de l'origine bactérienne de plusieurs organites de nos cellules tels que les mitochondries et, chez les végétaux, les chloroplastes. Dans son ouvrage sur l'origine des eucaryotes, elle déclare sans ambages : « Le travail de Darwin est anthropomorphique et d'un intérêt limité ». (Margulis 1970). Elle a fondamentalement raison : l'erreur fondamentale est d'avoir cherché à insérer l'évolution des espèces dans une compétition entre elles. Il faut définitivement se débarrasser de plusieurs concepts parmi lesquels le plus handicapant est sans doute celui de « sélection naturelle » qui est, d'après moi, nul et non avenu.

Mais par quoi faut-il les remplacer ? À la suite des propositions de Lynn Margulis qui décrit la collaboration entre les espèces comme étant le principal moteur évolutif (Margulis 1992 ; Margulis & Sagan 2002a) aboutissant, le plus souvent par symbiose, à une diversification et à une complexification du vivant, des chercheurs israéliens ont proposé récemment le concept d'« hologénome » (Rosenberg & Zilber-Rosenberg 2013). Il s'agit de considérer qu'un hôte, ses symbiotes et leur matériel génétique respectif commun (nommé « hologénome ») « agissant en consortium, fonctionnent comme une unique entité biologique [nommée « holobionte »] et également comme niveau de sélection dans l'évolution » (Zilber-Rosenberg & Rosenberg 2008). L'hologénome représente bien un concept sur lequel se baser. Néanmoins, chaque analyse métagénomique²⁸ réalisée sur cet hologénome ne correspond qu'à une image ponctuelle d'un holobionte en constante évolution phénotypique. Pour rendre compte de ce processus, il faudrait réaliser des études métagénomiques régulières, sur une longue période et sur un grand nombre « d'individus », puis analyser cette énorme source de données en évitant des erreurs d'interprétation. Techniquement, le travail n'est pas faisable. Les deux auteurs de cette recherche ont du reste eu la sagesse de redéfinir leur concept, nommé dans un premier temps « théorie hologénomique de l'évolution » (Zilber-Rosenberg & Rosenberg 2008). Si cette approche a l'avantage d'affirmer les liens indubitables entre les différents

²⁸ Soit une analyse de l'ensemble de tous les génomes présents (notamment ceux du microbiote).

organismes, elle ne permet pas d'expliquer à elle seule le processus d'évolution.

Une contre-hypothèse au néodarwinisme

La phylogénie des organismes vivants a pu être analysée grâce à des séquençages de plus en plus « complets » de matériel génétique. On est pourtant tellement loin d'avoir saisi la complexité des relations horizontales croisées entre les différents organismes que la classification humaine du domaine du vivant va encore connaître de grands bouleversements. Des techniques de datation de fossiles de plus en plus précises ont été conçues pour calibrer les âges présumés des séparations de lignées d'organismes. Toutefois, même si on trouvait mille fois plus de fossiles de différents âges pour chacun des grands domaines – bactéries, archées et eucaryotes –, la séparation temporelle moyenne entre chaque objet continuerait à se compter en millions d'années, soit bien plus que le temps qu'il faut pour qu'une « espèce » « apparaisse », évolue puis « disparaisse ». La « paléontologie de l'évolution » – et par conséquent la phylogénie – est contrainte de fonctionner en spéculant sur des informations qu'elle n'a pas et qu'elle n'obtiendra sans doute que très rarement.

Dans ce domaine de biologie qu'est la « systématique »²⁹, l'une des tendances actuelles est de proposer des scénarios évolutifs sur la base de modèles prédictifs en lien avec des analyses métagénomiques. C'est bien tentant, mais cela va amener beaucoup de confusions dans la manière d'appréhender la complexité du vivant. Jain, Rivera et Lake (1999) tentent d'évacuer ce risque en définissant l'« hypothèse de complexité » (*complexity hypothesis*). Partant de la constatation que les gènes impliqués dans les phénomènes de transcription génétique (« gènes informationnels ») étaient bien plus rarement transférés d'une bactérie à l'autre que des gènes dits « opérationnels » (soit impliqués directement dans le fonctionnement physiologique de l'organisme), ils ont testé deux théories sur le flux de transfert horizontal (voir chapitre 12 « Un trafic génétique continu »), grâce à l'analyse complète de six génomes d'espèces de procaryote différentes. Ils ont ainsi remarqué que les transferts de gènes opérationnels avaient été continus et étalés dans le temps, alors que ceux des gènes informationnels avaient

²⁹ Science de l'inventaire et de l'organisation de la diversité des êtres vivants.

plutôt été massifs et ponctuels (en une ou deux fois). Ce résultat suggère que ces derniers appartiennent à un système génomique complexe, impliquant un transfert plus rare. Cette vision a été complétée quelques années plus tard par le concept « d'anneau de vie » (*ring of life*) que les auteurs préférèrent à la vision classique « d'arbre de vie » (*tree of life*). Grâce à leur analyse phylogénétique toujours basée sur la connaissance complète de génomes de différentes espèces, ils ont mis en évidence une origine procaryotique double de la cellule eucaryote (voir le chapitre 5 « La Grande Oxydation... ») par fusion de deux types de génomes de procaryotes (Rivera & Lake 2004). La vision qu'on en retire est effectivement un lien par flux de gènes entre tous les protagonistes du vivant, plutôt qu'une idée de lignées isolées sur leurs branches et prenant racine séparément. Elle n'explique toutefois pas le « pourquoi du comment » de l'évolution.

Les recherches menées sur des bactéries symbiotiques du groupe des *Rhizobium* (chapitre 3 « Symbioses ») illustrent bien cette complexité génétique (Aragno 2007). Un groupe de plus de trente chercheurs menés par le professeur Peter Young de l'Université d'York (Royaume-Uni) a pu déterminer que les composantes du génome de la bactérie *Rhizobium leguminosarum* pouvaient être classées en deux groupes : le *core genome* ou partie du génome propre à l'identité de l'organisme qui le porte, et l'*accessory genome* qui a dû être transmis par transfert horizontal (voir chapitre 12 « Un trafic génétique continu »). Si le premier groupe est composé de gènes essentiels au fonctionnement de base de la cellule, le second semble plutôt répondre à l'écologie du microbe, par exemple une façon de fixer l'azote ou une manière particulière d'utiliser les ressources du sol sur lequel pousse la plante (Young *et al.* 2006). Cette étude, totalement indépendante des travaux de Rivera et Lake, s'accorde parfaitement avec l'idée selon laquelle les gènes informationnels (ou *core genome* selon les auteurs cités ci-dessus), situés principalement dans le chromosome circulaire, sont « mieux protégés » que les gènes opérationnels (ou *accessory genome*) localisés dans les six plasmides de la bactérie ou certains îlots du chromosome circulaire. Les gènes opérationnels sont donc « moins constants » et par conséquent beaucoup plus adaptables au changement de l'environnement.

Syvanen (1985) va plus loin dans son analyse. Il émet l'hypothèse que les gènes peuvent être transférés et exprimés sur l'ensemble de la chaîne du vivant, expliquant non seulement l'uniformité du code génétique (voir chapitre 11 « Le continuum du vivant »), mais également

celle de l'embryogenèse. Il conclut que cette uniformité « permettrait aux organismes de déchiffrer et d'utiliser les gènes transposés à partir de chromosomes d'autres espèces », mais aussi que « la séquence de développement embryologique partagée au sein d'un phylum, leur permettrait d'intégrer ces gènes » (Syvanen 1985; traduction par l'auteur). Il souligne ainsi la condition *sine qua non* de l'unité du vivant (corroborant en partie le postulat que je décris dans le chapitre suivant, « Une question de vie ou de mort »; à savoir que la Vie s'organise et évolue en un système qui lui est propre). Il y voit de possibles voies évolutives, mais n'en décrit pas les tenants et aboutissants.

Sa vision s'accorde en partie avec celle de Lynn Margulis. C'est sans conteste la biologiste qui a le mieux su s'extraire d'une vision anthropocentrique du vivant. Elle a sans doute intégré, mieux que quiconque, la formule attribuée à Lavoisier (découvreur de l'oxygène, de l'azote et de l'hydrogène): « rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme »³⁰. La théorie de l'endosymbiose naît à la fin du XIX^e siècle, de cette constatation somme toute très logique: la Vie se construit et se complexifie à partir de ce qui existe déjà.

C'est pourquoi, en reprenant le concept d'endosymbiose dans les années 1970, Lynn Margulis a insisté pour que la communauté accepte également l'idée selon laquelle, tout comme les plastes et les mitochondries sont issus de symbioses (voir chapitre 5 « La Grande Oxydation... »), les flagelles (ou « ondulipodes ») des eucaryotes, à l'origine de leur mobilité, ont pour ancêtres des bactéries également capables de locomotion et appelées « spirochètes » (Smith 1979; Margulis & Sagan 2002b). Malgré plusieurs arguments importants, cette idée a été abandonnée par la communauté scientifique, notamment du fait de l'absence d'un matériel génétique commun aux spirochètes et à ces flagelles. Ce constat n'infirme toutefois pas la théorie, car on sait que dans une endosymbiose, la tendance à la perte de matériel génétique est très forte afin d'éviter une débauche d'énergie dans la répllication de gènes redondants (Selosse, Albert & Godelle 2001). Par exemple, le génome des mitochondries présentes chez l'être humain est constitué de moins de 17 000 paires de

³⁰ Pour la petite histoire, dans un contexte différent, l'idée de cette formule avait déjà été exprimée par le philosophe grec Anaxagore (500-428 av. J.-C.) en ces termes: « Rien ne naît ni ne périt, mais des choses déjà existantes se combinent, puis se séparent de nouveau ».

bases (soit 17 kilobases³¹), alors que des alpha-protéobactéries libres desquelles elles proviendraient possèdent plusieurs millions de paires de bases (Gray, Burger & Lang 2001; Woischnik & Moraes 2002). De même, les chloroplastes possèdent un génome limité de quelques centaines de kilobases codant une centaine de gènes seulement, alors que celui des cyanobactéries libres dont ils seraient issus compte plusieurs milliers de kilobases pour des milliers de gènes. On connaît même le cas de plastes qui n'ont plus d'ADN : il s'agit de ceux d'une plante du genre *Rafflesia* qui pousse aux Philippines, et qui semble avoir perdu le matériel génétique contenu dans ses chloroplastes (Molina *et al.* 2014). Comme ce végétal est un parasite, il est logique que ses plastes ne contiennent plus de chlorophylle, l'apport d'énergie ne se réalisant plus par photosynthèse. Néanmoins, puisque d'autres fonctions, telles que la synthèse d'acides aminés et de pigments (caroténoïdes), subsistent et nécessitent des gènes pour être « exprimées », ces derniers sont présents sur les chromosomes contenus dans le noyau de la cellule, avec l'avantage qu'ils seront transmis aux descendants.

Ce constat d'assimilation de tout ou partie du génome de l'endosymbiote par celui de son « hôte » (peut-être une notion à relativiser, ne s'agit-il pas simplement de l'entité la plus grande?) est très important dans le débat que peut soulever l'idée d'un continuum du vivant (voir le chapitre 11). D'une part, il permet de comprendre quelle est la fonction principale de la reproduction sexuée. Il confirme d'autre part que le système d'information n'a pas été perdu, mais seulement déplacé. Au risque de choquer, je dirais que la sexualité n'a pas été mise en place pour transmettre nos gènes à nos descendants, mais pour leur offrir le gros œuvre d'une machinerie électrochimique fonctionnelle qu'ils mettraient beaucoup trop de temps à recomposer (ce serait du reste impossible). On pourrait me rétorquer que les deux propositions sont similaires, l'une étant contenue dans l'autre. Néanmoins, l'hérédité exprimée de cette manière laisse beaucoup plus de place à tout ce qui se passe durant la vie d'un individu (transfert horizontal de gènes, « mutations » et expressions « épigénétiques » dont on n'a pas encore véritablement compris le fonctionnement). C'est toute la subtile différence entre la notion de « survie du plus apte » et celle de « capacité d'être constamment adaptable » ; la seconde se réalisant toujours dans une interrelation avec les

³¹ Le kilobase, abrégé kb, est une unité de mesure équivalente à un millier de paires de bases d'acides nucléiques (ADN ou ARN).

autres êtres vivants. Enfin, le fait que, au cours d'une évolution symbiotique, certaines fonctions génétiques soient déplacées des organites cellulaires³² vers le noyau, indique leur importance au point de devenir des caractères héréditaires. Cela revient à dire que l'endosymbiose et/ou l'endoparasitisme sont des «états génétiques transitoires», étapes obligatoires et prudentes avant l'assimilation de la machinerie génomique dans l'hôte. Mais attention: si «l'organite» doit conserver des possibilités d'échange d'informations avec les bactéries libres, sa fonction génétique sera maintenue tout autant que sa capacité à se répliquer indépendamment de la cellule-hôte.

L'évolution part du simple et influence le complexe. Les êtres multicellulaires subissent l'évolution beaucoup plus rapide des microbes contenus dans leur biote. Cela remet superbement au goût du jour la théorie lamarckienne de l'hérédité des caractères acquis. Il faut toutefois reformuler le principe: l'organisme multicellulaire s'adapte aux changements de génome de son microbiote et peut le transmettre à ses descendants. De fait, l'évolution n'est pas une question de sélections, il s'agit d'un processus partagé par l'ensemble des organismes vivants. Toutes les espèces, du bacille de la peste à l'ornithorynque et de l'armillaire à la coccinelle asiatique, induisent ensemble des changements perpétuels. Ces changements sont motivés par des événements environnementaux, qu'ils soient organiques ou inorganiques.

En partant du principe que les organismes unicellulaires et les multicellulaires sont des êtres symbiotiques fonctionnant de concert et échangeant continuellement des informations électrochimiques, il est dès lors possible de proposer une contre-hypothèse à celle du néodarwinisme: l'évolution du Vivant est continue, incessante et interdépendante à tous les organismes, afin qu'il [le vivant] soit adaptable à tout changement, même infime, de son environnement. Cette hypothèse implique un certain nombre de principes:

- 1) Il existe un continuum du vivant à travers le temps et l'espace, reliant tous les organismes.
- 2) L'évolution (des organismes) se fait par un échange continu d'informations, des organismes les plus «simples» (procaryotes) aux organismes les plus «compliqués» (êtres eucaryotes multicellulaires spécialisés).

³² Plastides, mitochondries mais aussi bactéries endosymbiotiques que la communauté scientifique reconnaît encore en tant que telles.

- 3) Le langage utilisé pour la transmission des informations est celui de la codification génétique.
- 4) Lors de tout nouveau changement environnemental, la connectivité des organismes implique une solution évolutive commune allant du plus simple vers le plus complexe.

De fait, pour se prémunir des variations environnementales, les organismes les plus « simples » se sont organisés, par symbiose homéostasique, en organismes plus compliqués (être symbiotique ou « holobionte »), formant un réseau continuant à échanger et à codifier leurs informations (« hologénome ») avec un rythme (taux de changement des codifications génétiques par unité de temps) qui diminue avec l'augmentation de la complexité de l'organisme.

Il est intéressant de réfléchir aux implications de cette hypothèse dans notre vision actuelle du monde et de la Vie. Par exemple, que devient l'idée-même d'évolution ? A-t-elle encore une raison d'être si nous laissons tomber les concepts de sélection naturelle et de survie du plus apte au profit des principes d'échange d'informations et de diversification des solutions de Vie ? La réponse est positive : non seulement le principe d'évolution existe toujours, mais il se trouve très clairement renforcé par les notions de continuum, d'échange continu d'informations et de solution évolutive commune, car nous avons la possibilité d'y intégrer les cycles biologiques ; ce qui paraissait très difficile à faire dans la vision néodarwiniste de l'évolution. La classification du vivant devrait par conséquent, en principe, refléter cette évolution en réseaux interdépendants.

Bibliographie

- Aragno M. (2007). Exemple des perspectives offertes par l'étude de génomes complets de bactéries : le génome des rhizobiums, particulièrement de *Rhizobium leguminosarum*. www.dropbox.com/s/burrgl7bbcjqy79/G%C3%A9nomique%20Rhizobium%21.ppt?dl=0 (consulté le 30.01.2024).
- Darwin C. & A. Wallace (1858). On the tendency of species to form varieties ; and on the perpetuation of varieties and species by natural means of selection. *J. Proc. Linnean Soc. of London* 3(9) : 45-62.
- Darwin C. (1859). *On the origin of species by means of natural selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. John Murray, London.
- Dobzhansky (1973). Nothing in biology makes sense except in the light of evolution. *The American Biology Teacher* 35(3) : 125-129.
- Gray M. W., G. Burger & B. F. Lang (2001). The origin and early evolution of mitochondria. *Genome Biology* 2(6) : 1018.1-1018.5.

- Jain R., M. C. Rivera & J. A. Lake (1999). Horizontal gene transfer among genomes: the complexity hypothesis. *PNAS USA* 96(7): 3801-3806.
- Kimura M. (1991). The neutral theory of molecular evolution: a review of recent evidence. *Jap. J. Human Genetics* 66(4): 367-386.
- Kropotkine P. (1906). *L'entraide, un facteur de l'évolution*. Alfred Costes, Paris.
- Mann C. (1991). Lynn Margulis: Science's Unruly Earth Mother. *Science* 252: 378-381.
- Margulis L. & D. Sagan (2002a). *Acquiring Genomes: A Theory of the Origins of Species*. Basic Books, Paris.
- Margulis L. & D. Sagan (2002b). *L'univers bactériel*, 2^e éd. française. Albin Michel/Le Seuil, Paris.
- Margulis L. (1970). *Origin of Eukaryotic Cells*. Yale University Press.
- Margulis L. (1992). *Symbiosis in cell evolution: microbial communities in the Archean and Proterozoic eons*. W. H. Freeman and co, San Francisco.
- Molina J., K. M. Hazzouri, D. Nickrent, M. Geisler, R. S. Meyer, M. M. Pentony, J. M. Flowers, P. Pelsner, J. Barcelona, S. A. Inovejas, I. Uy, W. Yuan, O. Wilkins, C.-I. Michel, S. LockLear, G. P. Concepcion & M. D. Purugganan (2014). Possible loss of the chloroplast genome in the parasitic flowering plant *Rafflesia lagascae* (*Rafflesiaceae*). *Mol. Biol. Evol.* 31(4): 793-803.
- Rivera M. C & J. A. Lake (2004). The ring of life provides evidence for a genome fusion origin of eukaryotes. *Nature* 431(7005): 152-155.
- Rosenberg E. & I. Zilber-Rosenberg (2013). *The Hologenome Concept: Human, animal and plant microbiota*. Springer.
- Selosse M. A., Albert B. & Godelle B. (2001). Small is successful: selection for reducing organelle's genome size favours gene transfer to the nucleus. *Trends Ecol. Evol.* 16: 135-141.
- Smith D. C. (1979). From extracellular to intracellular: the establishment of a symbiosis. *Proc. Royal Soc. London* 204: 115-130.
- Syvanen M. (1985). Cross-species gene transfer; Implications for a new theory of evolution. *J. Theor. Biol.* 112: 333-343.
- Woischnik M. & C. T. Moraes (2002). Pattern of organization of human mitochondrial pseudogenes in the nuclear genome. *Genome Research* 12(6): 885-893.
- Young J. P. W. *et al.* (2006). The genome of *Rhizobium leguminosarum* has recognizable core and accessory components. *Genome Biology* 7: R34.
- Zilber-Rosenberg I. & E. Rosenberg (2008). Role of microorganisms in the evolution of animals and plants: the hologenome theory of evolution. *FEMS Microbiology Reviews* 32: 723-735.

9 | Une question de vie ou de mort

Dans la savane africaine, une mère me regarde. Elle est couchée sur le flanc et ferme les yeux. Non loin d'elle, deux jeunes aux pattes grêles. Des guépards. Le Soleil au zénith donne des envies de somnolence. «Elle restera à l'ombre», dit mon guide. Un quart d'heure passe, puis le fauve se lève lentement, s'étire, baille et se met en marche. L'allure est lente, sans empressement. Ses deux petits la suivent à distance. Elle arrive sur un plateau en très légère pente où elle s'assied. De cet endroit, elle a une vue large sur la plaine. À 200 mètres, un petit groupe de gazelles broute l'herbe rare du sol brûlant. Le guépard se relève. Son allure lente feint la nonchalance, mais la direction de son regard ne trompe pas : il a repéré sa proie. J'ignore qui elle est. Voilà que le félin déclenche sa course, une incroyable et imprévisible puissance, agilité, facilité. Les gazelles s'éparpillent. Bien que rapide, la poursuite s'inscrit au ralenti dans ma mémoire. Chaque image y est gravée, chaque mouvement s'y dessine très précisément. Un long virage, quelques secondes et dans la prodigieuse course, le guépard donne son baiser fatal au cou de la gazelle qui s'effondre, morte sur le coup. Il s'agit d'une femelle portante. Mère contre mère. L'une halète puissamment, l'autre a la langue qui pend. Elle sera le repas des jeunes avant d'être celui des hyènes et des vautours. En deux jours, la carcasse sera nettoyée, les os seuls blanchiront au soleil.

Au-delà du tragique et de la souffrance qu'elle nous inflige lorsqu'elle nous touche de près, en quoi la mort répond-elle à une nécessité? Cette question est fondamentale et il est nécessaire d'essayer d'y répondre sans tabou. Entendons-nous bien : pour l'individu que je suis, le décès des personnes que j'aime est intolérable et la mort inacceptable. Mais dans ce monde des idées, il ne s'agit pas de moi.

La mort, cette source de vie

Tout d'abord, la mort est un mot que nous comprenons tous à peu près de la même manière : c'est la fin de la vie. Dire cela implique d'avoir conscience de notre état de mortel et de se rendre compte du temps qui passe³³; un point philosophiquement essentiel auquel je consacrerai donc un chapitre entier. Nous pouvons légitimement nous poser la question : l'humain serait-il seul à souffrir face à la disparition d'un être cher? Non. Des « comportements empathiques » que nous pourrions assimiler à des « rituels » sont au moins observés chez les chimpanzés et les éléphants. En admettant pour l'instant qu'il s'agisse d'exceptions, qu'est-ce que la mort signifie pour tous les autres organismes vivants?

Comprenez la question, elle est d'importance! La gazelle se rend-elle compte du souffle qui s'échappe d'elle? Son fœtus a-t-il l'ombre d'une seule perception d'avoir été vivant et de cesser de vivre? La mère guépard ne répond-elle qu'à un réflexe inné de survie en ôtant la vie à une autre mère? Et l'humain (ou peut-être l'éléphant et le chimpanzé) est-il le seul à se poser ce genre de questions? Si c'est vraiment le cas, il faut alors revoir la définition du mot mort qui est, en français, la « perte définitive par une entité vivante des propriétés caractéristiques de la vie, entraînant sa destruction »³⁴.

Cela revient à peu près à ce que j'ai écrit plus haut : la mort, c'est la fin de la vie, ou plutôt d'une vie. Car la subtilité du sens de cette définition se trouve autant dans les termes « entité vivante » qui se réfèrent donc à un individu, que dans la fin de la phrase « entraînant sa destruction ». Comment s'opère cette destruction? À peine les fonctions vitales ont-elles cessé que des processus chimiques débutent sous l'action de micro-organismes. L'oxygène ne parvenant plus aux cellules,

³³ Ce temps que les astrophysiciens mettent à mal en considérant qu'il n'existe pas (mais cela est une autre histoire!).

³⁴ Selon le dictionnaire Larousse 2019.

celles-ci sont transformées par des bactéries de putréfaction ou des microchampignons. L'altération chimique aboutit au dégagement d'une odeur caractéristique dont les effluves attirent une multitude d'insectes se succédant en huit escouades selon l'état de décomposition du cadavre (Wyss & Cherix 2013).

- La première à apparaître, quelques heures à peine après le décès, est celle des mouches «vertes» (famille des calliphoridés) et des mouches «domestiques» (famille des muscidés). Chaque femelle pond des dizaines d'œufs regroupés près des nécroses. Les larves éclosent moins d'un jour après et se développent rapidement dans ce milieu chaud et humide, en se nourrissant de la chair nécrosée. Après douze jours de ce régime, elles quittent le cadavre et se nymphosent. De chaque pupa nymphosée sortira un adulte qui ira instantanément chercher un autre lieu de reproduction.
- Entretemps, le corps sans vie commence à dégager une odeur cadavérique qui attire la deuxième escouade: d'autres espèces de mouches vertes et de mouches «à damier» (famille des sarcophagidés), dont les asticots ont le même rythme de développement que les précédents.
- Après quelques semaines ou quelques mois (toujours selon les conditions ambiantes de température, d'humidité et d'air), les graisses du corps commencent à rancir. Les bactéries de rancissement (genres *Clostridium*) transforment les acides gras en acide butyrique. Dans un milieu riche en oxygène, cette action est accélérée par l'oxydation de ces lipides. Ce phénomène chimique attire la troisième escouade, celle de petits coléoptères appelés «dermestes» et de petits papillons, les «pyrales». Ce sont les spécialistes de la décomposition des chairs séchées et coriaces.
- Un quatrième groupe, formé de différentes familles de mouches drosophiles (famille des drosophilidés), éristales (famille des syrphidés) et du fromage (famille des piophilidés), intervient une fois que les acides gras se sont transformés en lipides, soit à la fin de la fermentation butyrique et au début de la fermentation caséique caractérisée par une odeur de fromage.
- De nombreux coléoptères des familles des silphidés et histéridés, ainsi que quelques diptères (mouches des familles des muscidés et phoridés) forment une cinquième escouade attirée par les odeurs d'ammoniacale dégagées lors de l'ammonification (ou fermentation ammoniacale) des tissus, provoquée par les bactéries.

- Presque simultanément, une sixième vague d'invertébrés, celle des acariens, se charge de l'absorption des substances « humides », provoquant ainsi la dessiccation du cadavre. La momification naturelle d'un corps humain peut prendre plus d'une année depuis le décès de l'individu.
- Des coléoptères et des papillons s'attaquent alors aux matériaux secs riches en kératine, protéine de protection contre les rayons ultraviolets et d'imperméabilisation de l'épiderme ; c'est la septième escouade. Chez les mammifères, il existe plusieurs types de kératine que nous retrouvons dans les cheveux, les poils, les ongles et la peau. Les insectes qui digèrent cette substance de protection sont bien connus des bibliothécaires et des responsables de collections des musées d'histoire naturelle, puisqu'ils s'attaquent aux parties carnées des livres anciens et aux peaux des animaux « empaillés ». Il s'agit de mites (papillons), d'attagènes et d'antrènes (coléoptères).
- La huitième et dernière escouade est celle de coléoptères « nettoyeurs », les « ténébrions », qui se chargent d'éliminer les restes des autres nécrophages. Ils blanchissent le squelette qui sera éparpillé plus tard par des mangeurs d'os. Ces ossements seront à leur tour digérés par différents organismes, parmi lesquels bactéries et champignons réinjecteront calcium et phosphore dans le sol.

Bien entendu, cette description de la décomposition, putréfaction et momification d'un cadavre est très schématique. Selon les circonstances, les escouades se mélangent (Wyss & Cherix 2013). Ce qu'il faut en retenir, c'est l'étonnante diversité des espèces chargées de faire disparaître un corps mort. Ce recyclage est nécessaire afin de remettre à disposition les minéraux tels que le carbone, l'azote, le soufre, l'oxygène, le fer, le phosphore, le potassium, le magnésium, le calcium et plusieurs oligo-éléments, tous indispensables au maintien de la Vie sur Terre. Nous comprenons donc pourquoi la mort permet la continuation de la Vie. Par conséquent, il faut en tenir compte dans les processus d'évolution. J'y reviendrai.

Ces substances « captives » ne se trouvent pas uniquement dans les cadavres, mais également dans les excréments, la litière de feuilles et le bois mort. La faune de recyclage du sol accélère la décomposition ; celle-ci peut être jusqu'à cinquante fois plus rapide que dans un sol ne comprenant que des bactéries et des champignons (Gobat, Aragno & Matthey 2017).

Malheureusement, actuellement sur Terre, la capacité de recyclage semble fortement altérée, d'une part par la régression massive de la biomasse active dans les sols, et d'autre part par l'apparition de substances de synthèse dans ces mêmes sols, notamment des insecticides et des pesticides à large spectre. Cela paraît trivial à rappeler, mais il faut avoir conscience que si les décomposeurs disparaissaient, l'accumulation de « déchets » inaltérables conduirait à une intoxication définitive de notre biosphère. Dans les cimetières d'Europe (Allemagne, Suisse, Autriche, nord de la France, Portugal), un problème se fait ainsi jour depuis une vingtaine d'années : les corps enterrés se décomposent de plus en plus lentement. Des cadavres inhumés il y a plus de trente ans présentent de très faibles signes de décomposition, comme s'ils avaient été ensevelis quelques semaines plus tôt (Ferreira & Cunha 2013)! Dans le Bade-Wurtemberg (Allemagne), 40 % des sites funéraires sont confrontés à ce problème (Fiedler *et al.* 2004). Bien entendu, si les corps ne se décomposent plus, c'est que les organismes décomposeurs – bactéries et champignons en tête – ont drastiquement régressé. Même si la compréhension de ce phénomène reste incertaine, les hypothèses se multiplient : il pourrait avoir pour origine les actions multiples liées à l'usage de composants toxiques tels que le formaldéhyde, des fongicides et des bactéricides dans l'embaumement des cadavres, ainsi que des herbicides et d'autres pesticides dans l'entretien des tombes et des herbages.

Le cycle de la « Vie » : de « vie » à trépas

Si nous considérons que la mort est ce qui clôt l'existence, peut-on, à l'inverse, dire que la Vie peut être à l'origine de la mort ? Il est d'autant plus difficile de répondre que les spécialistes – mais en existe-t-il vraiment sur cette question ? – s'achoppent sur le sens à donner à la notion de « vie », dont voici trois définitions en français³⁵ :

- « Caractère propre aux êtres possédant des structures complexes (macromolécules, cellules, organes, tissus) capables de résister aux

³⁵ Puisé dans le Larousse 2021. Je précise que des différences subtiles existent dans les différentes langues indo-européennes et qu'elles sont évidemment beaucoup plus notoires avec d'autres idiomes, par exemple les langues sino-tibétaines, nilo-sahariennes ou nigéro-congolaises. La problématique des différentes racines linguistiques est beaucoup trop vaste pour que je puisse la développer dans ce livre de manière satisfaisante.

diverses causes de changement, aptes à renouveler, par assimilation, leurs éléments constitutifs (atomes, petites molécules) à croître et à se reproduire.»

- «État d'activité caractéristique de tous les organismes animaux et végétaux, unicellulaires ou pluricellulaires, de leur naissance à leur mort.»
- «Suite de phénomènes qui font évoluer l'œuf fécondé (zygote) vers l'âge adulte, la reproduction et la mort.»

Trois définitions avec de nombreuses similitudes et de notables différences. Le mot «mort» apparaît dans deux d'entre elles (2^e et 3^e définitions), ainsi que la notion de «reproduction» (1^{re} et 3^e définitions). Les deux dernières évoquent aussi une idée de complétude temporelle, exprimant un début (naissance) et une fin (mort). On remarque dans ces tentatives descriptives que l'humain – centré sur le «moi» – cherche absolument à rattacher le processus vivant à l'individu qui «naît, grandit, se reproduit puis meurt». On se retrouve donc rapidement confronté à des limites conceptuelles, comme dans le cas où un arbre (ou une herbe), après avoir produit de manière végétative et asexuée un nombre incalculable de clones, va sécher sur pied : une seule partie de son «potentiel vivant» sera morte, mais «l'individu» continuera à prospérer par ses rejets, au point de structurer des forêts (ou des prairies).

La définition de ce qu'est la Vie (et bien entendu de ce qu'est la mort) est-elle obligatoirement liée à la notion d'individu ? Ou bien peut-elle se placer au niveau de l'espèce, de la cellule ou encore du processus général de l'ensemble des organismes vivants ? Que de questions dans ce chapitre ! Mais la perception que chacun de nous en retire est à nouveau fondamentale. Par exemple, toujours en français, on ne dit pas d'une espèce qu'elle est «morte», mais qu'elle a disparu ou qu'elle s'est éteinte. *A contrario*, tant qu'elle existe, on affirme qu'elle est «vivante». Pour qu'une espèce soit reconnue comme «éteinte», il faut que le dernier individu soit mort. De manière plus globale, on comprend que la vie est «un état d'activité caractéristique de tous les organismes», tel que proposé par le début de la deuxième définition ci-dessus. Toutefois, si tous les organismes meurent à l'exception d'un seul, la «Vie» n'est pas morte ! Jusqu'à ce jour, la meilleure façon de distinguer ces deux notions (individualité ou totalité) est donc de changer de graphie en utilisant une minuscule ou une majuscule ; cela fonctionne par écrit,

mais pas lorsque l'on parle. Je reviendrai sur la seconde notion – la Vie – dans le dernier chapitre du livre.

Tout ceci n'est que querelle de linguiste, peut-on penser. Pourtant, lorsqu'une équipe d'astrophysiciens lance un programme pour rechercher des «traces de Vie» sur Mars, la réflexion est fondamentalement différente de celle d'un laboratoire de biosynthèse qui axe ses recherches sur la prolongation infinie de «l'espérance de vie» de nos cellules³⁶. Les uns cherchent à comprendre un mystère universel, les autres à repousser les limites de la mort, alors même que celle-ci, on vient de le voir, s'inscrit dans le cycle de la Vie.

Lorsqu'on cherche à définir ce qu'est la vie, le principal écueil est lié à son origine. Puisque le vivant émerge du vivant, puisque la «Vie» donne la «vie», comment celle-ci est-elle apparue sur Terre? Plusieurs théories cherchent à expliquer ce phénomène. Certaines évoquent l'intervention d'une force divine (thèse créationniste). D'autres envisagent la propagation dans l'espace de «germes de vie» (hypothèse de la «panspermie») qui ne vont réellement «s'exprimer» que dans des conditions propices (il y a –3,85 milliards d'années en l'occurrence). La Vie proviendrait-elle donc d'une planète issue d'un système stellaire localisé en périphérie de la Voie lactée, ou d'une galaxie parmi les innombrables que peut compter un univers? Malheureusement, ces hypothèses ne font que repousser le problème. En effet, quelle que soit la théorie que l'on échafaude – une vie créée sur Terre ou un organisme provenant de l'espace –, rien n'est résolu. Le problème reste entier: si la Vie est d'origine extraterrestre, comment a-t-elle émergé dans l'Univers? Et si une autre entité l'a créée, qui a pu établir l'omniscience de cette puissance créatrice? À ce stade, ne devons-nous pas accepter que le mystère puisse rester entier?

En revanche, ce que nous savons aujourd'hui des balbutiements de la Vie sur Terre nous laisse supposer que notre planète pourrait avoir été habitée très rapidement après sa formation. Nous avons déjà vu dans le chapitre 4 «Aux origines du vivant» que l'eau, indispensable aux organismes vivants, y existe sous forme liquide depuis 4,4 milliards d'années, soit 200 millions d'années seulement après la

³⁶ À ce propos, Michel Aragno me livre une anecdote révélatrice: «La pauvre Henrietta Lacks est décédée en 1951 d'un cancer foudroyant de l'utérus. Pas tout à fait cependant, puisque de ce cancer a été isolée la première lignée de cellules humaines cultivées in vitro (la lignée HeLa)... et ce jusqu'à nos jours, sans vieillissement intrinsèque apparent. Henrietta est ainsi très partiellement devenue immortelle!»

formation de la planète! Cet élément est aussi présent dans de nombreuses météorites dont on sait que le bombardement a été intense à la surface de la Terre naissante. Par ailleurs, l'atmosphère primitive entourant notre planète était constituée de vapeur d'eau, de dioxyde et de monoxyde de carbone et de gaz azotés et soufrés, mais dépourvue de dioxygène. En recréant en laboratoire ces conditions primitives terrestres – schématiquement une grosse masse d'eau enfermée dans un ballon (simulation de l'océan) reliée par des tubes en verre à des gaz atmosphériques dans lesquels sont simulés des orages par décharges électriques et un condensateur refroidissant l'air (simulation des précipitations) –, on aboutit très rapidement à la formation d'un grand nombre de molécules « organiques »³⁷ (Miller 1953, Miller & Urey 1959). Ces molécules sont les constituants principaux des cellules vivantes telles que nous les connaissons aujourd'hui. Néanmoins, rien ne nous explique la manière dont ces composés se sont agencés pour aboutir à un « état d'activité caractéristique »...

Admettons toutefois la probabilité statistique qu'il existe des êtres vivants sur d'autres planètes tournant autour d'autres systèmes stellaires. Il en résulte une grande probabilité pour que l'atmosphère dans laquelle ces organismes évoluent soit si différente de la nôtre qu'un échange ne soit pas possible. Cela doit nous rendre attentifs au fait que, même si nous découvrions une autre planète portant une forme de vie, nous ne pourrions sans doute pas aller l'habiter car les conditions environnementales y seraient beaucoup trop contraignantes pour notre organisme.

De même, si nous espérons rendre la surface de Mars fertile, ce n'est qu'à partir d'organismes extrêmement simples dans leur organisation cellulaire que cette vie pourrait « se construire ». Tout le cheminement décrit dans ce livre jusqu'à cet instant de lecture aboutit à l'élément crucial auquel les recherches paléontologiques et biologiques aboutissent : bien que nous ne connaissions pas l'origine exacte de la Vie sur Terre, nous pouvons être certains que celle-ci a évolué à partir du plus simple élément vers un état de complexité de plus en plus élevé. Cela revient à énoncer le principe selon lequel cette Vie « s'est modelée » sur Terre et que son évolution lui est propre (« évolution terrestre du vivant »).

³⁷ Expérience de Miller-Urey (1953) de l'Université de Chicago.

Par conséquent, sans avoir besoin de connaître d'autres espaces de vie, nous pouvons émettre le postulat suivant : où qu'elle se situe dans l'Univers, mais en présence d'une source d'énergie, la Vie s'auto-organise, dès son émergence sur un corps céleste, en un système qui lui est propre en ce lieu et qui évolue sous l'influence des conditions environnementales qu'elle rencontre.

Ce postulat a-t-il force de loi ? Bien entendu, toute la solution du mystère réside dans le sens que l'on donne au mot « Vie ». Nous pouvons toutefois être sûrs d'une chose si nous acceptons les définitions décrites dans ce chapitre : la Vie ne peut mourir, mais si elle s'éteint, la mort n'existe plus.

Bibliographie

- Deutsch D. (2001). *The Structure of the Multiverse*. Centre for Quantum Computation. The Clarendon Laboratory University of Oxford (UK).
- Ferreira M. T. & E. Cunha (2013). Can we infer post mortem interval on the basis of decomposition rate? A case from a Portuguese cemetery. *Forensic science international* 226(1) : e1-298.
- Fiedler S., W. Weinzierl, F. Waldmann & M. Graw (2004). Problems of decomposition in cemetery soils – Evaluation of Baden-Wuerttemberg (Germany). [Zersetzungsprobleme bei Erdbestattungen – Fallbeispiel Baden-Württemberg (Deutschland).] *Z. dt. geol. Ges.* 155 : 101-108.
- Gobat J.-M., M. Aragno & W. Matthey (2017). *Le sol vivant. Bases de pédologie. Biologie des sols*. 3^e éd. revue et augmentée. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.
- Miller S. L. & H. C. Urey (1959). Organic compound synthesis on the primitive Earth. *Science* 130 (3370) : 245-251.
- Miller S. L. (1953). A production of amino acids under possible primitive Earth conditions. *Science* 117(3046) : 528-529.
- Wyss C. & D. Cherix (2013). *Traité d'entomologie forensique. Les insectes sur la scène de crime*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.

10 | Un cycle continu

Vues du ciel, les taches vertes paraissaient minuscules dans l'immensité jaunâtre. Cette peau, brûlée par le soleil, prenait l'aspect d'un tapis de paille sur lequel des lichens de différentes couleurs se seraient développés. De plus petits points gris soulevaient la poussière. Ils suivaient, sur de longues bandes immuables, les griffures argileuses que d'autres avaient tracées bien avant eux. Ces pistes aboutissaient dans des terrains rougeâtres dont le cœur était plus sombre, car de l'eau y avait séjourné. En s'approchant un peu, on percevait une vie plus variée autour de ces cuvettes humides. Les points, insignifiants en apparence il y a quelques minutes, prenaient des dimensions insoupçonnées. Les formes grises avaient de larges oreilles et une longue trompe. Aux éléphants se joignaient les troupes de gnous, de zèbres et d'oryx. Les gazelles se tenaient encore à l'ombre des taches vertes que constituaient les baobabs et les acacias faux-gommiers. Pattes écartées et cou tendu vers le bas, une girafe cherchait à boire, sous l'œil attentif de quelques congénères. Les oreilles de tous ces herbivores frémissaient sans arrêt, tournant d'un point cardinal à un autre. Malgré la nonchalance de certains, le monde était en perpétuelle alerte. Le danger les guettait partout. Près des points d'eau, il ne fallait pas finir sous la dent du lion. Le léopard sévissait dans les zones arborées plus denses, proches des rivières, alors que le guépard préparait ses attaques fulgurantes dans les plaines herbeuses parsemées de buissons. Les

hyènes faisaient leur travail de sape en suivant des journées entières les groupes dans lesquels elles avaient repéré un animal plus faible, blessé ou inexpérimenté.

De haut en bas

Si je vous ai entretenu de la mort dans le chapitre précédent, c'est bien pour expliquer qu'elle influence l'évolution du vivant et par conséquent, qu'il est nécessaire de la prendre également en compte. Pour illustrer ce cycle essentiel, je prends pour exemple la savane africaine. Ce monde varié façonne le paysage. Les éléphants abattent les arbres, mâchant les branchages comme s'il s'agissait de fétus de paille. Les girafes ratissent les branches des acacias à plus de quatre mètres de hauteur. Un peu plus bas, ce sont les gérénuks qui prennent le relais. Ces drôles d'antilopes à long cou, mi-girafe mi-gazelle, se dressent sur leurs pattes postérieures pour se régaler des rameaux épineux des arbres-à-fièvre. Les zèbres et les gnous préfèrent l'herbe à la feuille. Présents par milliers, ils tondent les plaines, rejoints par endroits par des petits groupes d'impalas, de gazelles, d'élands du Cap ou de cobes à croissant (McNaughton & Banyikwa 1995; Sinclair 1995).

Tout ce monde végétarien brasse des quantités phénoménales d'herbes dans leurs panse. À chaque espèce, sa particularité digestive, bien que dans l'ensemble le but soit toujours le même: réussir à fragmenter les plantes et à digérer leur cellulose ou, plus difficile encore, leur lignine, macromolécules composant le bois et apportant de la rigidité aux tissus. Chez l'éléphant, la digestion n'est pas très efficace, mais c'est parce qu'il est l'un des seuls mammifères de la savane à avaler du bois (Dublin 1995; Verchot *et al.* 2015). Les composés chimiques des polymères de lignine sont très résistants. Sur les dizaines de kilogrammes avalés chaque jour, la moitié est évacuée sous forme de crottes. L'avantage est bien entendu de disperser des graines sur de longues distances, permettant aux arbres, sous certaines conditions bien sûr, de recoloniser des zones peu arborées. On peut considérer que, d'une certaine manière, le pachyderme est un jardinier de la savane. Il arrache d'un côté et sème de l'autre (Dublin 1995)! D'autres herbivores, notamment ruminants (girafe, gnou, antilope, gazelle), ont un système digestif beaucoup plus performant avec une usine stomacale divisée en quatre compartiments: la panse, le réticulum, le feuillet et la caillette. La panse et le réticulum

peuvent être comparés à des cuves de fermentation. Ils renferment une riche biodiversité de bactéries, de champignons, d'archées et de protozoaires qui jouent chacun, à leur façon, un rôle particulier dans le processus de digestion des fibres végétales et de leur transformation en sucres assimilables. Dans ce « bouillon de culture », le bain d'herbes dure souvent plusieurs jours avant que les fibres ne passent dans le feuillet chargé d'en extraire le liquide nutritif. Avant de finir dans l'intestin, le reste d'aliments transite dans la caillette, une poche allongée et très acide ; c'est le véritable estomac du ruminant. Sécrétant des enzymes spécifiques, il permet à l'animal de digérer certaines particules alimentaires tenaces et d'éliminer les surplus de bactéries et d'autres micro-organismes qui ont nécessairement migré avec la « soupe ». Malgré tout ce travail, de nombreuses parties très coriaces des plantes ne sont toujours pas décomposées. La lignine est tout particulièrement difficile à dégrader et uniquement par des champignons basidiomycètes ou ascomycètes (Arora, Chandler & Gill 2002). Toute cette marchandise, désormais perdue par l'herbivore, se concentre dans les intestins avant d'être expulsée sous forme d'excréments.

À peine les crottes touchent-elles la surface du sol, qu'elles sont prises d'assaut par une multitude d'êtres vivants, véritables fossoyeurs de la savane, dont on peut comprendre, à condition de changer à nouveau d'échelle, le rôle tout aussi essentiel que celui des éléphants, des zèbres ou des girafes dans le maintien du paysage (Freymann *et al.* 2008). Imaginez que des centaines de milliers d'herbivores³⁸ défèquent chaque jour le reste non digéré de leur repas d'herbes, et que personne ne soit là pour recycler. Ce seraient des centaines de tonnes d'excréments qui s'accumuleraient quotidiennement³⁹. En moins d'une décennie, la pelouse de graminées serait recouverte d'une vaste fumure qui formerait une croûte stérile plutôt que de fertiliser le sol. Heureusement, grâce aux bousiers, scarabées, mouches et autres décomposeurs coprophages, mais également avec l'aide de termites, de champignons et de bactéries, les éléments azotés et phosphorés contenus dans les déjections et les os finissent par pénétrer sous la surface du terrain où ils favoriseront la repousse des

³⁸ Rien que pour les gnous, on compte 1,5 million d'individus qui effectuent leur migration entre la plaine du Seregenti en Tanzanie et celle du Masai Mara au Kenya.

³⁹ Dans le Masai Mara, une réserve de 1500 km², lors du passage le plus important des gnous, la masse quotidienne de crottes a été estimée à 800 tonnes.

plantes, notamment des graminées de la savane telles que l'herbe à gnou, la digitale ou encore l'herbe à kangourou⁴⁰.

Dans les profondeurs du sol, un univers en soi

Le sol renferme tout un univers, plus dense encore que la savane en friche que l'on vient de quitter. Il faut d'autres sens que la seule vision pour l'appréhender, tant les structures sont épaisses, enchevêtrées et granuleuses. Les arbres y sont inversés; très épais à la surface, le tronc des racines se divise en branches, puis en branchettes de radicelles et fins rameaux de mycorhizes, au fur et à mesure que l'on s'enfonce dans l'agrégat de la terre. Les gazelles, dik-diks et phacochères du sol ont pour noms oribates, collemboles et cloportes; de même que les premiers fuient les carnivores de la surface, les seconds cherchent à éviter les prédateurs du sol que sont les staphylins, les carabes et les gamasides. Et tout comme les uns digèrent l'herbe qui flotte au vent, les autres, végétariens herbivores d'un type particulier, digèrent la cellulose des débris verts. Eux aussi ont dans leur système digestif des bactéries qui les aident à recycler la matière. Leurs propres déjections seront reprises par plus petits qu'eux, microbes et moisissures en tête.

Tout en trompe, le ver de terre est l'éléphant du dessous, celui qui façonne le paysage terreux (ou pédo-paysage) en aménageant de grandes galeries, donnant à certains sols des allures de gigantesques cavernes. Dans les endroits les plus riches en lombrics, les galeries sont si denses que, sous un hectare, nous pourrions faire le tour de la Terre! Pour creuser, le lombric avale le sol. Un calcul amusant prétend qu'en un demi-siècle, l'ensemble des sols vivants de la planète est passé par le tube digestif des vers de terre (Gobat, Aragno & Matthey 2017). C'est à cette occasion que se produit la minéralisation, c'est-à-dire la mise à disposition des minéraux du sol. En traversant le tube digestif d'un lombric, la terre avalée est transformée par une multitude de bactéries. Il y en a un si grand nombre dans le biote intestinal du ver que celui-ci peut absorber plus de vingt fois son propre poids en terre par jour!

Il faut s'arrêter ici à l'un des éléments capitaux du rôle des vers de terre pour la Vie dans son ensemble. Grâce aux particularités de leur intestin, ils permettent un tour de passe-passe étonnant, aboutissant

⁴⁰ Herbe à gnou, *Andropogon* sp.; digitale, *Digitaria macroblephora*; herbe à kangourou *Themeda triandra*, présente également en Australie, comme son nom français le laisse supposer.

à la création d'un complexe argilo-humique, autrement dit une association entre argiles et humus. Électriquement, cette association n'est pas possible directement car les particules d'humus et d'argile sont toutes deux chargées négativement et se repoussent naturellement. Seule la présence, dans l'intestin des vers, de « ponts » chargés positivement, le plus souvent des cations de calcium (Ca^{2+}), de potassium (K^+), de sodium (Na^+), de magnésium (Mg^{2+}) ou de fer (Fe^{2+}), permet cette pirouette électrochimique. Cette capacité de « fixer » dans le sol des réserves de nutriments est essentielle pour le développement des plantes. Les complexes argilo-humiques servent aussi à stabiliser un sol contre les excès d'eau. Dans un sol désertique, la destruction des complexes argilo-humiques est irréversible. Or, ces complexes sont réalisés par les êtres vivants eux-mêmes, parmi lesquels les vers de terre sont les plus importants. Un champignon de la classe des glomérômycètes – le groupe de symbiotes présent dans les mycorhizes arbusculaires (voir chapitre 3 « Symbioses ») – s'associe au ver pour produire de la glomaline, une espèce de colle qui rend le complexe argilo-humique très stable et peu soluble (Rillig, Wright & Eviner 2002). Finalement, les déjections du lombric (ou « turricules ») sont des engrais naturels minéralisés, contenant beaucoup plus d'azote, de phosphore, de potassium, de magnésium et de calcium que la terre avoisinante !

Un autre groupe d'animaux aide autant à l'aération du sol qu'au recyclage des éléments minéraux. Il s'agit des termites, dont la symbiose avec des champignons et des bactéries vaut la peine d'être explorée. Des études récentes ont permis de déterminer que les termites et les blattes appartiennent au même ordre d'insectes (Inward, Beccaloni & Eggleton 2007). Leur mode de vie est toutefois bien différent, puisque leur haute socialité leur a permis d'établir une communauté d'individus aux rôles différents : protecteurs, ouvriers agricoles, nurses, sans oublier la « reine » reproductrice. Parmi plus de 2600 espèces répertoriées (Bignell & Jones 2014), celles du genre *Macrotermes* ont développé un mode de vie porté sur l'agriculture ou, plus précisément sur la culture de champignons ! Les termitières de plusieurs mètres de hauteur qu'ils érigent dans la savane ne sont pas là pour concurrencer les girafes ou les éléphants, mais servent de puits d'aération. La chambre royale, construite en sous-sol, est le siège de l'activité quasi permanente de ponte de la reine, tandis que les nurses s'occupent de placer les œufs dans des nurseries situées au-dessus. Cette activité produit du gaz carbonique qui chauffe l'édifice, puis l'air chaud traverse des

alvéoles particulières avant d'être évacué par des cheminées convergeant dans le puits d'aération principal. La climatisation des galeries souterraines assure le bon développement du couvain, mais également du couvert ! Ce dernier est composé du mycélium du champignon basidiomycète *Termitomyces* et du matériel végétal qui est ramené à la termitière par les termites les plus âgés. La pitance est ingérée rapidement par de plus jeunes individus. À ce stade, il n'y a pas réellement de digestion (Li *et al.* 2017). Le matériel ressort enrichi par des enzymes provenant du système digestif des termites. Il est déposé en tas dans l'une des alvéoles bien aérée (ou « chambre de culture ») et aménagée à cet effet. C'est sur ces meules que le champignon se développe, afin de dégrader la lignine du matériel végétal ; ce que sont incapables de faire les termites. Dès qu'une meule est « mûre », soit lorsque la décomposition est bien avancée, les termites s'en nourrissent. La digestion complète est facilitée par les bactéries et archées du microbiote qui, par leur disposition dans le tractus digestif, permet un savant couplage de fermentation et d'acétogenèse par les bactéries, et de méthanogenèse par les archées (Fall *et al.* 2007 ; Poulsen *et al.* 2014). Des transferts de champignons ont été observés d'une colonie à l'autre, les termitières étant connectées en un réseau s'étendant sur plusieurs centaines de km² (Aanen *et al.* 2007). L'édifice et ses alentours sont enrichis de différents composés minéraux, grâce notamment à la présence de bactéries fixatrices d'azote atmosphérique, mais également par remontée du sous-sol de phosphore assurée par des champignons. Le travail des termites est aussi de ramener de l'argile fine en surface, ce qui augmente la fertilité du terrain favorable à la croissance des plantes. C'est pourquoi les termites sont considérés comme les ingénieurs et architectes paysagistes des savanes, au même titre que les éléphants (Allen-Jones 1990). Au Botswana, on a pu calculer que la totalité de la surface du sol des savanes était recyclée par les termites champignonnistes selon un rythme d'un à dix siècles, en fonction de la densité et de la durée d'activité (dix à vingt ans) des termitières présentes (Van Thuyne & Verrecchia 2018).

En aérant le sol grâce à leurs galeries, les lombrics et les termites rendent aussi service aux champignons dont le mycélium, appareil végétatif constitué de filaments appelés « hyphes », peut s'étendre dans ces longs réseaux de galeries, ainsi qu'aux bactéries qui l'« empruntent » comme nous emprunterions une voie de communication (Simon *et al.* 2015) ! Des organismes, champignons et bactéries, qui s'associent à

plus de 80 % des espèces de plantes pour leur permettre d'améliorer le retour des minéraux dans les tissus des producteurs primaires de celles-ci ; c'est la « mycorhize », vue dans le chapitre 3 « Symbioses ». Il y a plusieurs formes de mycorhizes, mais de manière très simplifiée, retenons que l'extrémité d'un hyphe pénètre dans les cellules corticales de la racine. Le contact étroit entre les deux tissus permet au végétal d'améliorer l'absorption des minéraux et de l'eau contenus dans le sol. En retour, la plante donne une partie de son énergie sous forme de sucres au champignon. La plante améliore ainsi sa croissance et son pouvoir photosynthétique. En meilleure santé, elle rejette plus d'oxygène dans l'air.

Le cycle est bouclé. Les feuilles de l'acacia étalent leur limbe pour recevoir les rayons du soleil. Dans quelques instants, une girafe arrivera pour prélever une partie de cette tendre verdure. Si l'arbre est trop affaibli par cet appétit vorace, il cherchera d'autres solutions pour survivre. Un autre cycle débutera, celui des couleurs et des senteurs dans lesquelles s'épanouira la fleur. À leur tour, les pollinisateurs entreront en jeu. En voletant de fleur en fleur, ces voleurs de nectar embarqueront avec eux le précieux pollen. Ils le déposeront sur la fleur d'à côté, ou mieux encore, sur celle d'un autre arbre. Par ce jeu de fécondation croisée qui nécessite un allié volant, la plante assurera sa descendance en produisant des graines. Celles-ci, emportées par le vent ou avalées par des animaux, iront germer à distance respectable de leurs pères et mères.

Bibliographie

- Aanen D. K., V. I. D. Ros, H. H. de Fine Licht, J. Mitchell, Z. Wilhelm de Beer, B. Slippers, C. Rouland-LeFèvre & J. J. Boomsma (2007). Patterns of interaction specificity of fungus-growing termites and *Termitomyces* symbionts in South Africa. *BMC Evolutionary Biology* 7: 115.
- Allen-Jones J. (1990) Termites, soil fertility and carbon cycling in dry tropical Africa: a hypothesis. *J Trop. Ecol.* 6(3): 291-305
- Arora D. S., M. Chandler & P. K. Gill (2002). Involvement of lignin peroxidase, manganese peroxidase and laccase in degradation and selective ligninolysis of wheat straw. *Internat. Biodeter. & Biodegr.* 50: 115-120.
- Bignell D. E. & D. T. Jones (2014). A Taxonomic Index, with names of descriptive authorities of termite genera and species: an accompaniment to biology of termites: a modern synthesis. *Journal of Insect Science* 14(81): 34.
- Dublin H. T. (1995). Vegetation Dynamics in the Serengeti-Mara Ecosystem: the role of elephants, fire and other factors (1995). In Sinclair A. R. E & P. Arcese. *Serengeti II. Dynamics, Management and Conservation of an Ecosystem*. The University of Chicago Press: 71-90.

- Fall S., J. Hamelin, F. Ndiaye, K. Assigbetse, M. Aragno, J.-L. Chotte & A. Brauman (2007). Differences between bacterial communities in the gut of a soil-feeding termite (*Cubitermes niokoloensis*) and its mounds. *Applied and Environmental Microbiology*, 73(16): 5199-5208.
- Freyman B. P., R. Buitenwerf, O. de Souza & H. Olff (2008). The importance of termites (Isoptera) for the recycling of herbivore dung in tropical ecosystems: a review. *Eur. J. Entomol.* 105: 165-173.
- Gobat J.-M., M. Aragno & W. Matthey (2017). *Le sol vivant. Bases de pédologie. Biologie des sols*. 3^e éd. revue et augmentée. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.
- Inward D., G. Beccaloni & P. Eggleton (2007). Death of an order: a comprehensive molecular phylogenetic study confirms that termites are eusocial cockroaches. *Biol. Lett.* 3: 331-335.
- Li H., D. J. Yelle, C. Li, M. Yang, J. Ke, R. Zhang, Y. Liu, N. Zhu, S. Liang, X. Mo, J. Ralph, C. R. Currie & J. Mo (2017). Lignocellulose pretreatment in a fungus-cultivating termite. *PNAS USA* 114 (18): 4709-4714.
- McNaughton S. J. & F. F. Banyikwa (1995). Plant communities and herbivory. In Sinclair A. R. E & P. Arcese. *Serengeti II. Dynamics, Management and Conservation of an Ecosystem*. The University of Chicago Press: 49-70.
- Poulsen M. *et al.* (2014). Complementary symbiont contributions to plant decomposition in a fungus-farming termite. *PNAS USA* 111(40): 14500-14505.
- Rillig M. C., S. F. Wright & V. T. Eviner (2002). The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: comparing effects of five plant species. *Plant and Soil* 238: 325-333
- Simon A., S. Bindschedler, D. Job, L. Y. Wick, S. Filippidou, W. M. Kooli, E. P. Verrecchia & P. Junier (2015). Exploiting the fungal highway: Development of a novel tool for the in situ isolation of bacteria migrating along fungal mycelium. *FEMS Microbiology Ecology* 91(11).
- Sinclair A. R. E. & P. Arcese (1995). *Serengeti II. Dynamics, Management and Conservation of an Ecosystem*. The University of Chicago Press.
- Sinclair A. R. E. (1995). Equilibria in plant-herbivore interactions. In Sinclair A. R. E. & P. Arcese. *Serengeti II. Dynamics, Management and Conservation of an Ecosystem*. The University of Chicago Press: 91-113.
- Sinclair A. R. E., K. L. Metzger, S. A. R. Mduma & J. M. Fryxell (2015). *Serengeti IV. Sustaining Biodiversity in a Coupled Human-Natural System*. The University of Chicago Press.
- Van Thuyne J. & E. P. Verrecchia (2018). Fungus-growing termites as a geological agent transforming savanna landscapes. 16th Swiss Geoscience Meeting, Bern.
- Verchot L. V., N. L. Ward, J. Belnap, D. Bossio, M. Coughenour, J. Gibson, O. Hanotte, A. N. Muchiru, S. L. Philipps, B. Steven, D. H. Wall & R. S. Reid (2015). From bacteria to elephants: effects of land-use legacies on biodiversity and ecosystem processes in the Serengeti-Mara ecosystem. In Sinclair A. R. E., K. L. Metzger, S. A. R. Mduma & J. M. Fryxell. *Serengeti IV. Sustaining Biodiversity in a Coupled Human-Natural System*. The University of Chicago Press: 195-234.

11 | Le continuum du vivant

Le petit être avait glissé sur l'agrégat de terre. S'enfouissant dans l'apparente obscurité du terrain, il retrouva ses semblables. Pouvait-il leur donner un nom à chacun? Je n'en sais rien et n'en saurai sans doute jamais rien. Mais la reconnaissance de ces microscopiques bouts de vie semblait naturelle. Ils glissaient sur de longs fils qui les guidaient d'une place à l'autre. Certaines étaient de véritables carrefours dans lesquels des embouteillages n'étaient pas rares. Chaque petit être attendait sagement son tour. L'impatience pouvait-elle poindre au plus profond de son existence? Heureusement, c'était continuellement jour de marché. Les échanges se faisaient au gré des rencontres: eau, sucre, sels minéraux, toutes ces bonnes marchandises circulaient dans un flux continu. Parfois, souvent même, l'un de ces petits êtres disparaissait corps et âme à travers les membranes des filaments qui les guidaient. Tué, emprisonné ou protégé? Son sort était mystérieux. Servait-il de nourriture à de plus grands que lui? Sa chimie si particulière m'empêchait de croire que le système était aussi simple que cela. Manger ou être mangé, la Vie ne se résume-t-elle qu'à ce jeu? Non, une fois phagocyté, le petit être continuait son chemin. Peut-être bien ses fonctions avaient-elles changé. Protégé par les membranes d'un autre, il pouvait s'adonner à d'autres activités. Jeux, plaisir, travaux forcés? Encore une question sans réponse... Certains transformaient la lumière en énergie, d'autres construisaient des protéines en assemblant de petits bouts de

molécules, de minéraux, d'oligo-éléments. Non seulement ces mécanismes chimiques tenaient debout, mais ils étaient indispensables à l'existence de tous les autres êtres vivants. La manière dont ces chimistes travaillaient paraissait simple en soi, mais la multiplicité des tâches était d'une complexité telle qu'aujourd'hui encore nous n'en comprenons que quelques bribes.

Mises ensemble, partageant leur savoir serais-je tenté d'écrire, les cellules devenaient tissus et les tissus, organes. Les échanges ne s'arrêtaient jamais, dépassant les frontières de chaque organisme. Les petits êtres étaient partout, transmettant leur énergie à d'autres. La circulation se faisait dans tous les sens et pour tous : amibes, oribates, oomycètes. Dans ce monde terreur, les collembolles et les gamasides faisaient office de géants et les lombrics de titans ! Mais qu'on ne s'y trompe pas ! Au centre du corps de ce géant des géants vivaient aussi une foultitude de petits êtres dont la tâche était de transformer les repas du ver de terre, ramenant à l'état de minéraux les déchets organiques. Éjectés de la masse molle du géant, les éléments continuaient leur parcours, aidés par d'autres petits êtres qui les emmenaient voyager le long du réseau infini des mycéliums. Jusqu'où les menaient-ils ? Bien plus loin que les premières racines. Celles-ci étaient pourtant un passage obligé, l'une de ces étapes que nos récits mythologiques affectionnent. Après le tunnel du ver de terre, long couloir de la renaissance, le cap des mycorhizes, le pont qu'il faut traverser en répondant à une énigme : comment le champignon sait-il quelle dose de sels minéraux donner à la plante en échange d'un peu de sucre ? Farfadets, lutins, gnomes de nos cellules, avez-vous la réponse dans ce cycle incessant de la Vie ?

Coder la complexité : une « lecture commune »

L'énigme de l'organisation du vivant s'opacifie avec la complexification des organismes, à mesure que s'accroissent les associations d'eucaryotes, déjà eux-mêmes des symbioses. Ce mystère culmine donc dans les corps holobiotiques des plantes ou des animaux. Pourquoi dès lors faut-il que le vivant se développe en organismes de plus en plus complexes ? Tenter de répondre à cette question me semble nécessaire pour comprendre en quoi l'évolution est un processus global dont dépend chaque intervenant, et non pas une lutte des uns contre les autres. Il ne s'agit donc pas de penser « au plus apte », mais au « constamment adaptable ». Pour comprendre cela, il faut prendre de la hauteur, s'extirper

de l'attraction terrestre et proposer une explication qui, tout comme l'ont fait les astrophysiciens, soit universellement valable. C'est la raison d'être du postulat de base que j'ai présenté dans le chapitre 9 « Une question de vie ou de mort » :

Où qu'elle se situe dans l'Univers, mais en présence d'une source d'énergie, la vie s'auto-organise, dès son émergence sur un corps céleste, en un système qui lui est propre en ce lieu et qui évolue sous l'influence des conditions environnementales qu'elle rencontre.

Ce postulat est la clé de compréhension de ce que je nomme le « continuum du vivant ». Ce continuum s'exerce autant dans l'espace que dans le temps. S'il prend des formes variables, au gré d'événements cosmologiques ou géologiques imprévisibles, c'est qu'il doit sans cesse réussir à s'adapter aux conséquences de cette imprévisibilité. Toutefois, cette adaptation ne se fait pas en solitaire. Tous les organismes – plantes productrices d'énergie, herbivores, carnivores, détritivores et recycleurs de matière morte – doivent trouver ensemble la solution à une nouveauté, qu'elle soit petite comme une bille de plastique ou énorme comme l'impact d'une météorite. Ces liens, tissés entre tous les individus de toutes les espèces engagées dans le processus général du cycle de la Vie, impliquent une « lecture commune ».

Le langage biologique, que tout organisme terrien connaît, est celui du codage génétique des protéines qui, pour citer Lynn Margulis, « font d'un organisme ce qu'il est » (Margulis & Sagan 2002). Ainsi, le biologique se construit à partir du chimique (et de l'électrique). En effet, au moins sur Terre, deux macromolécules sont les « boîtes à outils chimiques » de cette codification : l'acide ribonucléique (ARN) et l'acide désoxyribonucléique (ADN). Elles sont présentes dans chacune des cellules du vivant (à quelques exceptions près, par exemple les globules rouges du sang des mammifères). Pour filer la métaphore, disons que la particularité de ces macromolécules est d'intégrer des « outils » appelés « bases nucléiques ». Celles-ci s'apparient entre elles et à des molécules de sucre et de phosphate, pour copier à l'identique toute ou partie de la macromolécule (ADN ou ARN) dont elles sont issues. L'objectif étant de produire les protéines dont la cellule a besoin. À chaque type de macromolécule correspondent spécifiquement quatre bases nucléiques (guanine, cytosine, adénine et uracile pour l'ARN ; guanine, cytosine, adénine et thymine pour l'ADN) et un sucre (ribose pour l'ARN et désoxyribose pour l'ADN).

Des deux boîtes à outils, l'ARN fut la première molécule codante à être apparue. Elle pouvait synthétiser quelques protéines essentielles à la survie des organismes primitifs et se répliquer, mais l'instabilité de son sucre, le ribose, la rendait particulièrement fragile, notamment dans l'eau. Certains biochimistes considèrent l'acide ribonucléique comme le précurseur de toutes les macromolécules biologiques dans un monde abiotique et vulnérable aux radiations ultraviolettes. Cette idée constitue l'élément de base de l'hypothèse du « monde à ARN », soutenant que l'apparition de la Vie s'est faite par une structuration de la chimie du carbone avec différents composés réducteurs tels que le sulfure d'hydrogène (Gilbert 1986 ; Patel *et al.* 2015). Si cette vision ne reste encore qu'une hypothèse, il faut toutefois relever la fragilité de la molécule. Sa durée de vie moyenne dans une cellule est estimée entre quelques minutes et quelques heures (Markham & Smith 1952). Cela a donc amené le vivant – qui et quand, on ne le sait pas – à développer une molécule beaucoup plus stable que l'ARN ; il s'agit de l'ADN qui stocke le matériel génétique d'un organisme de façon bien plus robuste, une fonction vitale pour celui-ci.

L'ADN doit sa stabilité à sa structure : les gènes sont stockés sur deux brins hélicoïdaux identiques et reliés par des paires de bases nucléiques (adénine-thymine et cytosine-guanine) faisant office de « tubulures » ; tant qu'il n'y a pas nécessité de duplication (par exemple lors de la division cellulaire) ou de transcription (en créant de l'ARN), les deux brins restent solidaires et garantissent donc la robustesse de la macromolécule. L'autre avantage est qu'il est rare que les deux brins soient endommagés en même temps au même endroit, si bien que, par réplication du matériel non endommagé, il y a possibilité de réparer le gène. Si l'accident n'est pas réparable, on parle alors de « mutation » ; un événement relativement fréquent chez certains virus qui ne possèdent que de l'ARN, mais d'autant plus rare chez les organismes à ADN que la taille de cette double hélice est grande (car plus stable et difficile à endommager). Ainsi, si le taux de mutation des bactéries (qui n'ont que quelques centaines de milliers de paires de base nucléiques) est encore relativement élevé, celui-ci devient négligeable chez les animaux dont le génome dispose de millions de paires de base : $1,8 \times 10^{-10}$ chez la souris et 5×10^{-10} chez l'être humain – soit une erreur de lecture sur 2 milliards de réplifications de paires de base (Sally 2016).

C'est l'une des justifications que l'on peut donner à la complexification des organismes vivants : après avoir réussi à entourer l'ARN d'une

membrane identitaire, le monde organique a développé l'ADN pour pérenniser son mécanisme de fabrication d'enzymes et de protéines, ainsi que le noyau pour maintenir l'autopoïèse de l'organisme, c'est-à-dire son fonctionnement par autoproduction de ses composantes dans un système «fermé» (Varela, Maturana & Uribe 1974; c'est moi qui ajoute des guillemets au terme «fermé»). Un système néanmoins suffisamment perméable aux stimulations extérieures afin d'évoluer et maintenir son homéostasie⁴¹, condition sine qua non pour conserver ses caractéristiques autopoïétiques; nous verrons dans le chapitre suivant en quoi consiste cette perméabilité.

Toujours est-il que la mise en place du système de stockage du matériel héréditaire qu'est l'ADN n'a pas fait disparaître celui, plus instable, de l'ARN, alors même que ce dernier est synthétisé à partir d'un segment spécifique d'ADN. Pourquoi? Simplement parce que les «faiblesses» de l'ARN, notamment sa simplicité, sont aussi des avantages qui le rendent nécessaire, voire essentiel, au fonctionnement du système. D'une part, sa structure à un seul brin et sa taille relativement modeste par rapport à celle de l'ADN lui permettent une rapidité d'exécution dans des activités diverses. D'autre part, l'ARN est polyvalent :

- L'ARN dit «messenger» (ARNm) sert de support temporaire à l'information génétique pour la codification d'une protéine (Ames & Martin 1964);
- L'ARN dit «ribosomique» (ARNr) est un catalyseur enzymatique, dont la principale fonction est de traduire la synthèse des protéines codées par l'ARNm;
- L'ARN dit «de transfert» (ARNt) a pour rôle de guider les acides aminés vers l'ARNr.

Contrairement à l'ARNm, l'ARNr et l'ARNt ne sont pas codants. Cependant, leur fonction de répression de gènes est tout aussi importante car elle permet de réguler la transcription d'informations non utiles afin d'éviter une trop grande dépense d'énergie.

⁴¹ Homéostasie: phénomène de régulation par lequel un organisme maintient les conditions de son système interne. On doit du reste l'invention de ce terme à Claude Bernard, médecin physiologiste français (1813-1878) dont il sera question dans quelques lignes.

Interdépendance

Dès lors, il faut considérer l'apparition de la double hélice d'ADN comme un complément et non un remplacement de l'ARN pour franchir un cap évolutif supplémentaire. Il en va de même dans la relation entre les organismes du continuum du vivant. On l'a vu dans les chapitres 5 «La Grande Oxydation...» et 7 «L'humain descend d'un tout», les entités «les plus simples» construisent par symbiose des entités plus complexes, mais ne disparaissent pas pour autant. Une fois la cellule eucaryote construite, le procaryote subsiste. De même, la cyanobactérie phagocytée par l'algue et devenue chloroplaste ne sonne pas le glas des cyanobactéries libres. Le rassemblement d'êtres unicellulaires en êtres multicellulaires ne provoque pas l'extinction du monde des unicellulaires. La raison en est que le complexe est façonné par le simple, ce dernier continuant à maintenir le flux de communication. Un échange continu d'informations à travers le temps et l'espace : c'est le principe même du continuum et la raison pour laquelle le langage chimique est resté commun à tous les organismes vivants.

Mais comment tout cela fonctionne-t-il ? Pour le comprendre, prenons le cas d'un scénario catastrophe auquel nous pourrions bien être confrontés si nous ne renonçons pas à nos manières d'apprentis sorciers. Je ne pense pas au dérèglement climatique, mais plutôt aux menaces qui pèsent sur la vie dans les sols et les eaux : imaginons que l'humain invente un fongicide tellement puissant qu'il efface tous les champignons de la surface de la planète, pas uniquement ceux qu'il croit être pathogènes, mais bien l'ensemble du monde fongique. Il se rendrait compte, mais un peu tard, des services rendus par les moisissures, mycoses et autres mycéliums. Non seulement le pain ne lèverait plus, mais ni la bière ni le vin ne fermenteraient. Les graines germeraient nettement moins bien. Les racines des plantes ne pourraient plus aller chercher des éléments vitaux comme le phosphore et le carbone, si importants pour le métabolisme énergétique de tous les êtres vivants. La décomposition de nos excréments serait ralentie. La dissolution des minéraux du socle rocheux ne se ferait plus, réduisant ainsi la capacité d'une redistribution dans différents cycles biologiques. Les lichens, symbioses entre une algue ou une cyanobactérie et un champignon, disparaîtraient. Dans les estomacs des mammifères, des oiseaux, des insectes et de tant d'autres animaux, la digestion serait beaucoup plus difficile, la lignine impossible à dégrader et la cellulose des feuilles indigeste. Les herbivores déclindraient,

entraînant dans leur chute les carnivores. De manière assez rapide, les espèces de vertébrés terrestres s'éteindraient les unes après les autres. On se retrouverait peut-être revenus 450 millions d'années en arrière lorsqu'un tandem algue-champignon aquatique partit à la conquête des milieux terrestres. Bien entendu, une chute de la température s'ensuivrait puisque les organismes producteurs de gaz carbonique, une fois morts, s'entasseraient en un gigantesque réservoir de carbone. La catastrophe serait sans doute moindre dans les eaux marines, les champignons aquatiques y jouant un rôle plus discret. Cependant, comme le pesticide aurait fait son œuvre antifongique également dans la zone intertidale des marées, les végétaux qui voudraient repartir à la colonisation des terres devraient certainement s'associer à d'autres organismes vivants. Une nouvelle symbiose se mettrait en place : peut-être entre une algue et un concombre de mer aux pigments protecteurs, ou plus probablement entre des organismes au métabolisme moins « compliqué » provenant du phyto- et du zooplancton. Le vivant choisirait d'autres voies exploratoires, oubliant qu'un jour il ait pu exister des fleurs parfumées, des abeilles pour les visiter et des êtres humains pour s'en parer.

Je n'ai pas la prétention de dire que c'est ce qu'il va se passer. Il ne s'agit que de l'un des scénarios possibles parmi une multitude. Mais retenons surtout que si l'un des acteurs du cycle des éléments disparaît, celui-ci s'effondre, entraînant avec lui une catastrophe majeure. Les exemples des différentes extinctions massives qui ont eu lieu depuis que la Vie cherche à s'épanouir sur la Terre (chapitres 5 « La Grande Oxydation... » et 6 « Extinctions, action, réaction ») démontrent également que les formes de vie évoluent et trouvent les solutions aux crises ensemble. On se rend compte dès lors que plus la Vie trouve de nouvelles solutions, plus elle a statistiquement de possibilités de subsister. C'est donc aussi une bonne raison pour elle de diversifier ses modes. L'exemple le plus parlant est celui de la radiation des mammifères et des oiseaux après l'extinction des dinosaures non aviens et des ptérosaures. La solution « organismes à sang chaud » mise en place par les terribles lézards leur a survécu sous la forme de petites « musaraignes » misérables (une chance pour nous !) et d'oiseaux cryptiques.

Nous pouvons tout de même encore nous poser la question de la nécessité de complexifier les organismes vivants. En effet, ne suffit-il pas aux bactéries, archées et eucaryotes unicellulaires de vivre heureux dans leur bouillon de culture ? Ou posée autrement, la question pourrait être : les bactéries peuvent-elles disparaître ? Cela a bien failli être

le cas lors de la Grande Oxydation, il y a plus de 2 milliards d'années (voir le chapitre 5). Mais vous me rétorquerez immédiatement qu'à cette époque, les organismes multicellulaires n'existaient pas. Bien vu ! Et c'est sans doute pour cela que le vivant a diversifié ses « us et coutumes ». Depuis 2 milliards d'années, les microbes ont fait un sacré travail. Ils en ont construit des cathédrales, ou plutôt des écosystèmes nouveaux. Il n'y a qu'à penser au microbiote du tractus digestif des vaches ou des humains.

Chez les ruminants, il existe un incroyable bassin de fermentation anaérobie d'herbes de plus de 200 litres dans lequel se développent à foison des bactéries, des archées, des levures et des protozoaires, formant une communauté de base (*core gut microbiota* en anglais) de plusieurs dizaines d'espèces (Krause & Russell 1996; Whitford, Teather & Forster 2001; Petri *et al.* 2013). Rien que dans la panse (ou « rumen ») d'une vache, on estime qu'il y a entre 25 et 50 milliards de bactéries et archées, plusieurs millions de champignons unicellulaires et plusieurs centaines de milliers de protozoaires. Si les bactéries et champignons s'occupent de la fermentation et digèrent la cellulose, quelques espèces d'archées s'occupent de la méthanogenèse, aboutissant à la production de plus de 500 litres de méthane par jour et par vache.

En consultant les données de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), nous pouvons connaître le nombre d'individus de chaque espèce domestiquée par *Homo Sapiens*. C'est ainsi que la population mondiale de vaches oscille entre 1,3 et 1,6 milliard d'individus durant la dernière décennie (FAO 2019). Un petit calcul s'impose. Selon les données à disposition, nous pouvons estimer que l'écosystème « panse de vache » atteint un volume mondial de 280 milliards de litres (0,28 km³), soit l'équivalent de petits lacs comme celui de Neusiedl près de Vienne, ou du Der-Chantecoq en Champagne française. Cela ne paraît pas exceptionnel, mais en termes de population de microbes, cela représente 75 milliards de milliards d'individus (7,5×10¹⁹), soit une niche écologique non négligeable pour des organismes qui effectuent des processus métaboliques essentiels à l'échelle des écosystèmes planétaires. Cette masse est du reste prise en compte dans les calculs d'empreinte écologique, puisqu'on estime que les ruminants domestiques émettent 18 % des gaz à effets de serre (méthane et gaz carbonique; FAO 2006) !

Bien entendu si, dans mes estimations, j'ajoutais l'ensemble des ruminants – chèvres, moutons, mais aussi gnous, antilopes et

girafes –, l'existence d'un monde microbien interne à ces herbivores n'en serait que plus marquante pour notre esprit. L'idée que les êtres multicellulaires soient des écosystèmes protecteurs pour des bactéries et des champignons est sérieuse. J'ai déjà évoqué le fait que la végétation dominante actuelle est celle des plantes à fleurs, apparues il y a moins de 140 millions d'années. Certaines familles végétales ont réussi à développer des toxines afin de ne pas être ingérées par les ruminants. Je pense aux solanacées et aux renonculacées notamment, mais les agriculteurs connaissent aussi bien les problèmes d'intoxications dues par exemple aux nielles des blés ou au chiendent commun. Si toutes les plantes étaient toxiques aux grands herbivores, ils n'existeraient tout simplement pas. Les microbes contenus dans leur système digestif devraient trouver d'autres lieux pour digérer la cellulose ou la lignine. Ils pourraient le faire dans les sols ou dans le système digestif des insectes tels que le criquet migrateur. Toutefois, les bactéries et levures qui pratiquent la fermentation et les archées méthanogènes n'y trouveraient pas leur compte, à part dans certains sols anaérobies de milieux marécageux.

Le microbiote humain

Et l'humain ? Lui aussi est là pour manger ! Toutefois, contrairement aux ruminants, son système digestif débute par un bain « décapant ». Ses aliments passent d'abord dans une solution acide dont le pH peut s'abaisser jusqu'à 1,5, rendant le milieu pratiquement stérile (mais pas tout à fait puisque des micro-organismes hyperspécialisés s'y rencontrent et jouent un rôle non négligeable) et comparable à certaines sources thermales volcaniques ! Les sucs digestifs se chargent de ramollir les tissus ingérés et, avec l'aide des mouvements musculaires de l'estomac, transforment l'ensemble des aliments en une pâte migrant vers l'intestin grêle. Dès cette étape franchie, les particules non digérées se retrouvent en présence de plusieurs centaines d'espèces de bactéries, de champignons unicellulaires et de protozoaires. Plus de 10 000 milliards de microbes s'épanouissent le long des 7,5 mètres de nos intestins. Leur présence nous aide à fractionner les aliments en molécules assimilables par notre sang. Ce monde microscopique produit également des acides aminés et des vitamines indispensables pour notre bien-être et, nous l'avons vu dans le chapitre 2 « Avoir les yeux plus gros que le ventre », influence durablement nos humeurs ! Pourquoi

fait-il tout cela? Pour maintenir en excellent état de fonctionnement «l'usine organique» homéostatique qui lui permet de concentrer l'énergie favorable à son propre développement.

À la moindre alerte – par exemple une toxine indésirable –, les microbes se mobilisent. Un exemple bien connu est celui de la tolérance à la daidzéine, une substance cancérigène produite par le soja qui trompe notre organisme en se faisant passer pour une hormone naturelle de notre corps. Certaines bactéries de notre biote ont démasqué l'astuce et peuvent transformer la daidzéine en un dérivé (le S-équol) aux effets beaucoup plus bénéfiques, anticancéreux, œstrogéniques et protecteurs contre la décalcification! Mais le soja étant une plante du Sud-Est asiatique, la présence des microbes protecteurs est beaucoup plus importante chez les populations asiatiques (60 %) qu'européennes (25 %) (Zhang *et al.* 1999).

L'effet de contrôle de notre organisme par le microbiote va plus loin encore. Nous savons que la digestion est régulée par le système nerveux entérique (Goyal & Hirano 1996). Celui-ci se compose de plusieurs centaines de millions de neurones indépendants du système nerveux central. Il contrôle, grâce à des neurotransmetteurs tels que l'acétylcholine, l'adrénaline et la noradrénaline, la motilité des mouvements péristaltiques et la production des sucs digestifs. On sait aussi que 50 % de la dopamine de notre corps et plus de 90 % de la sérotonine sont produites au niveau du système nerveux entérique! Mais nous avons également vu dans le chapitre 2 «Avoir les yeux plus gros que le ventre» que les bactéries du microbiote savent produire ces molécules, ou du moins influencer directement leur production. Cela implique que cette partie du système nerveux autonome, tout comme le système endocrinien, est sous l'influence de micro-organismes capables de maintenir l'homéostasie corporelle en détectant les substances délétères contenues dans nos aliments, puis en corrigeant, dans la mesure du possible, leur propre métabolisme, afin de trouver une solution au problème d'intoxication.

L'individu multiple

Il semblerait donc que la complexité des êtres vivants réponde à la nécessité d'établir des solutions «stables» pour que la totalité des cycles métaboliques mis en place sur la Terre soit maintenue. D'une part, la tendance à une diversification des êtres vivants pourrait également

bien être une réponse au principe d'entropie : en garantissant des systèmes homéostatiques protecteurs, les organismes endosymbiotiques s'assurent un meilleur rendement de transmission de l'information, luttant ainsi contre le désordre et la dispersion de l'énergie. Cela expliquerait d'autre part les radiations rapides et l'augmentation de la biodiversité tout aussi importante après les épisodes d'extinction massive.

Par rapport à ce que vous venez de lire, une conclusion s'impose : l'humain n'est pas uniquement humain (et la vache n'est plus si vache !). Il est l'expression d'une communauté biologique plus forte, celle de bactéries et de micro-organismes qui se sont assemblés pour mieux se protéger, temporairement, de conditions extérieures pouvant devenir dangereuses, voire délétères. Nous pouvons conclure cela pour tous les organismes multicellulaires. Cependant, notre organisme est beaucoup trop complexe et fragile pour survivre à des événements exceptionnels (cataclysmes naturels ou anthropogènes). Si un tel scénario devait se produire, la Terre connaîtrait à nouveau une extinction massive des organismes les plus complexes (dont font partie les animaux à sang chaud, oiseaux et mammifères, mais également les plantes à fleur). Elle affecterait aussi les organismes les plus « simples », mais de ces êtres vivants « rudimentaires » émergeraient de nouvelles solutions viables dans un environnement nouveau. De même, les voyages dans l'espace ne donnent statistiquement aucune chance aux multicellulaires de survivre à long terme. De fait, c'est dans ses expressions les plus simples que la Vie est la plus robuste, car ce sont elles qui ont conservé la plus grande capacité à partager et à assimiler l'information génétique du continuum du vivant.

Bibliographie

- Ames B. N. & R. G. Martin (1964). Biochemical aspects of genetics: The operon. *Annu. Rev. Biochem.* 33 : 235-258.
- FAO (2006). Livestock's long shadow. Environmental issues and options. Rapport de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. FAO.
- FAO (2019). Crops and livestock products. www.fao.org/faostat/en/#data/QCL (consulté le 30.01.2024). FAO.
- Gilbert W. (1986). Origin of life. The RNA World. *Nature* 319 : 618.
- Goyal R. K. & I. Hirano (1996). The enteric nervous system. *The new Engl. J. of Med.* 334(17) : 1106-1115.
- Krause D. O. & J. B. Russell (1996). How many ruminal bacteria are there? Symposium Ruminal Microbiology. *J. Dairy. Sci.* 79 : 1467-1475.
- Margulis L. & D. Sagan (2002). *L'univers bactériel*, 2^e éd. française. Albin Michel/Le Seuil, Paris.

- Markham R. & J. D. Smith (1952). The structure of ribonucleic acids 1. Cyclic nucleotides produced by ribonuclease and by alkaline hydrolysis. *Biochem.J.* 52(4) : 552-557.
- Patel B. H., C. Percivalle, D. J. Ritson, C. D. Duffy & J. D. Sutherland (2015). Common origins of RNA, protein and lipid precursors in a cyanosulfidic protometabolism. *Nature Chemistry* 7 : 301-307.
- Petri R. M., T. Schwaiger, G. B. Penner, K. A. Beauchemin, R. J. Forster, J. J. McKinnon & T. A. McAllister (2013). Characterization of the core rumen microbiome in cattle during transition from forage to concentrate as well as during and after an acidotic challenge. *PLOS ONE* 8(12) : e83424.
- Scally A. (2016). The mutation rate in human evolution and demographic inference. *Current Opinion in Genetics & Development.* 41 : 36-43.
- Varela F. G., F. H. Maturana & R. Uribe (1974). Autopoiesis: the organization of living systems, its characterization and a model. *Biosystems* 5 : 187-196.
- Whitford M. F., R. M. Teather & R. J. Forster (2001). Phylogenetic analysis of methanogens from the bovine rumen. *BMC Microbiology* 1 : 5.
- Zhang Y., G. J. Wang, T. T. Song, P. A. Murphy & S. Hendrich (1999). Urinary disposition of the soybean isoflavones daidzein, genistein and glycitein differs among humans with moderate fecal isoflavone degradation activity. *The Journal of Nutrition* 129(5) : 957-962.

12 | Un trafic génétique continu

Conséquence d'une construction de plus en plus complexe garante du maintien de l'écosystème, l'être multicellulaire doit posséder des filtres dans son traitement de l'information génétique, garde-fous qui freinent les changements aléatoires de son génome et garantissent son homéostasie. L'hypothèse selon laquelle le taux de changement des codifications génétiques diminue avec la complexité de l'organisme peut-elle être vérifiée ?

Transferts verticaux ou horizontaux

Chez les organismes multicellulaires – y compris l'humain –, les études génétiques se sont concentrées durant tout le XX^e siècle sur les transferts « verticaux » des gènes, c'est-à-dire par hérédité d'un parent à son descendant. Un processus sur lequel s'appuie la théorie synthétique de l'évolution, selon laquelle des mutations codées par erreur et transmises à la descendance sont conservées si elles s'avèrent bénéfiques (voir chapitre 8, « Théories de l'évolution, évolution des théories »). Or, depuis peu, les recherches sur un autre type de transferts dits « horizontaux » se multiplient, démontrant qu'ils sont beaucoup plus rapides que ce que l'on suspectait et qu'ils peuvent toucher n'importe quel organisme, du plus simple au plus complexe (Baptiste 2017). L'étude la plus parlante sur ce sujet est celle qui a permis de se rendre

compte de la capacité des Japonais à digérer les fibres d'algues rouges grâce à la présence de gènes de la bactérie marine *Zobellia galactanivorans* dans l'ADN de la bactérie *Bacteroides plebeius*, l'une des composantes de leur microbiote (Hehemann *et al.* 2010).

On parle de transfert «horizontal» (ou «latéral») de gènes lorsqu'un être vivant donne des gènes à un autre être vivant qui n'est pas son descendant, ou qu'il en reçoit d'un autre organisme qui n'est pas son ancêtre. Fréquent chez les bactéries et les archées (Garcia-Vallvé, Romeu & Palau 2000), ce processus est assez commun chez les eucaryotes unicellulaires. Il est beaucoup plus rare chez les multicellulaires, ou plutôt à effet moins direct sur leur génome, mais tout aussi courant si on applique le concept d'hologénome qui prend en compte tout le matériel génétique de l'hôte et de son biote (Rosenberg & Zilber-Rosenberg 2013). Des exemples peuvent être cités dans tous les groupes vivants et même entre différents groupes, à l'exemple de la production de pigments caroténoïdes chez les pucerons par transfert de gènes provenant de champignons (Moran & Jarvik 2010)! Les transferts horizontaux peuvent se faire entre deux individus de la même espèce ou d'espèces différentes, et ceci de trois manières différentes: par conjugaison, transformation ou transduction.

La conjugaison

La *conjugaison* est le plus simple des transferts horizontaux, mais peut-être pas le plus répandu. Exclusivement réalisée par des bactéries et par quelques levures unicellulaires, elle consiste au transfert unidirectionnel d'un brin d'ADN d'un microbe à un autre, d'une cellule donatrice vers une cellule receveuse. Le vecteur de ce transfert est le «plasmide», une molécule d'ADN circulaire constituée de deux brins complémentaires, différente de l'ADN chromosomique présent dans la cellule, qui peut se répliquer par elle-même grâce à des gènes particuliers (plusieurs plasmides peuvent être présents dans la même cellule).

Lorsqu'il y a conjugaison, la donatrice utilise l'un de ses pili⁴² sexuels (il peut y en avoir trois chez certaines espèces) qui vont servir de pont chimique de reconnaissance pour «aborder» la receveuse. Une interaction protéinique va agir entre le pilus et la membrane de

⁴² Chez les bactéries, un pilus est un appendice allongé, situé sur la paroi cellulaire, mais ne participant pas à la mobilité de l'organisme.

la receveuse; si celle-ci «accepte l'échange», le pont se réduit, rapprochant les deux cellules jusqu'à former un agrégat qui sera stable le temps du transfert, soit quelques minutes (dans le cas contraire – par exemple quand une donatrice rencontre une autre donatrice – le contact dure à peine 40 millisecondes). Pour le transfert, la membrane de la receveuse est perforée par le pilus de la donatrice, puis plusieurs protéines vont entrer en jeu: un premier type pour couper l'ADN du plasmide de la donatrice, un deuxième pour désenrouler et déplacer l'un de ses brins vers la receveuse, un troisième pour stabiliser ce brin (alors fragile) en attendant sa réplication en un second brin, et enfin un quatrième pour réunir les deux brins (l'original et sa copie) afin de reconstituer un plasmide. Grâce aux gènes qu'elle vient d'obtenir, la receveuse devient donatrice à son tour, contribuant au brassage génétique intercellulaire! Notez encore que la transmission d'ADN chromosomique peut parfois se réaliser par conjugaison, mais uniquement entre individus de la même espèce (bien que cette notion devienne floue dans le monde des microbes).

La transformation

La *transformation* est la deuxième voie possible de transfert. Il s'agit de l'intégration directe d'un fragment d'ADN étranger par un organisme dans son propre génome. À la différence de la conjugaison, cette action se réalise entre une bactérie morte, en l'occurrence «feu la donatrice», et une bactérie vivante, la receveuse. Ce mode de transfert implique un état particulier de cette dernière, définie en anglais sous le terme de *competence*. Cette «compétence» s'exprime lorsque les conditions environnementales dans lesquelles évolue le microbe changent. La tendance à la capture d'ADN «nu» est maximale lorsque la nourriture fait défaut ou qu'un facteur abiotique particulièrement défavorable intervient; par exemple l'arrivée d'un antibiotique dans le milieu de développement du microbiote. Cette catastrophe chimique cause des dommages souvent irréversibles dans les génomes des bactéries présentes et entraîne la mort d'un grand nombre de microbes. Dans ces conditions, certaines bactéries deviennent «compétentes» pour récupérer un fragment d'ADN de voisines tuées par l'agent chimique. Même s'il fait intervenir un grand nombre de complexes protéiniques, le principe du processus est plus simple qu'il n'y paraît. La lyse de la (ou des) membrane(s) d'une bactérie débute dès sa mort. Cette

décomposition provoque la dispersion des éléments qui étaient contenus dans la cellule, notamment les plasmides. Ceux-ci, fragiles, vont également commencer à se détériorer si des bactéries « compétentes » ne s'en préoccupent pas. Un microbe capture un plasmide en l'accrochant à l'un de ses pili sexuels qui, par rétraction, lui permet de traverser la membrane. C'est alors que des enzymes, dites « enzymes de restriction », réussissent à fragmenter la molécule d'ADN en nucléotides. Une autre enzyme, la « ligase », se charge de lier ces fragments exogènes, non pas à l'un de ses propres plasmides mais directement à l'ADN chromosomique. Ainsi le nouveau matériel génétique est intégré dans le pool héréditaire, c'est-à-dire les gènes qui seront transmis aux descendants par simple division cellulaire. Contrairement à ce qui s'est passé lors de la conjugaison, il ne s'agit pas d'une donation intercellulaire entre deux individus, mais d'une capture de matériel génétique à l'extérieur de la cellule.

Si le terme est rarement utilisé par les microbiologistes, il s'agit bien là d'un recyclage (aboutissant à une transformation) du matériel génétique. J'insiste sur ce terme, car contrairement à ce qui se passe dans le domaine des manipulations génétiques mises en place par l'être humain, la bactérie récupère un plasmide dans des conditions précises dont nous ne sommes pas encore en mesure de saisir les implications. J'en veux pour preuve logique le développement de résistance des microbes aux antibiotiques. Des études centrées sur le pneumocoque (*Streptococcus pneumoniae*) décortiquent ses capacités de transformation génétique. Cette bactérie du groupe des streptocoques peut, en condition de stress intense pour elle, se multiplier rapidement dans le corps de son hôte en provoquant des infections telles que différentes formes de pneumonie, de méningite ou d'otite. Pour mesurer l'impact d'une telle plasticité évolutive, il est utile de rappeler que les infections à pneumocoques causent chaque année la mort de plus de 700 000 enfants de moins de 5 ans (O'Brien *et al.* 2009). Il est donc légitime de chercher à s'en prémunir en développant des antibiotiques. Malheureusement, des molécules médicamenteuses telles que la mitomycine ou la fluoroquinolone induisent des transferts de gènes chez les pneumocoques (Claverys, Prudhomme & Martin 2006) qui augmentent leur protection contre les antibactériens (Engelmoer & Rozen 2011).

De manière plus générale, les chercheurs ont testé soixante-quatre molécules toxiques sur la bactérie *Legionella pneumophila*, afin de savoir

si elles induisaient un état de «compétence» chez cette espèce. Seule l'action de six d'entre elles faisait réagir le microbe dans le sens d'une recherche de transformation génétique (Charpentier *et al.* 2011). Le caractère commun à ces molécules (norfloxacin, ofloxacin, acide nalidixique, mitomycine C, bicyclomycine et hydroxyure) est la capacité à endommager les brins d'ADN de la bactérie. Or, les microbes tels que les pneumocoques, qui ont la capacité de recycler du matériel génétique prélevé sur une cellule morte, l'utilisent pour réparer leur propre ADN chromosomique. Cela implique l'expression d'une multitude de gènes, correspondant à un coût énergétique élevé (Peterson *et al.* 2000). Ces résultats suggèrent que la mobilisation de la bactérie ne se fait ni à la légère, ni au hasard (donc pas par erreur comme le prétend la théorie synthétique de l'évolution)!

Les virus et la transduction

La troisième manière de transférer des gènes d'un individu à l'autre sans passer par la reproduction sexuée est celle de la *transduction* qui met en scène un agent viral comme transporteur de gènes d'une bactérie donatrice à une bactérie receveuse. Avant de décrire cette voie, il est donc nécessaire de faire connaissance avec le monde des virus, car la science bute sur l'essence même de leur «nature».

Le problème, déjà exposé dans le chapitre 9 «Une question de vie ou de mort», réside dans la définition du «vivant». Si l'on s'en tient à le définir comme un «caractère propre aux êtres possédant des structures complexes (macromolécules, cellules, organes, tissus) capables de résister aux diverses causes de changement, aptes à renouveler, par assimilation, leurs éléments constitutifs (atomes, petites molécules), à croître et à se reproduire», les virus ne sont pas des êtres vivants. Pourtant, les virologues ont développé un système de classification en six groupes divisés en familles et genres, en tout point comparable à celui proposé pour les espèces⁴³. Il existe également une phylogénie, c'est-à-dire «une expression des liens de parenté entre êtres vivants» de certains groupes de virus! De fait, cela semble logique puisque les virus interagissent avec des organismes et s'emparent de leur matériel génétique pour réaliser la synthèse de protéines dont ils ont besoin. Et

⁴³ La classification est proposée par l'International Committee on Taxonomy of Viruses (ou «comité international de taxonomie des virus»).

comme ce sont les champions du piratage génétique, il est nécessaire de les étudier de plus près pour comprendre le rôle qu'ils pourraient jouer dans l'évolution (Forterre 2016; Koonin & Starokadomskyy 2016).

L'histoire « humaine » des virus débute mal. Le latin *virus* signifie suc, jus, humeur mais aussi venin, poison, mauvaise odeur, puanteur ou encore infection ; la première mention connue serait celle du poète romain Virgile qui fait état d'un « liquide sanieux et purulent ». Le mot apparaît pour la première fois en français en 1478, dans une traduction du livre *La Grande Chirurgie* (ou « Guidon ») de Guy de Chauliac⁴⁴, où il semble désigner l'effet d'une maladie déclarée : « substance qui recèle l'agent du contage et est capable de transmettre la maladie »⁴⁵. Repris à la fin du XIX^e siècle, lorsque les bactériologistes peuvent enfin observer l'infiniment petit à l'aide de microscopes de plus en plus performants, le terme virus prend son sens commun d'aujourd'hui de « micro-organisme infectieux ». Pasteur parle même de « virus virulent » (Pasteur 1880), du bas latin *virulentus* signifiant venimeux. « Virulent » s'étendra à un sens plus général au Moyen Âge en désignant quelque chose d'infectieux ou de contagieux. Malgré cette apparente tautologie, la proposition de Pasteur est judicieuse, car si tous les virus « parasitent » leur hôte, une petite proportion seulement semble dangereuse. Sur plusieurs milliers de virus connus chez *Homo Sapiens*, un peu plus d'une centaine sont (ou deviennent) pathogènes (Cornillon 2010). Un individu en bonne santé porte en moyenne une dizaine d'infections virales (Virgin 2014). En outre, le corps humain héberge un million de milliards de virus, soit cent fois plus que les cellules qui le constituent (de Vos & Nieuwdorp 2013) ! Mieux encore, 8 % du génome humain est d'origine virale, puisqu'on a pu déterminer qu'il contenait plus de 450 000 fragments de gènes de rétrovirus (IHGSC 2001). La définition moderne du virus en tant que « germe pathogène » est donc fausse.

Bien qu'il possède un acide nucléique et des protéines, un virus n'a pas de membrane cellulaire, mais peut l'emprunter à l'hôte qu'il pénètre. Cette enveloppe sera alors composée d'une double couche de lipides dont les composants peuvent être d'origine virale ou issus de l'hôte. À quelques exceptions près, un virus ne possède qu'un acide nucléique – soit un ADN, soit un ARN – protégé par une « coque » appelée « capsid ». Toutefois, il est incapable de se reproduire, ou plus

⁴⁴ Guy de Chauliac (1300-1368), parfois considéré comme le père de la chirurgie moderne.

⁴⁵ Citation extraite du Centre national de ressources textuelles et lexicales (www.cnrtl.fr/etymologie/virus; consulté le 31.07.2019).

précisément de se dupliquer seul, car il ne possède pas de métabolisme propre. Il doit nécessairement pénétrer une cellule-hôte et se l'approprier. Selon qu'il soit un virus à ADN ou un virus à ARN, sa réplication ne suit pas exactement la même voie. On peut toutefois déterminer un processus général qui commence par l'attachement du parasite à la membrane cellulaire de l'hôte grâce à un récepteur protéinique de celui-ci chez les êtres hétérotrophes. Selon son type, le virus pénètre alors dans la cellule soit en se laissant entourer par la membrane (endocytose), soit en fusionnant avec celle-ci. Le virus libère alors son acide nucléique afin que débute sa réplication grâce au système métabolique de l'hôte. Celle-ci se fait par copie transitoire du génome en ARN messenger, puis par synthèse des protéines à partir de l'information comprise dans l'ARN messenger. Les «copies» peuvent être multiples. Chacune d'elles est à son tour protégée par une capsid dont les éléments proviennent des membranes de la cellule-hôte. Les nouveaux virus (également nommés «virions») sont alors libérés à l'extérieur de la cellule et iront chacun à la recherche d'une nouvelle cellule.

Au cours de ce processus, il arrive qu'un fragment non dégradé d'ADN de la bactérie «donatrice» soit empaqueté avec le reste du génome viral. Le virion porteur de ce génome recomposé sera donc le «transducteur» du fragment d'ADN de la bactérie 1 vers la bactérie 2 qui est la receveuse accidentelle. Lorsqu'il libère son acide nucléique, le fragment d'ADN transporté est intégré dans l'ADN chromosomique du second microbe par recombinaison homologue issue d'une cassure de ce matériel héréditaire; c'est le principe de la *transduction*. Cette recombinaison doit se faire avant le processus de division cellulaire, sans quoi il y a perte de l'information génétique. Par conséquent, cette troisième voie de transfert horizontale semble moins ciblée que celles de la conjugaison et de la transformation.

Néanmoins, et bien que notre vision anthropocentrique ne voie dans le *modus vivendi* du virus qu'un acte de sabotage (destruction de cellule), cette capacité de «libre transport de gènes» pourrait bien constituer les prémices des processus «symbio-parasitiques» de toute la chaîne du vivant. J'ai signalé ci-dessus que 8 % du génome humain était le résultat d'activités virales, plus précisément rétrovirales. La famille des rétroviridés est, en l'état actuel de nos connaissances, un groupe de virus qui n'agit que chez les vertébrés. Ceux-ci ont développé plusieurs enzymes dont les moyens d'action ont de larges conséquences pour leur hôte. Plus particulièrement, l'enzyme «transcriptase

inverse» permet de transcrire son génome composé d'un brin d'ARN en synthétisant un second brin afin d'obtenir de l'ADN. Après avoir été répliqué, cet ADN viral sera alors transféré dans le noyau de la cellule-hôte et intégré à son génome par l'effet d'une autre enzyme virale nommée naturellement «intégrase». Le problème principal est que la transcription n'est jamais fidèle (certains parleront d'erreur), rendant la copie non seulement différente de l'original, mais également des autres copies. C'est du reste cette grande variabilité des copies virales, toutes différentes les unes des autres, qui rend impossible la mise en place d'un vaccin pour lutter contre un rétrovirus pathogène, tel que le VIH (à l'origine du Sida ou «Syndrome d'immuno-déficience acquise»).

Du parasite pathogène au vecteur évolutif

Tant qu'il considère que la relation virus-hôte s'organise uniquement dans le sens d'un parasitisme pathogène, l'être humain ne peut pas concevoir que le transfert d'information génétique virale serve à quoi que ce soit dans l'échange d'informations qui dynamise le continuum du vivant. Fort heureusement, depuis quelques années, plusieurs recherches font état d'actions virales bénéfiques pour l'individu qui les héberge. On connaît de nombreux germes viraux que certaines bactéries utilisent pour lutter contre d'autres bactéries. Ce scénario darwinien est connu sous le terme de «lysogénie» (Jacob 1954). Il a par exemple été démontré que les surfaces muqueuses de l'ensemble des animaux étaient protégées par des bactéries associées à leurs phages qui en augmentaient le pouvoir immunitaire (Barra *et al.* 2013). Je citerais comme deuxième exemple le cas du puceron *Acyrtosiphon pisum* (ou «puceron vert du pois») dont la bactérie endosymbiotique *Hamiltonella defensa* produit une toxine obtenue à partir de l'information génétique contenue dans un virus endogène, substance qui tue les larves de la guêpe parasitoïde *Aphidius ervi* (Oliver *et al.* 2009). Et ce sont également des virus qui, par encodage génétique, induisent le développement des ailes d'autres pucerons, favorisant ainsi leur dispersion (Guerra 2011; Ryabov *et al.* 2009). D'autres exemples pourraient être cités, tant en biologie marine (Rumpho *et al.* 2008; Atad *et al.* 2012) qu'en botanique (Han *et al.* 2012; Márquez *et al.* 2007).

Les recherches concernant l'importance des virus pour l'être humain n'ont véritablement commencé qu'au début de ce siècle. Plusieurs recherches ciblées sur le Sida ont ainsi pu démontrer que la virulence

du virus HIV-1 progressait plus lentement si les sujets étaient également infectés par un virus de l'hépatite G (Tillman *et al.* 2001). Des cas de disparition de l'infection à HIV-1 en présence de cytomégalo-virus humains ont également été rapportés (King, Baillie & Sinclair 2006). De même, la présence du virus de l'hépatite A peut effacer l'infection causée par le virus de l'hépatite C (Deterding *et al.* 2006). Si l'interférence entre les virus semble évidente, la manière dont les uns et les autres interagissent n'est pas encore très claire. Une étude sur le virus de l'herpès a pu démontrer que celui-ci conférait à son hôte une protection accrue contre les infections microbiennes. Les auteurs de l'étude concluent du reste de cette manière :

Bien que les capacités d'oubli par le système immunitaire et la persistance à long terme des virus de l'herpès soient uniquement envisagées comme pathogènes, nos observations suggèrent que leur latence peut être considérée comme symbiotique, amenant aussi des avantages immunitaires à leur hôte (Barton *et al.* 2007; traduction par l'auteur).

Avec cette incursion dans le monde viral, on se rend compte que la rapidité des changements génétiques atteint son paroxysme et que le transfert de gènes, tant horizontal que vertical, est beaucoup plus rapide que le changement génétique par mutation. Mais à quoi cela peut-il bien servir ?

Si 8 % du génome d'*Homo Sapiens* est un codage dû à l'activité de rétrovirus, on peut imaginer qu'il en va de même pour celui d'autres organismes multicellulaires. Ne serait-ce donc pas là un rôle majeur du monde viral dont le sens nous échappe encore ? En l'occurrence, de nombreux rétrovirus sont devenus endogènes et partagent l'histoire commune des vertébrés depuis des dizaines de millions d'années (Rosenberg & Zilber-Rosenberg 2013). Si la plupart des fonctions génétiques héritées de virus nous sont encore totalement inconnues, certaines d'entre elles codent des protéines essentielles. C'est le cas de la syncytine, une glycoprotéine composée de 538 acides aminés qui, chez la femme, est retranscrite depuis la paire de chromosomes 7. Cette protéine permet de faire fusionner des membranes cellulaires pour aboutir à une cellule plus grande avec plusieurs noyaux. Elle est activée sept jours après la fécondation de l'ovule, permettant la nidation de l'embryon et le développement du placenta, notamment le syncytiotrophoblaste. Ce tissu placentaire va développer des cavités dès le

neuvième jour de grossesse, permettant un contact étroit entre les vaisseaux sanguins du fœtus et la muqueuse utérine. Il assure ainsi le flux nutritionnel et respiratoire. Mais le rôle de la syncytine ne s'arrête pas là : elle modifie également le système immunitaire de la mère pour qu'il reconnaisse l'embryon et ne le rejette pas (Noorali *et al.* 2009). Fait curieux, chez la souris, une protéine analogue à la syncytine humaine est codée à partir d'un autre type de rétrovirus endogène, exprimant peut-être la forte potentialité d'échanges de gènes. Notez encore que, dès le début de l'embryogenèse d'un vertébré (en l'occurrence une souris pour l'étude), l'expression des gènes des rétrovirus est contrôlée par une protéine spécifique (Rowe *et al.* 2010).

Ces informations me semblent primordiales car elles enrichissent l'histoire de l'évolution d'une espèce d'une approche embryologique, non pas dans le sens d'une théorie de la récapitulation selon laquelle « l'ontogenèse récapitule la phylogenèse » (Haeckel 1866), mais par le fait que des informations génétiques du passé, héritées parfois depuis des millions d'années, sont encore traitées, contrôlées et stockées aujourd'hui.

Un avantage essentiel

Ces capacités d'échange interspécifique de gènes sont encore complétées par le mécanisme de *transposition* permettant de déplacer librement, sur un même matériel génétique ciblé (qu'il soit de l'ARN ou de l'ADN), une séquence (ou « transposon ») de ce matériel. On sait que la moitié du génome de l'être humain est constituée d'éléments transposables devenus apparemment fixes par contrôle enzymatique, mais qui peuvent être réactivés sous certaines conditions. Tous les organismes vivants possèdent cette possibilité de transposer une partie de leur génome. Elle est considérée comme une source importante de brassage génétique, de facteur d'évolution et de diversification du vivant (Wessler 2006).

Afin de clore ce chapitre sur l'aperçu des capacités étendues d'échange génétique, il faut également souligner que la migration est aussi source de mélanges génétiques, dynamisant les processus de transferts que je viens de décrire succinctement. La migration la plus dynamisante à laquelle je pense n'est pas celle des oies sauvages, des gnous ou des baleines, mais bel et bien celle des bactéries. En effet, après ce que nous venons d'apprendre sur les capacités étendues

d'échange de matériel génétique, nous pouvons imaginer le scénario qui prévalait il y a 2 à 3 milliards d'années...

Isolées dans leur marais salant ou leurs sources thermales, les bactéries avaient beau s'échanger des gènes, elles « stagnaient » ou, au mieux, « tournaient en rond ». L'arrivée de nouveaux microbes, par inondation, éboulement ou tout autre événement naturel (considéré par *Homo Sapiens* comme de nature catastrophique), était donc un facteur de diversification extraordinaire ! Chaque rencontre était un « franc bazar » où tout était possible, le meilleur comme le pire de notre point de vue. Les bactéries se transmettaient leurs gènes comme nous échangeons nos adresses dans un congrès de biologistes ; les virus s'en donnaient à cœur joie pour passer d'un microbe à l'autre en occasionnant de petits hold-up dont ils redistribuaient le butin aux voisins. Cette joyeuse entropie donnait des ailes à chacun, que certains brûlaient au soleil, tandis que d'autres mettaient à profit pour emmener la Vie dans une direction inconnue. Mais pour que cela puisse continuer, il s'agissait de rester en contact, de ne pas perdre le vocabulaire chimio-électrique du vivant terrestre. C'est pourquoi tout ce petit monde continuait, coûte que coûte, à échanger ses gènes.

Avec cet exemple imagé, on comprend que le transfert horizontal de gènes est un avantage essentiel qui, pour des questions d'adaptation à des conditions aléatoires de l'environnement, n'a pas été perdu. Une étude sur la migration de bactéries démontre que cet événement produit de nouvelles niches écologiques, développant en parallèle la diversité des écosystèmes, ceux-ci devenant garants d'un équilibre homéostatique profitable aux organismes qui y vivent en communauté (Niehus *et al.* 2015).

Cette capacité est bien plus élevée chez les organismes unicellulaires que chez les multicellulaires pour lesquels les interconnexions des cellules en organes spécialisés rendent leur pool génétique bien moins apte aux changements. Cette stabilité, ou plutôt cette protection, face au changement génétique trop rapide, a bien évidemment sa raison d'être, comme nous le verrons dans le chapitre suivant. Elle est gérée par un dispositif enzymatique de maintenance qui s'accroît avec le nombre de gènes présents dans un organisme. Non seulement la répllication d'un brin d'ADN est une copie fidèle à l'ADN premier grâce à une enzyme nommée « ADN polymérase », mais elle est contrôlée par une autre enzyme, l'« exonucléase », afin de s'assurer qu'il n'y a pas eu erreur de retranscription. Lorsqu'elle en détecte, les « faux » nucléotides sont

retirés, puis l'ADN est réparé par « recombinaison », un mécanisme au cours duquel des fragments de chromosomes s'échangent. Si de mauvais appariements de nucléotides subsistent, d'autres molécules spécialisées peuvent encore intervenir en recombinant les fragments. Un processus d'une extrême fiabilité, puisque le taux calculé d'erreur de réplication d'ADN est d'un nucléotide mal transcrit sur un milliard (Friedberg, Wagner & Radman 2002) !

À l'inverse, une trop grande fixité génétique aboutit à une capacité d'adaptation réduite. Il s'agit donc, de génération en génération, de conserver cette plasticité génétique. Chaque individu possède des caractères (phénotypes) qui, bien qu'hérités, lui sont propres, qu'ils soient morphologiques (par exemple la couleur des cheveux chez l'humain) ou physiologiques (par exemple la sensibilité à une substance donnée, ou encore à l'acidité des boissons). Cependant, au bagage hérité peuvent s'en ajouter d'autres dont l'individu peut se charger tout au long de sa vie. Cette variation phénotypique, c'est-à-dire la différence génétique observée entre tous les individus d'une même espèce dans une même population, implique une manière de fonctionner plus souple. La capacité de changement génétique de chacun est sans aucun doute due au transfert horizontal de gènes, bien plus qu'aux mutations hasardeuses prônées comme moteur de l'évolution par les néodarwinistes (Syvanen 1985; Bjedov *et al.* 2003). Cet échange, très dynamique entre les êtres unicellulaires, est rarissime entre les multicellulaires (il existe pourtant chez certaines plantes: Dunning *et al.* 2019). Enfin, il est pratiquement inexistant chez les espèces dont la reproduction n'est que sexuée, selon le principe de conservation de la fertilité. Le transfert de gènes semble donc s'effectuer par voie indirecte entre les micro-organismes et l'écosystème-hôte qui les accueille. Cela a une implication majeure sur la perception que nous pourrions avoir du parasitisme, des maladies et de la santé.

Bibliographie

- Atad A. A., A. Zvuloni, Y. Loya et E. Rosenberg (2012). Phage therapy of the white plague-like disease of *Favia favus* in the Red Sea. *Coral Reefs* 31(3): 665-670.
- Baptiste E. (2017). *Tous entrelacés ! Des gènes aux super-organismes : les réseaux de l'évolution*. Belin, Paris.
- Barra J. J., R. Auroa, M. Furlan, K. L. Whiteson, M. L. Erb, J. Pogliano, A. Stotland, R. Wolkowicz, A. S. Cutting, K. S. Doran, P. Salamon, M. Youle & F. Rohwer (2013).

- Bacteriophage adhering to mucus provide a non-host-derived immunity. *PNAS USA* 110(26) : 10771-10776.
- Barton E. S., D. W. White, J. S. Cathelyn, K. A. Brett-McCellan, M. Engle, M. S. Diamond, V. L. Miller & H. W. Virgin (2007). Herpesvirus latency confers symbiotic protection from bacterial infection. *Nature* 447(7142) : 326-329.
- Bjedov I., O. Tenaillon, B. Gérard, V. Souza, E. Denamu, M. Radman, F. Taddei & I. Matic (2003). Stress-induced mutagenesis in bacteria. *Science* 300(5624) : 1404-1409.
- Charpentier X, E. Kay, D. Schneider & H. A. Shuman (2011). Antibiotics and UV radiation induce competence for natural transformation in *Legionella pneumophila*. *Journal of Bacteriology* 193(5) : 1114-1121.
- Claverys J. P., M. Prudhomme & B. Martin (2006). Induction of competence regulons as a general response to stress in gram-positive bacteria. *Annual Rev Microbiol.* 60(1) : 451-475.
- Cornillon B. (2010). Classification des virus pathogènes. *Inserm DRH/BCPR, Paris*.
- De Vos W. M. & M. Nieuwdorp (2013). Genomics: A gut prediction. *Nature* 498(7452) : 48-49.
- Deterding K., B. Tegtmeyer, M. Cornberg, J. Hadem, A. Pothhoff, K. H. Böker, H. L. Tillmann, M. P. Manns & H. Wedermeyer (2006). Hepatitis A virus infection suppresses hepatitis C virus replication and may lead to clearance of HCV. *J. Hepatol.* 45(6) : 770-778.
- Dunning L. T., J. K. Olofsson, C. Parisod, R. R. Choudhury, J. J. Moreno-Villena, Y. Yang, J. Dionora, W. P. Quick, M. Park, J. L. Bennetzen, G. Besnard, P. Nosil, C. P. Osborne, & P.-A. Christin (2019). Lateral transfers of large DNA fragments spread functional genes among grasses. *PNAS USA* 116(10) : 4416-4425.
- Engelmoer D. J. & D. E. Rozen (2011). Competence increases survival during stress in *Streptococcus pneumoniae*. *Evolution* 65(12) : 3475-3485.
- Forterre P. (2016). To be or not to be alive: How recent discoveries challenge the traditional definitions of viruses and life. *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences* 59 : 100-108.
- Friedberg E. C., R. Wagner & M. Radman (2002). Specialized DNA polymerases, cellular survival and the genesis of mutations. *Science* 296(5573) : 1627-1630.
- Garcia-Vallvé S., A. Romeu & J. Palau (2000). Horizontal gene transfer in bacterial and archaeal complete genomes. *Genome research* 10(11) : 1719-1725.
- Guerra P. A. (2011). Evaluating the life-history trade-off between dispersal capability and reproduction in wing dimorphic insects: a meta-analysis. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* 86 : 813-835.
- Haeckel E. (1866). *Generelle Morphologie der Organismen*, Reimer, Berlin.
- Han J., L. L. Domier, A. Dorrance & F. Qu (2012). Complete genome sequence of a novel pararetrovirus isolated from soybean. *J. Virol.* 86(17) : 9555.
- Hehemann J.-H., G. Correc, T. Barbeyron, W. Helbert, M. Czjzek & M. Gurvan (2010). Transfer of carbohydrate-active enzymes from marine bacteria to Japanese gut microbiota. *Nature* 464 : 908-912.
- IHGSC, International Human Genome Sequencing Consortium (2001). Initial sequencing and analysis of the human genome. *Nature* 409 : 820-921
- Jacob F. (1954). *Recherches sur la lysogénie*. Masson, Paris.
- King C. A., J. Baillie & J. H. Sinclair (2006). Human cytomegalovirus modulation of CCR5 expression on myeloid cells affects susceptibility to human immunodeficiency virus type 1 infection. *J. Gen. Virol.* 87(8) : 2171-2180.

- Koonin E. V. & P. Starokadomskyy (2016). Are viruses alive? The replicator paradigm sheds decisive light on an old but misguided question. *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences* 59: 125-134.
- Márquez L. M., R. S. Redman, R. J. Rodriguez & M. J. Roossinck (2007). A virus in a fungus in a plant - three way symbiosis required for thermal tolerance. *Science* 315(5811): 513-515.
- Moran N. A. & T. Jarvik (2010). Lateral transfer of genes from fungi underlies carotenoid production in Aphids. *Science* 328(5978): 624-627.
- Niehus R., S. Mitri, A. G. Fletcher & K. R. Foster (2015). Migration and horizontal gene transfer divide microbial genomes into multiple niches. *Nat. Comm.* 6: 8924. doi. org/10.1038/ncomms9924 (consulté le 30.01.2024).
- Noorali S., I. C. Rotar, C. Lewis, J. P. Pestaner, D. G. Pace, A. Sison & O. Bagasra (2009). Role of HERV-W syncytin-1 in placentation and maintenance of human pregnancy. *Appl. Immunohistochem. Mol. Morphol.* 17(4): 319-28.
- O'Brien K. L., L. J. Wolfson, J. P. Watt, E. Henkle, M. Deloria-Knoll, N. McCall, E. Lee, K. Mulholland, O. S. Levine & T. Cherian (2009). Burden of disease caused by *Streptococcus pneumoniae* in children younger than 5 years: global estimates. *The Lancet* 374(9693): 893-902.
- Oliver K. M., P. H. Degnan, M. S. Hunter & N. A. Moran (2009). Bacteriophages encode factors required for protection in a symbiotic mutualism. *Science* 325(5943): 992-994.
- Pasteur L. (1880). Sur les maladies virulentes. *Compte rendu de l'Académie des Sciences, Paris* (90): 244.
- Peterson S., R. T. Cline, H. Tettelin, V. Sharov & D. A. Morrison (2000). Gene expression analysis of the *Streptococcus pneumoniae* competence regulons by use of DNA microarrays. *Journal of Bacteriology* 182(21): 6192-6202.
- Rosenberg E. & I. Zilber-Rosenberg (2013). *The Hologenome Concept: Human, animal and plant microbiota*. Springer.
- Rowe H. M., J. Jakobsson, D. Mesnard, J. Rougemont, S. Reynard, T. Aktas, P. V. Maillard, H. Layard-Liesching, S. Verp, J. Marquis, F. Spitz, D. B. Constam & D. Trono (2010). KAP1 controls endogenous retroviruses in embryonic stem cells. *Nature* 463: 237-240.
- Rumpho M. E., J. M. Worful, J. Lee, K. Kannan, M. S. Tyler, D. Bhattacharya, A. Moustafa & J. R. Manhart (2008). Horizontal gene transfer of the algal nuclear gene *psbO* to the photosynthetic sea slug *Elysia chlorotica*. *PNAS USA* 105(46): 17867-17871.
- Ryabov E. V., G. Keane, N. Naish, C. Evered & D. Winstanley (2009). Dengrovirus induces winged morphs in asexual clones of the rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea*. *PNAS USA* 106(21): 8465-8470.
- Syvanen M. (1985). Cross-species gene transfer; implications for a new theory of evolution. *J. Theor. Biol.*, 112: 333-343.
- Tillman H. L., H. Heiken, A. Knapik-Botor, S. Heringlake, J. Ockenga, J. C. Wilber, B. Goergen, J. Detmer, M. McMorro, M. Stoll, R. E. Schmidt & M. P. Manns (2001). Infection with GB virus C and reduced mortality among HIV-infected patients. *N. Engl. J. Med.* 345: 715-724.
- Virgin H. W. (2014). The virome in mammalian physiology and disease. *Cell* 157 (1): 142-150.
- Wessler S. (2006). Transposable elements and the evolution of eukaryotic genomes. *PNAS USA* 103(47): 17600-17601.

Symbiote *versus* parasite, 13 | un équilibre fragile

Notre rapport à la maladie s'est construit sur la base des connaissances que nous en avons, lesquelles s'appuient sur les savoirs de la science contemporaine. Ainsi, notre conception des microbes et des virus, et au-delà, toute notre approche du vivant, est biaisée dès l'instant où, portée par l'espoir de se guérir de maux terribles, l'humanité a concentré ses efforts dans son combat contre les causes de la mort. Un changement de paradigme est donc tout aussi nécessaire que fondamental, et je demande au lecteur de ce chapitre, aussi délicat à traiter que celui consacré à la mort, de faire preuve d'un esprit d'ouverture exceptionnel afin de comprendre pourquoi.

Parasitisme ou mutualisme ?

Je ne me fais pas d'illusions : les attaques les plus virulentes (!) qui viseront cet ouvrage porteront sur les lignes qui suivent. Comment pourrait-on par exemple accepter que le bacille de la peste qui a décimé la moitié de la population européenne au Moyen Âge, ou le plasmodium de la malaria qui est la cause de plus de 400 000 décès chaque année, aient une quelconque utilité dans les réseaux du vivant ? Je vous l'accorde, cela paraît impensable et je suis le premier à espérer que l'on trouve des remèdes aux maux de l'être humain. Toutefois, il ne s'agit pas de le faire n'importe comment. C'est pourtant bien

ce que l'on fait depuis plus d'un siècle, en dispersant dans la nature diverses substances pour lutter contre ce que l'on considère comme des « fléaux », qu'il s'agisse des maladies de l'humain ou de celles (visant vignes, légumes et céréales, bétail, arbres fruitiers, bois de construction, etc.) qui compromettent son développement. À l'inverse, les gens considèrent majoritairement comme un juste retour des choses, et non comme un fléau, la dispersion de ces substances sur les vecteurs de ces « maladies », des espèces pourtant tout aussi victimes que nous telles que le rat noir face au bacille de la peste. Or, la mort-aux-rats, le DDT et toute substance dite « -cide » sont, par définition, toxiques pour la Vie. Elles amènent leur lot de nouveaux troubles chez les survivants et, par effet boomerang, sont à la base de nombreuses affections auto-immunes, voire « orphelines » lorsque nous ne savons plus comment les décrire. Ce chapitre n'est donc pas un déni de la maladie – lorsqu'elle se déclare, il faut la soigner – mais un appel à un plus grand respect du vivant avec pour finalité, j'en suis intimement convaincu, moins de souffrance.

Il y a déjà quelques années, j'exprimais dans un titre de la presse romande l'idée suivante :

Imaginez seulement que ce que l'on nomme « parasite » ne soit en réalité qu'une tentative malheureuse de mutualisme, l'hôte n'ayant pas réussi à accepter organiquement la venue de son commensal. On nomme « pathogène obligatoire » tout organisme ne pouvant survivre hors de son hôte. Les exemples sont nombreux : *Treponema pallidum* est à l'origine de la syphilis ; *Mycobacterium tuberculosis* de la tuberculose ; les *Rickettsia* donnent le typhus, *Corynebacterium diphtheriae* la diphtérie et *Mycobacterium leprae* la lèpre. Pour soigner ces maladies, il s'agit donc de comprendre ce qui n'a pas marché dans cette malheureuse association. Découvrir les raisons de cette symbiose ratée peut permettre de développer de nouveaux médicaments menant à la guérison. Une nouvelle discipline est née, la symbiologie (Mulhauser 2013).

J'ignorais qu'un éminent médecin et écrivain avait déjà exprimé cette idée en ces termes :

La pathogénicité n'est pas la règle. En effet, elle se produit si rarement et implique un si petit nombre d'espèces, compte tenu de l'énorme population de bactéries sur Terre, que ce n'est qu'une bizarrerie. La maladie résulte généralement d'une négociation symbiotique peu concluante,

d'un dépassement de la ligne d'un côté ou de l'autre, d'une mauvaise interprétation biologique des frontières (Thomas 1974).

Cette réflexion, paraissant saugrenue à la première lecture, peut toutefois être un puissant stimulant pour la recherche médicale. Songez qu'en retournant le problème, ce n'est plus un parasite que nous cherchons à combattre, mais plutôt une possible symbiose que nous essayons de favoriser ! Sceptique ?

Il faut tout d'abord réapprendre à considérer l'ensemble du cycle épidémiologique d'un organisme que l'on nomme « agent pathogène ». Prenons exemple sur la peste citée plus haut. *Yersinia pestis*, la bactérie responsable des pandémies qui a décimé les populations humaines au Moyen Âge, à la Renaissance et à la fin du XIX^e siècle, est un bacille qui occupe spontanément les sols des milieux semi-arides. Les rongeurs sauvages tels que les gerbilles ingèrent ces germes par milliers sans aucune conséquence négative pour eux. Ces animaux réfractaires vivent en bonne santé avec ces bacilles dans le corps. Cela signifie que ces microbes ne sont pas pathogènes dans ces circonstances et qu'ils ont peut-être même un effet bénéfique sur la santé de ces mammifères, associés à d'autres espèces de leur microbiote. Nous n'en savons hélas rien, car aucune étude n'a été menée dans cette optique. Pourtant, connaître l'aspect bénéfique de ce bacille dans le métabolisme des gerbilles ou des mériones serait intéressant à plus d'un titre. Cela nous donnerait les clés d'une protection possible des rats et éviterait des campagnes de dératisation catastrophiques du point de vue écologique. Car les rats sont, tout comme *Homo Sapiens*, victimes de la bactérie. Celle-ci leur est transmise par l'intermédiaire des puces de rongeurs sauvages qui passent accidentellement de l'hôte résistant au rongeur sensible. Dans les régions de forte densité de populations de rongeurs et d'humains, le risque de transmission augmente d'autant plus rapidement que les puces des rats quittent prestement les individus morts et, afin de se nourrir, cherchent à piquer tout animal à sang chaud. À un certain stade de la transmission du bacille, la puce de l'humain prend tout aussi accidentellement le relais. Il n'y a alors plus besoin ni des rongeurs, ni de leurs puces pour que l'épidémie bubonique se déclare dans la population humaine (Haenni & Mulhauser 1998).

À la suite de la découverte par Alexandre Yersin du bacille responsable de l'épidémie de peste de Hong-Kong en 1894, le médecin a conçu un sérum antipesteux qui a permis de sauver des millions de

personnes. Par la suite, des vaccins ont été mis au point. Si le principe est simple – il suffit d'inoculer quelques germes de souches moins virulentes pour provoquer le système immunitaire de l'hôte qui développera des anticorps protecteurs –, il n'est pourtant pas sans effets secondaires. De plus, ces vaccins sont inopérants contre la peste pulmonaire. Aujourd'hui, la peste n'a pas disparu. On déplore plus d'une centaine de décès chaque année dans le monde. La méthode la plus utilisée pour guérir la maladie est l'administration d'antibiotiques à base d'aminosides, molécules de sucres auxquelles s'ajoutent des fonctions amine (NH_2). La plupart de ces molécules sont synthétisées naturellement par des bactéries du groupe des actinobactéries; ce qui me permet de souligner, dans la logique du continuum du vivant, que les solutions sont dans la nature. Toutefois, l'une des techniques pharmacologiques pour produire des antibiotiques est de dénaturer chimiquement la molécule de base produite par les bactéries. Dès lors, des souches résistant à ces médicaments se développent grâce à des gènes transmis horizontalement entre les différentes espèces de bactéries (Galimand *et al.* 1997; Wong *et al.* 2000).

L'augmentation des cas de résistance des virus aux antiviraux ou des bactéries aux antibiotiques est l'un des problèmes récurrents de la médecine contemporaine. La situation est si dramatique que l'Organisation mondiale de la santé (OMS) a mis en place un plan d'action mondial. Son cri d'alarme se traduit en ces termes :

La résistance aux antibiotiques constitue aujourd'hui l'une des plus graves menaces pesant sur la santé mondiale, la sécurité alimentaire et le développement. Elle peut toucher toute personne, à n'importe quel âge et dans n'importe quel pays. La résistance aux antibiotiques est un phénomène naturel mais le mauvais usage de ces médicaments chez l'Homme et l'animal accélère le processus. Un nombre croissant d'infections, comme la pneumonie, la tuberculose, la gonorrhée ou la salmonellose, deviennent plus difficiles à traiter car les antibiotiques utilisés pour les soigner perdent leur efficacité. La résistance aux antibiotiques entraîne une prolongation des hospitalisations, une augmentation des dépenses médicales et une hausse de la mortalité (OMS 2020).

Ce constat a de quoi nous faire réfléchir. En termes évolutifs, le processus est toutefois logique, voire rassurant : les microbes, ceux qui nous constituent, rappelons-le, trouvent rapidement les moyens de

se protéger contre les attaques « anti-vie » inventées par notre espèce. Un fait d'ailleurs souligné par l'OMS : « La résistance aux antibiotiques est un phénomène naturel ». Cela signifie que, quelle que soit la substance imaginée pour lutter contre les microbes, ceux-ci chercheront naturellement une parade. Cette capacité d'évolution, si elle paraît dramatique pour nous face à certaines maladies, est, à long terme, un formidable espoir pour la conservation de la Vie sur Terre. Il faut bien réaliser que le principal problème auquel celle-ci doit aujourd'hui faire face n'est pas le dérèglement climatique, mais la recherche de solutions pour survivre à l'arrivée de milliers de molécules de synthèse produites dans des laboratoires, et qui n'existaient pas dans la nature durant plus de 4 milliards d'années. De plus, comme ces molécules se dégradent en produisant des métabolites qui se combinent avec d'autres, les organismes doivent s'adapter à une grande quantité de biocides différents. Là est le vrai danger. Comment dès lors concilier une pratique pharmacologique protectionniste envers notre espèce (ce qui paraît logique) et une conservation plus générale du continuum du vivant ? La réponse à cette question est suggérée par l'approche symbiologique : l'étude des interactions entre espèces doit être approfondie dans une optique plus large que celle de la médecine humaine (Mulhauser 2023, p. 247).

Un exemple historique nous ouvre la voie. À la fin des années 1960, le biologiste Kwang Jeon, du laboratoire de biochimie de l'Université du Tennessee, réalisait des recherches sur la biologie de l'amibe protégée (*Amoeba proteus*), un protozoaire géant vivant librement dans les eaux douces stagnantes. Sphérique à l'état de repos, l'amibe peut augmenter sa taille pour se déplacer, mais également se nourrir. Alors que des pseudopodes s'allongent dans un sens, la partie postérieure de l'animalcule adhère au substrat dans un mouvement inverse, créant un léger courant qui entraîne la proie entre les longues excroissances de l'amibe. Les pseudopodes n'ont alors plus qu'à se rejoindre pour enfermer le « repas » qui sera phagocyté. Pourtant, un jour de 1966, le chercheur se rend compte que quelque chose a changé dans l'environnement de ses petits aquariums d'étude : toutes les amibes sont parasitées par des bactéries (Jeon & Lorch 1967). Une chute spectaculaire de la population d'amibes se produit dès les premières semaines d'infection, puisque plus de 80 % d'entre elles meurent. À court terme, c'est une catastrophe, mais le biologiste a la bonne idée de « laisser faire la nature », ce qui aura une incidence majeure dans sa carrière : certains

protozoaires survivent à l'infection, semblant accepter la présence de bactéries dans le cytoplasme de leur unique cellule. Les organismes réussissent à survivre en pratiquant une division cellulaire rapide. Des souches entièrement résistantes au microbe font ainsi leur apparition en quelques mois, puis stoppent leur multiplication lorsque les scientifiques commencent à leur administrer un antibiotique pour éliminer les bactéries. Au lieu de les guérir, les traitements affaiblissent considérablement les amibes dans la cellule desquels se trouvent des bactéries. Quelques années après l'infection, ces amibes sont même devenues dépendantes, pour leur survie, des bactéries qui vivent en elles. De même, ces dernières sont devenues endosymbiotiques et ne peuvent plus vivre à l'état libre. Jeon et ses collègues ont noté que la dépendance de l'hôte vis-à-vis de ses symbiotes cytoplasmiques était totale cinq ans après «l'infection» (Jeon 1972). Durant cette période, moins de mille générations d'amibes se sont succédé; chaque nouvelle génération intervenant en moyenne tous les deux jours à une température de l'eau de 20 °C (Jeon & Jeon 1976). En poursuivant ses recherches, Jeon a pu mettre en évidence que les bactéries endosymbiotiques étaient à l'origine de commutation de gènes (*gene switching*). Cela induisit notamment de nouvelles expressions géniques participant aux voies biochimiques de l'amibe (Jeon & Jeon 2004).

Du microbe à l'endosymbiote : l'évolution en marche

Fait rarissime et remarquable, en un demi-siècle de patientes observations, l'équipe de Jeon a ainsi pu observer «l'évolution en marche», menant un microbe de l'état de pathogène morbide à celui d'endosymbiote et changeant le fonctionnement interne de l'amibe qui lui sert d'hôte, sans impliquer de différences dans la physionomie et la morphologie externe de celle-ci. C'est un fait d'une importance capitale. Jusqu'alors, les théoriciens de l'évolution (tout autant que leurs détracteurs) se sont surtout focalisés sur les différences morphologiques pour expliquer que les espèces évoluent, changent et disparaissent (ou au contraire qu'elles sont fixées pour... l'éternité!). Bien entendu, pour qu'un microbe devienne un «diplodocus» par association avec d'autres microbes, il a bien fallu des changements morphologiques. Pourtant, et c'est là l'enseignement principal, les organismes d'une population isolée (c'est le cas de celle de Jeon, cloîtrée dans les aquariums de son laboratoire), n'ont pas besoin de présenter des traces visibles de

changement (du moins pour l'œil humain, donc selon une observation anthropogène) pour continuer leur évolution dans une voie qui peut les mener à la spéciation (apparition d'une nouvelle espèce).

Un tel type de processus a sans doute été mis en jeu chez l'amibe *Pelomyxa palustris* (et les six espèces associées). Cet unicellulaire possède la particularité d'héberger des bactéries symbiotiques de différents types en lieu et place des mitochondries, organites cellulaires que l'on trouve chez tous les êtres multicellulaires (Griffin 1988). Les chercheurs ont d'abord imaginé avoir découvert un nouveau groupe d'amibes (baptisé *Archéozoa*; Keeling 1998) dont l'ancêtre était le chaînon manquant, entre les bactéries et la cellule moderne, de l'histoire évolutive des protozoaires telle qu'envisagée par la théorie des endosymbioses. Mais ils se sont ensuite rendu compte, grâce à des séquençages d'ARN, que les ancêtres de ces amibes possédaient des mitochondries (Morin & Mignot 1995). Ils ont dès lors reclassé le groupe dans l'embranchement des amibozoaires (*Amoebozoa*) (Cavalier-Smith 1998; Edgcomb *et al.* 2002). En définitive, les biologistes pensent que l'introduction des bactéries chez cette amibe est le résultat d'un processus d'infection de même nature que celle, décrite ci-dessus, qui a touché *Amoeba proteus*. Ces deux histoires montrent d'une part les voies possibles d'évolution du vivant qui peuvent être rapides dans le cas d'*Amoeba proteus* ou sembler à contre-courant chez *Pelomyxa palustris*, et d'autre part le statut provisoire des classifications mises en place par les humains.

Dans le monde associé du végétal et du champignon, les exemples de parasitose sont aussi légion. Une « parasitose biotrophe » est une infection qui implique non seulement la survie de l'hôte mais également sa stimulation. Illustrons cela par le cas de la rouille du pois (*Uromyces pisi*), dont le cycle complexe implique la présence de plusieurs plantes et de leurs pollinisateurs. Si l'hôte définitif du champignon est le pois (*Pisum sativum*), l'euphorbe « petit cyprès » (*Euphorbia cyparissias*) joue l'intermédiaire. Or la rouille réussit à stériliser le plant sur lequel elle s'installe. Aucune fleur n'apparaît. La morphologie de la plante se transforme : les tiges sont deux fois plus hautes que chez un individu non parasité et ne se ramifient pas. Les feuilles deviennent plus charnues, mais sèchent prématurément. Certaines d'entre elles sont disposées en rosette nectarifère, rappelant la forme des vraies fleurs. Le « nectar » est une sorte d'exsudat sucré dans lequel baignent les cellules reproductrices du champignon. Ces leurres odorants attirent les insectes pollinisateurs de la plante, contribuant ainsi à la fécondation

croisée de la rouille; un système de reproduction similaire à celui des plantes. La fécondation réussie se matérialise par la production de petites pustules orange nommées «écidies». Le succès de dispersion des spores du champignon par le vent est amélioré par une plus grande hauteur des tiges (Pfunder & Roy 2000). L'étude de ce cas montre aussi que les pseudo-fleurs fongiques apparaissent un mois avant les vraies fleurs et que le chevauchement des deux types de «floraison» dure plus d'un mois. Une compétition semble exister entre les deux espèces pour attirer les insectes. L'hypothèse paraît d'autant plus solide que la production de graines d'euphorbes est quantitativement plus importante lorsqu'il n'y a pas de pseudo-fleurs fongiques dans la population. Néanmoins le succès de reproduction du champignon est plus élevé en présence de fleurs saines voisines dans les environs immédiats du plant parasité (Pfunder & Roy 2006). La compétition engendrerait-elle une stimulation favorable à toutes les espèces en présence?

Les cas cités ci-dessus ont ceci d'instructif qu'ils montrent que la limite entre le parasitisme et l'entraide est loin d'être nette, un constat fait à propos du bacille de la peste (pathogène pour les uns mais sans danger pour d'autres car naturellement intégré à leur microbiote), et valable pour un grand nombre de maladies épidémiques. Les porteurs sains de la rougeole ou de la tuberculose sont ainsi à chercher chez nos ruminants domestiques, les virus de la grippe se transmettent d'oiseau en oiseau et ne deviennent virulents que lors de mutation, la toxoplasmose est une histoire de chat, et tout récemment le coronavirus Covid-19 fut probablement et naturellement accueilli par un autre mammifère.

De plus, le système immunitaire des individus réagit de manière très différente selon les régions du monde où ils vivent. Les Européens, porteurs sains habitués à certains micro-organismes depuis des millénaires, les emportent avec eux lors de leur conquête des Amériques. Les Amérindiens, non immunisés contre ces agents infectieux, y sont extrêmement sensibles. Affaiblis par les oreillons ou la coqueluche, ils sont surtout décimés par la variole, le typhus et la rougeole, mais aussi par la dyptérie, la tuberculose et la grippe (Bianchine & Russo 1992). Plusieurs dizaines de millions de morts sont à déplorer, non par les faits d'armes des conquistadores, mais par l'échange malheureux de leurs microbes. Dans certaines régions d'Amérique du Sud, les historiens s'accordent à dire que plus de 90 % de la population disparaît en moins d'un quart de siècle (Altman 1998). En échange, les marins

ramènent la syphilis en Europe, ce qui, sans provoquer une hécatombe aussi spectaculaire qu'aux Amériques, fragilisa la société européenne sur plusieurs siècles (Nunn & Qian 2010).

La maladie est l'expression réactive particulière d'un organisme en contact avec un autre organisme dont l'histoire biologique est beaucoup plus vaste. L'agent ne devient pathogène que dans certaines circonstances qu'il s'agit de comprendre. Cela répond à l'un des principes du continuum du vivant, soit un échange continu de l'information qui s'organise en réseaux. Toutefois, certains participants à ce réseau, par la complexité de leur organisation et la recherche constante de la conservation de leur homéostasie, se trouvent à la limite de leurs possibilités d'échange. Bien entendu, le système immunitaire joue un rôle crucial dans cette capacité à gérer les nouvelles informations et à les assimiler.

La plupart des maladies qui se déclarent en épidémies chez l'être humain sont le fait de micro-organismes issus de réservoirs naturels non problématiques: des animaux à sang chaud, qu'ils soient mammifères ou oiseaux. Nous l'avons vu dans le chapitre 12 «Un trafic génétique continu», si les bactéries pratiquent allègrement différentes voies d'échanges de gènes, les champions de la transformation génétique sont les virus. Dans bien des cas, c'est une capacité très favorable à l'évolution du vivant, mais lorsque ces changements incessants de gènes touchent notre organisme humain, leurs conséquences sur notre santé sont particulièrement difficiles à gérer. Mais n'y voir qu'une attaque contre *Homo Sapiens* est une erreur, il s'agit aussi de comprendre l'implication que cela peut avoir sur d'autres espèces. Ainsi, certaines souches du virus de la grippe dont le réservoir sauvage est celui des oiseaux – sains en général – nous touchent-ils plus spécifiquement, mais sont encore plus problématiques auprès de nos cousins, gorilles et chimpanzés, décimés par des souches nous paraissant bénignes (Boesch, Grundmann & Mulhauser 2011). À l'inverse, le virus du Sida est passé des chimpanzés, porteurs d'une immunodéficience simiesque, aux humains, non sans réaliser une mutation au passage (Keele *et al.* 2006). Toutefois, précise l'étude, 35 % des individus des populations de chimpanzés sont des porteurs sains qui ont développé une immunité suffisante pour que la maladie ne puisse se déclarer. Avec le virus Ebola, les choses semblent encore plus compliquées, puisque le réservoir sain semble être celui de chauves-souris frugivores qui, lorsque les ressources alimentaires s'appauvrissent durant la saison sèche, exploitent la même nourriture que

celle des grands singes (Leroy *et al.* 2005). Le virus semble alors se propager à l'humain soit directement par la consommation de chauve-souris, soit indirectement au contact de grands singes malades, notamment lors des activités de braconnage et de consommation de viande de brousse. Toutefois, une proportion non négligeable (15,3 %) de la population développe des anticorps naturels contre le virus. Cette proportion augmente même à 33,8 % dans les villages des zones forestières où les gens sont en contact régulier avec les chauves-souris et s'approvisionnent aux mêmes arbres fruitiers que ces mammifères volants (Becquart *et al.* 2010).

En décembre 2019, une nouvelle forme d'infection virale se répand comme une traînée de poudre à travers la Chine, puis les mois suivants dans l'ensemble du monde, plus particulièrement dans les régions tempérées d'Europe et d'Amérique du Nord. Nommée « maladie à coronavirus 2019 » (abrégée « Covid-19 ») en référence à son année d'apparition, la pandémie de Covid-19 se propage sur tous les continents à une telle vitesse qu'elle génère un climat anxiogène dans toutes les populations, faisant remonter dans l'inconscient collectif les craintes d'une hécatombe humaine comparable à celle de la grippe espagnole (1918-1919, entre 50 et 100 millions de morts) ou de la peste de Chine (surtout entre 1890 et 1910, avec plusieurs dizaines de millions de morts). Plus d'un siècle après ces tragédies, l'humanité se souvient. Elle s'organise pour lutter contre le virus : il faut gagner du temps afin de permettre aux équipes médicales de gérer l'afflux des cas graves dans les hôpitaux, mais aussi de trouver une parade sous la forme d'un vaccin ou d'une autre solution pharmacologique éprouvée. Les gouvernements prennent des mesures de protection drastiques, certains proclamant l'état d'urgence, le couvre-feu et le confinement absolu. Les commerces et les industries ferment, les activités de loisirs et de tourisme se réduisent à des formes confinées, l'économie s'effondre. Le nombre de personnes sans emploi augmente très rapidement ; on cite par exemple le chiffre de 16,7 millions de chômeurs supplémentaires aux États-Unis entre le 21 mars et le 14 avril 2020. L'Organisation mondiale du travail (OIT) signale que le Covid-19 a forcé 2,7 milliards de personnes au chômage partiel, soit plus de 80 % des personnes actives dans le monde entier. Il s'agit de la pire crise économique depuis la grande Dépression de 1930 (Etwareea 2020).

La Covid-19 est provoquée par une souche particulière de coronavirus, la SARS-CoV-2 découverte en décembre 2019 dans la ville chinoise

de Wuhan. Ce virus mesure 125 nanomètres de diamètre. Son génome est caractérisé par un ARN très long (> 30 kilobases), par exemple notablement plus important que celui de la grippe. Il s'agit d'un descendant d'un virus naturel de chauve-souris⁴⁶, mais transmis par un hôte intermédiaire, possiblement le pangolin⁴⁷ (Zhou *et al.* 2020; Fisher & Heymann 2020). Les symptômes apparents sont la toux, une gêne respiratoire, de la fièvre, une perte de l'odorat et du goût et, dans les cas les plus graves, une détresse respiratoire. Les personnes de plus de 65 ans sont celles qui, en chiffres absolus, succombent le plus à l'infection, alors que les enfants de moins de 10 ans n'en sont pratiquement pas victimes (Wu & McGoogan 2020). La comorbidité touche des personnes atteintes d'hypertension, de diabète et de maladies coronariennes (Zhou *et al.* 2020). Les hommes sont significativement plus atteints que les femmes, sans doute en raison d'une protection immunitaire naturellement plus faible, puisque la plupart des gènes protecteurs se situent sur les chromosomes X (Ghosh & Klein 2017). La détresse respiratoire aiguë est la principale cause physiologique de la mort. Des origines secondaires, telles que des infections par des bactéries ou des champignons, augmentent le taux de mortalité. Malheureusement, au fil des mois et des études de cas, les chercheurs se rendent compte que les signes cliniques sont beaucoup plus larges, touchant le système digestif, le système nerveux et le système sanguin. La Covid-19 semble provoquer une inflammation vasculaire systémique : tous les organes peuvent être touchés. Des échantillons de tissus de patients décédés ont présenté une inflammation de la paroi interne des vaisseaux sanguins et ceci, quel que soit l'organe (cœur, poumons, cerveau, reins ou tube digestif). L'étude menée à l'hôpital universitaire de Zurich donne à penser que le virus attaque le système immunitaire directement par les récepteurs des vaisseaux sanguins plutôt que par les poumons (Varga *et al.* 2020), avec donc pour implication la nécessité de protéger le système vasculaire des patients, parallèlement à la stabilisation de leur système respiratoire.

⁴⁶ > 96 % d'homologie dans le génome de ce virus chez l'humain et de celui d'une chauve-souris du genre *Rhinolophus* par exemple, alors qu'il n'a que 79 % d'homologie avec le virus responsable de la maladie de syndrome respiratoire aigu sévère (ou « SARS ») qui a touché la Chine entre 2002 et 2004 (Fisher & Heymann 2020).

⁴⁷ > 99 % d'homologie dans le génome de ce virus chez l'humain et de celui du pangolin (Fisher & Heymann 2020).

Quatre mois après le début de l'épidémie, en mai 2020, 3,3 millions de personnes étaient affectées à travers le monde et 240 000 morts étaient à déplorer. Les connaissances sur l'action de l'agent infectieux étaient encore très partielles, et de nombreuses questions se posaient, qui sont révélatrices de la position ambiguë que nous adoptons face à un virus provenant du réservoir naturel des symbiotes d'animaux sauvages : les personnes vulnérables n'étaient-elles pas de toute manière à risque face à l'ensemble des microbes ? Le grand nombre de personnes asymptomatiques n'était-il pas un signe plutôt positif ? Pourquoi les fumeurs (Changeux *et al.* 2020) et les asthmatiques (Halpin *et al.* 2020) étaient-ils statistiquement moins touchés que le reste de la population ? Il était très probable que nous trouverions des réponses à toutes ces interrogations car le rapport de l'hôte à son « germe » est rarement univoque. Pourtant, axés sur l'aspect pathogène du microbe, les chercheurs n'en reconnaissent trop souvent que les aspects négatifs. Le cas le plus parlant est celui de la bactérie *Escherichia coli* qui développe de nombreuses souches problématiques à l'origine d'infections graves telles que des méningites, des infections urinaires, des diarrhées ou des gastro-entérites (Kaper, Nataro & Mobley 2004). Cependant, nous ne savons pratiquement rien de son rôle principal dans le système digestif. Vous pensez que j'exagère ? Effectuez vos recherches : vous trouverez des articles sur la pathologie de toutes les souches problématiques, mais aurez beaucoup de peine à trouver une seule référence sur la manière de favoriser les *Escherichia coli* non pathogènes de votre microbiote. Pourtant certains spécialistes prétendent que trois bactéries sur quatre peuplant nos intestins font partie de cette espèce (d'Ari & Sezonov 2008). Il s'agirait donc de l'une des bactéries les plus abondantes dans notre système digestif, dont le rôle est nettement moins connu que celui des lactobacilles, des bifidobactéries et autres bacilles. Au mieux, signale-t-on qu'il s'agit d'une espèce commensale pouvant synthétiser la vitamine K₂ (ce dont pourra bénéficier l'hôte ; Bentley & Meganathan 1982) et qu'elle serait capable de lutter contre la colonisation de pathogènes (Hudault, Guignot & Servin 2001). Le paradoxe est d'autant plus grand qu'il s'agit du microbe le plus cultivé dans les laboratoires du monde entier et le mieux connu génétiquement. Nous savons par exemple qu'il existe une extraordinaire variabilité génétique d'une souche à l'autre d'*Escherichia coli* : alors que le génome d'individus non pathogènes atteint 4,6 millions de paires de bases et code 4200 protéines (Blattner *et al.* 1997), celui de la souche provoquant les

infections urinaires et les méningites des nouveau-nés et celui de la souche entéro-hémorragique possèdent respectivement 5,2 et 5,5 millions de paires de bases pour une codification de 5300 à 5400 protéines! De plus, sur l'ensemble des 300 souches séquencées de cette espèce de bactérie, seuls 20 % des gènes sont communs (Meier-Kolthoff *et al.* 2013). Le décodage des 300 souches confondues représente un pangénome pouvant dupliquer 16 000 gènes. Connaissant désormais la grande facilité que les microbes ont de transférer leurs gènes, nous sommes en droit de nous demander ce qui induit un tel changement d'une souche à l'autre au sein de la même « espèce ». La réponse pourrait bien être liée à la présence d'une diversité accrue de molécules et substances impropres à la digestion dans la nourriture que nous ingérons; ce qui changerait complètement notre approche épidémiologique de cette bactérie.

En définitive, et afin de laisser le champ le plus large possible aux recherches sur les relations symbiotiques entre les êtres vivants, nous devons considérer le parasitisme et le mutualisme comme les expressions différentes d'un même processus : le rapport de l'organisme face à son hôte. Il existe du reste souvent (mais pas toujours) un continuum de l'une vers l'autre de ces expressions.

Bibliographie

- Altman L. J. (1998). *Plague and Pestilence: A History of Infectious Disease*. Enslow, Berkeley.
- Becquart P., N. Wauquier, T. Mahlako, D. Nkoghe, C. Padilla, M. Souris, B. Ollomo, J.-P. Gonzalez, X. De Lamballerie, M. Kazanji & E. M. Leroy (2010). High prevalence of both humoral and cellular immunity to Zaire ebolavirus among rural populations in Gabon. *PLOS ONE* 5(2) : e9126.
- Bentley R. & R. Meganathan (1982) Biosynthesis of vitamin K (menaquinone) in bacteria. *Microbiological Reviews* 46(3) : 241-480.
- Bianchine P. J. & T. A. Russo (1992). The role of epidemic infectious diseases in the discovery of America. *Allergy Proc.* 13(5) : 225-232.
- Blattner F. R., G. Plunkett, C. A. Bloch, N. T. Perna, V. Burland, M. Riley, J. Collado-Vides, J.-D. Glasner, C. K. Rode, G. F. Mayhew, J. Gregor, N. W. Davis, H. A. Kirkpatrick, M. A. Goeden, D. J. Rose, B. Mau & Y. Shao (1997). The complete genome sequence of *Escherichia coli* K-12. *Science* 277(5331) : 1453-1462.
- Boesch C., E. Grundmann & B. Mulhauser (2011). *Manifeste pour les grands singes*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, collection « Le Savoir suisse » 76.
- Cavalier-Smith T. (1998). A revised six-kingdom system of life. *Biological Reviews* 73 : 203-266.
- Changeux J.-P., Z. Amoura, F. A. Rey & M. Miyara (2020). A nicotinic hypothesis for Covid-19 with preventive and therapeutic implications. *Qeios*. Preprint v2. doi. org/10.32388/FXGQSB.2 (consulté le 30.01.2024).
- D'Ari R. & G. Sezonov (2008). *Biologie et génétique d'Escherichia coli*. Belin, Paris.

- Edgcomb V. P., A. G. B. Simpson, L. A. Zettler, T. A. Nerad, D. J. Patterson, M. E. Holder & M. L. Sogin (2002). Pelobionts are degenerate protists: insights from molecules and morphology. *Mol. Biol. Evol.* 19(6) : 978-82.
- Etwareea R. (2020). Le Covid-19 provoque la pire crise depuis la Grande Dépression. *Le Temps*, 14.04.2020.
- Fisher D. & D. Heymann (2020). Q&A: The novel coronavirus outbreak causing COVID-19. *BMC Medicine* 18 : 57. doi.org/10.1186/s12916-020-01533-w (consulté le 30.01.2024).
- Galimand M., A. Guiyoule, G. Gerbaud, B. Rasoamanana, S. Chanteau, E. Carniel & P. Courvalin (1997). Multidrug resistance in *Yersinia pestis* mediated by a transferable plasmid. *N. Engl. J. Med.* 337 : 677-680.
- Ghosh S. & R. S. Klein (2017). Sex drives dimorphic immune responses to viral infections. *J Immunol* 198(5) : 1782-1790.
- Griffin J. L. (1988). Fine structure and taxonomic position of the giant amoeboid flagellate *Pelomyxa palustris*. *J. Protozool.* 35(2) : 300-315.
- Haenni J.-P. & B. Mulhauser (1998). *Rats*. Éd. Muséum d'histoire naturelle de Neuchâtel.
- Halpin D. M. G., R. Faner, O. Sibila & J. R. Badia (2020). Do chronic respiratory diseases or their treatment affect the risk of SARS-CoV-2 infection? *The Lancet Respiratory Medicine*, avril 2020, S2213260020301673.
- Hudault S., J. Guignot & A. L. Servin (2001). *Escherichia coli* strains colonising the gastrointestinal tract protect germfree mice against *Salmonella typhimurium* infection. *Gut* 49(1) : 47-55.
- Jeon K. W. & I. J. Lorch (1967). Unusual intra-cellular bacterial infection in large, free-living amoeba. *Exp. Cell. Res.* 38 : 536-555.
- Jeon K. W. & M. S. Jeon (1976). Endosymbiosis in amoebae: recently established endosymbionts have become required cytoplasmic components. *J. Cell Physiol.* 89(2) : 337-344.
- Jeon K. W. (1972). Development of cellular dependence of infective organisms: mucrurgical studies in amoebas. *Science* 176 : 1122-1123.
- Jeon T. J. & K. W. Jeon (2004). Gene switching in amoeba proteus caused by endosymbiotic bacteria. *J Cell Science* 117(4) : 535-543.
- Kaper J. B., J. P. Nataro & H. L. T. Mobley. (2004). Pathogenic *Escherichia coli*. *Nat. Rev. Microbiol.* (2) : 123-140.
- Keele B. F., F. Van Heuverswyn, Y. Li, E. Bailes, J. Takehisa, M. L. Santiago, F. Bibollet-Ruche, Y. Chen, L. V. Wain, F. Liegeois, S. Loul, E. Mpoudi Ngole, Y. Bienvenue, E. Delaporte, J. F. Y. Brookfield, P. M. Sharp, G. M. Shaw, M. Peeters & B. H. Hahn (2006). Chimpanzee reservoirs of pandemic and nonpandemic HIV-1. *Science* 313(5786) : 523-526.
- Keeling P. J. (1998). A kingdom's progress: archezoa and the origin of eukaryotes. *BioEssays* 20(1) : 87-95.
- Leroy E. M., B. Kumulungui, X. Pourrut, P. Rouquet, A. Hassanin, P. Yaba, A. Délicat, J. T. Paweska, J.-P. Gonzalez & R. Swanepoel (2005). Fruit bats as reservoirs of Ebola virus. *Nature* 438 : 575-576.
- Meier-Kolthoff J. P., R. L. Hahnke, J. Petersen, C. Scheuner, V. Michael, A. Fiebig, C. Rohde, M. Rohde, B. Fartmann, L. A. Goodwin, O. Chertkov, T. Reddy, A. Pati, N. N. Ivanova, V. Markowitz, N. C. Kyrpides, T. Woyke, M. Göker & H. P. Klenk (2013). Complete genome sequence of DSM 30083(T), the type strain (U5/41(T)) of *Escherichia coli*, and a proposal for delineating subspecies in microbial taxonomy. *Stand in Genomic Sciences* 9(2). doi.org/10.1186/1944-3277-9-2 (consulté le 30.01.2024).
- Morin L. & J.-P. Mignot (1995). Are Archamoebae true Archezoa? The phylogenetic position of *Pelomyxa* sp. as inferred from large subunit ribosomal RNA sequencing. *European Journal of Protistology* 31 : 402.

- Mulhauser B. (2013). L'homme, une usine à bactéries. *L'Express-L'Impartial* (26 juin 2013).
- Mulhauser B. (2023). Vers une approche communautaire de la santé par les plantes. In Mulhauser B. (dir.). *Plantes soignantes. Entre pouvoirs et partages*. Épistémé, Lausanne: 227-254.
- Nunn N. & N. Qian (2010). The Columbian exchange: a history of disease, food, and ideas. *J. Econ. Perspectives* 24(2): 163-188.
- OMS (2018). Résistance aux antibiotiques. www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/antibiotic-resistance (consulté le 30.01.2024).
- Pfunder M. & B. A. Roy (2000). Pollinator-mediated interactions between a pathogenic fungus, *Uromyces pisi* (Pucciniaceae), and its host plant, *Euphorbia cyparissias* (Euphorbiaceae). *American Journal of Botany* 87(1): 48-55.
- Pfunder M. & B. A. Roy (2006). Fungal pseudoflowers can influence the fecundity of insect-pollinated flowers on *Euphorbia cyparissias*. *Bot. Helv.* 116: 149-158.
- Thomas L. (1974). *The lives of a cell: notes of a biology watcher*. Viking Press Inc., New York.
- Varga Z., A. J. Flammer, P. Steiger, M. Haberecker, R. Andermatt, A. S. Zinkernagel, M. R. Mehra, R. A. Schuepbach, F. Ruschitzka & H. Moch (2020). Endothelial cell infection and endotheliitis in COVID-19. *The Lancet* 395(10234): 1417-1418.
- Wong J. D., J. R. Barash, R. F. Sandfort, J. M. Janda (2000). Susceptibilities of *Yersinia pestis* strains to 12 antimicrobial agents. *Antimicrob Agents Chemother* 44: 1995-1996.
- Wu Z. & J. M. McGoogan (2020). Characteristics of and Important Lessons from the Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Outbreak in China. Summary of a report of 72 314 cases from the Chinese Center for Disease Control and Prevention. *JAMA* 323(13): 1239-1242. doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2021.20295 (consulté le 30.01.2024).
- Zhou P. *et al.* (2020). A pneumonia outbreak associated with a new coronavirus of probable bat origin. *Nature*. 2020. doi.org/10.1038/s41586-020-2012-7 (consulté le 30.01.2024).

Quatrième partie

De la biologie à la symbiologie: un changement fondamental



Image de la page précédente:

De la fleur à l'abeille, 2024. Dessin au crayon et aquarelle.

Comme pour le dessin de la première partie, le système digestif de l'abeille est indiqué par trois couleurs qui symbolisent trois écosystèmes comportant des biocénoses de micro-organismes différents. Si les parties orange et rouge fonctionnent à peu près de la même manière que notre estomac et nos intestins, c'est l'ensemble de l'écosystème bleu qui révèle l'étonnante symbiose entre les plantes à fleurs et les insectes pollinisateurs. La langue de l'abeille est en relation avec les glandes nectarifères de la plante (en jaune), situées chez la plupart des espèces près des organes sexuels de la fleur et notamment des étamines pourvoyeuses de pollen (symbolisé également en jaune sur la patte postérieure de l'abeille). Le grain de pollen, très résistant, est assemblé en pelote grâce à la salive de l'abeille. Cette salive comporte des lactoferments qui provoquent la fermentation lactique des grains. Grâce à ce procédé chimique, les grains éclatent, libérant une palette extraordinairement riche d'oligo-éléments. Parmi ceux-ci se trouve une lipoprotéine nécessaire aux abeilles : la vitellogenine. Celle-ci leur permet de fabriquer le vitellus, l'un des ingrédients essentiels de la gelée royale. L'ensemble des processus de fabrication de cette gelée ainsi que la transformation des sucres se réalisent grâce à de nombreuses espèces de micro-organismes présents dans le système salivaire des abeilles, en particulier dans les glandes hypopharyngiennes qui se développent chez les ouvrières en contact avec le couvain. Ces glandes produisent notamment l'invertase, une enzyme qui réussit à transformer les sucres complexes du nectar des fleurs en sucres plus simples, constituant le miel digeste pour l'ensemble de la colonie.

14 | La conscience en tout être

L'hypothèse d'une évolution du vivant continue, incessante et interdépendante à tous les organismes (voir chapitre 8, « Théories de l'évolution, évolution des théories »), ouvre des perspectives insoupçonnées dans tous les domaines de la biologie. Cette approche symbiologique pourrait par exemple changer fondamentalement la pratique des sciences cognitives. L'interconnectivité des organismes implique automatiquement une manière de se positionner les uns par rapport aux autres. Bien que nous ne percevions pas cette réalité, cette manière d'être au monde implique l'existence d'une conscience en tout être.

Pourquoi la mort ? Qu'est-ce que la Vie ? Notre « conscience » est cause de bien des maux : elle amène l'humanité à se poser d'innombrables questions sur des sujets qui dépassent bien souvent son entendement, et lui procure de l'angoisse lorsque les réponses manquent. Mais la conscience n'est-elle qu'une spécificité humaine ? N'est-elle pas au contraire apparue très tôt dans l'histoire de la Vie ? Une hypothèse qui ne manquera pas de surprendre la foule des sceptiques qui pensent que seul *Homo Sapiens* en est doué... La démonstration est pourtant assez simple. Il s'agit à nouveau d'un problème sémantique. Si l'on s'attache à ce que l'on connaît de soi-même, la conscience (*consciousness* en anglais et non pas *conscience*) est l'expression intériorisée qu'un individu peut avoir de lui et de ce qui l'entoure. Mais cette définition atteint vite ses limites puisqu'elle est basée sur le « moi » et le postulat

que les individus humains qui entourent le « sujet-objet » doivent également connaître cette « relation intérieure ». Néanmoins, il est tout à fait impossible d'observer directement la conscience des autres. Seuls des moyens techniques, tels que l'encéphalographie, nous permettent de mesurer des changements de l'activité neuronale d'un autre individu que soi, corrélés à des changements de « conscience du monde », par exemple lors d'une prise de substances psychotropes.

La « conscience du monde »

De manière plus générale, je définirais la conscience comme la manière dont un organisme perçoit son environnement et en identifie les composantes. Celles-ci sont autant des objets inanimés que des êtres vivants qui interagissent. Cela implique une perception du « moi » de l'individu ; celui-ci étant capable de se différencier du reste du monde, de s'individualiser par rapport à ses semblables (individus de même espèce) et aux autres espèces. Certes, beaucoup de philosophes s'achoppent sur les différences entre « conscience du monde » et « conscience réflexive » (ou « conscience de soi », *self-awareness* en anglais), mais je pense qu'il s'agit d'un faux problème lié à notre anthropocentrisme : dans l'étude d'autres organismes vivants, nous cherchons une perception, si ce n'est identique à la nôtre, au moins approchante, bien que « forcément moins performante » (selon l'idée la plus répandue que l'être humain est au sommet de la pyramide de l'évolution, voir par exemple ci-dessous le test du miroir).

Pour quelle raison aurions-nous besoin de nous individualiser au point de réussir à appréhender notre solitude face à l'ensemble de ce qui nous est extérieur ? Un début de réponse est à trouver dans la reproduction sexuée (qui peut en outre nous permettre de comprendre que, dans le domaine de la conscience, l'humain n'est pas une exception). En effet, le fait de partir à la recherche d'un partenaire de sexe opposé nécessite cette perception de l'autre autant que de soi (du moins dans une grande proportion des espèces qui composent le règne animal). Si l'instinct joue un rôle important dans plusieurs cas, de nombreux autres exemples montrent que les individus ayant accumulé de l'expérience se trouvent plus facilement en contact avec un partenaire que les inexpérimentés.

La reproduction sexuée implique la fécondation d'un gamète femelle par un gamète mâle pour donner un « œuf ». Bien que coûteuse

en énergie, la mise en commun de deux sources de cellules différentes (qu'il a fallu produire) correspond à un brassage génétique nécessaire à la bonne santé d'une espèce. La reproduction sexuée peut se faire au hasard. C'est même le moyen le plus répandu chez les plantes, les champignons et même de nombreux animaux. En revanche, chez les vertébrés à sang chaud (oiseaux et mammifères) et de nombreux reptiles, la règle est l'accouplement de deux partenaires; l'un mâle et l'autre femelle. Admettons que même si l'accouplement est instinctif, la recherche du partenaire est au moins preuve d'une conscience nécessaire (et ce bien que certains individus puissent être trompés par des leurres odoriférants que leur proposent des biologistes malintentionnés!) Chez les vertébrés à sang froid, la reproduction est souvent affaire de synchronisation, mâle et femelle lâchant leur semence à peu près en même temps et dans le même endroit (il y a une infinité de solutions possibles), le plus souvent aquatique. Pourtant, chez le crapaud accoucheur, le mâle recueille entre ses pattes le chapelet de 15 à 80 œufs que la femelle expulse, puis l'arrose de sperme et l'enroule autour de sa taille. Il peut faire l'exercice avec plusieurs femelles, au point de recueillir plus de 200 œufs qu'il porte sur son dos plusieurs semaines, abrité dans sa petite grotte humide, jusqu'à leur maturité. À cet instant, il s'approche d'un plan d'eau et y libère ses œufs, pratiquement prêts à éclore. Cet exemple illustre indéniablement une « conscience du temps et de l'espace ».

À quoi peut donc rêver un bébé-éprouvette après sa naissance? La manière d'appréhender le monde change au cours de la vie d'un individu. Cela revient à accepter que la conscience d'un être se modifie, qu'elle « évolue » en fonction de ses expériences. Remettant chaque jour l'ouvrage sur le métier, l'individu conscient se souvient du passé et peut se projeter dans l'avenir. Il a « conscience » du temps qui passe grâce à sa capacité de mémorisation et de restitution de cette mémoire. Cette évolution a un impact extraordinaire sur la diversification des solutions de la Vie. Elle aboutit à la naissance des sociétés ou du moins d'une certaine forme de socialité, c'est-à-dire une tendance qu'ont des individus à vivre en groupe. Dans ce domaine de recherche, les biologistes se sont surtout focalisés sur les études de comportement des animaux (Levallois 2017). De mon point de vue, il n'y a aucune raison de réserver les termes de « société » ou de « socialité » aux espèces animales, les végétaux, les champignons et les bactéries réalisant également des alliances entre espèces. Il s'agit à nouveau d'élargir le champ

de la sémantique. Lorsqu'il parle de socialité, l'être humain pense à des comportements de rapprochement et de coopération induits par les individus eux-mêmes et non par l'environnement. La biologie du comportement et la sociobiologie (Wilson 1975) se focalisent avant tout sur des observations visuelles. Dès lors, il n'est pas étonnant de ne pas considérer ce qui ne se voit pas. Si nous ne reconnaissons pas de conscience aux plantes et bactéries, nous ne pouvons concevoir que deux de leurs représentants s'attirent mutuellement. Et pourtant ils le font.

Depuis quelques années, les travaux de biochimie et de physiologie (animale ou végétale) réussissent à expliquer les interactions et le mutualisme de deux espèces (et de leurs individus) par les échanges chimiques qu'elles développent. Il en va ainsi des bactéries dont on sait maintenant qu'elles communiquent entre elles grâce à des signaux chimiques nommés « auto-inducteurs » et qui ressemblent à des hormones (Bassler 1999 ; Miller & Bassler 2001). Ainsi, dans le cas de microbes bioluminescents, la lumière ne sera produite qu'à partir d'une certaine densité d'individus qui mettent leur énergie au service de la communauté (Nealson, Platt & Hastings 1970). De même, des espèces potentiellement « pathogènes » ne s'en prennent à leur « cible » (et encore, est-ce vraiment dans ce sens que cela fonctionne?) que lorsqu'elles sont suffisamment nombreuses, assurant ainsi leur réussite. Les populations de *Pseudomonas aeruginosa* peuvent par exemple se développer normalement sans effet virulent durant une longue période. Toutefois, dès que leur densité est suffisante, elles produisent un biofilm toxique pour l'hôte et la pathologie se déclare (Rumbaugh, Griswold & Hamood 2000). Cette communication ne se borne pas à des échanges entre individus de même espèce, mais se généralise à des échanges entre espèces différentes qui peuvent former des colonies très résistantes, notamment aux antibiotiques. Dans cette association, chaque taxon apporte un avantage, afin que l'ensemble soit mieux protégé. On nomme « détection du quorum » (ou *quorum sensing* en anglais), cette capacité à coordonner l'expression de gènes de l'ensemble d'une population ou d'un peuplement bactérien. « Le tout est plus que la somme des parties ». En sachant cela, comment donc ne pas comprendre que la « conscience chimique » naît de cette alliance ? Nous devrions méditer cette idée, ce d'autant plus qu'une telle synergie se déroule également dans le microbiote de notre système digestif et que son équilibre est le garant de notre santé. En considérant ce qui

a été écrit dans le chapitre précédent («Symbiote *versus* parasite, un équilibre fragile»), comment ne pas voir une relation de cause à effet dans la réaction des populations de bactéries (réflexe de survie?) et le déclenchement de la «maladie»?

De même, les végétaux sont capables de communiquer entre eux par échanges chimiques aériens de plante à plante, ainsi que dans le sol avec l'aide des champignons mycorhiziens. Par exemple, dans l'interaction entre le panic (*Dichanthelium sphaerocarpon*) et le plantain (*Plantago major*), la graminée favorise la croissance de deux espèces fongiques qui aident le plantain à croître. Grâce à cette meilleure croissance, le plantain offrira ses sucres à un troisième champignon qui augmentera son flux de transport d'eau et de minéraux aux deux plantes. Ainsi naît un réseau d'échanges favorables à tous sur le long terme, bien qu'il puisse parfois, en présence de conditions microclimatiques particulières, être défavorable à l'une ou l'autre des cinq espèces impliquées (Bever 2002). Cette capacité, méconnue, explique par exemple pourquoi nous retrouvons la même guildes d'espèces de plantes dans deux sites à caractéristiques physicochimiques du sol identiques, mais distants de plusieurs kilomètres. En observant ces alliances, les botanistes ont pu ainsi établir une classification phytosociologique des plantes, c'est-à-dire basée sur les communautés végétales et leur relation avec le milieu. Par exemple, la végétation des dalles siliceuses de montagne est classée dans l'alliance du sedo-scleranthion représentée par plusieurs espèces d'orpins (*Sedum* sp.), de joubarbes (*Sempervivum* sp.), des petites crucifères et des caryophyllacées telles que la gnavelle vivace (*Scleranthus perennis*) qui vivent préférentiellement dans cette communauté d'espèces (Muséum national d'Histoire naturelle 2003-2024). Les adeptes de la permaculture et de l'agriculture biodynamique tirent parti de ces affinités interspécifiques dans leur jardin potager en plaçant l'un à côté de l'autre des légumes «qui s'apprécient» et en évitant que ne se côtoient ceux qui se font concurrence (Holmgren 2002).

Les botanistes n'hésitent donc pas à parler de sociobiologie des plantes, bien que, dans l'acception courante de ce mot, c'est surtout d'animaux qu'il est question (Wilson 1975). Selon la perception classique de l'évolution, le premier pas vers la socialité est le comportement grégaire. Une étude de la physiologie du criquet pèlerin (*Schistocerca gregaria*) met en évidence les changements hormonaux qui se produisent lorsque des solitaires sont en contact les uns avec les autres. Une forte concentration de criquets provoque l'augmentation

du taux de sérotonine (tiens, tiens!) chez chacun d'eux, laquelle se traduit non seulement dans leur comportement («conserver sa place dans le groupe, plutôt que de rester solitaire»), mais également dans leur physiologie (ailes plus longues pour le vol de migration, changement de couleur du corps de l'animal; Anstey *et al.* 2009). Une observation à mettre en lien avec ce que nous savons sur la sérotonine (voir chapitre 2 «Avoir les yeux plus gros que le ventre») et l'interaction entre les bactéries (voir plus haut) pour comprendre aisément que la conscience du criquet puise ses racines dans l'activité des microbes qui font partie de son être. On observe ce gréganisme chez de nombreux arthropodes, des insectes aux araignées en passant par les crustacés. Ce sont presque toujours des facteurs chimiques qui permettent l'agrégation des individus. Les avantages qu'ils en retirent sont une meilleure protection contre les prédateurs, une exploitation facilitée de ressources alimentaires abondantes et, si le contact et la vie de chacun se prolongent, un début de socialité.

Socialisation

Chez les insectes hyménoptères, l'évolution de la lignée des abeilles est particulièrement instructive. Ce groupe serait apparu il y a un peu plus de 100 millions d'années, à la suite d'une période de réchauffement climatique favorisant les plantes à fleurs (Litman *et al.* 2011). Les abeilles primitives seraient issues d'un groupe de guêpes fouisseuses qui auraient commencé à ramener accidentellement du pollen pour nourrir leurs larves. Au fur et à mesure de l'augmentation de la quantité de pollen produite par les nouvelles plantes, ces insectes auraient profité de cet aliment riche, abondant et plus facile à obtenir que celui issu de la capture d'insectes comme pratiquée par les guêpes. Alors que les premières proto-abeilles se seraient spécialisées, les plantes à fleurs en auraient probablement tiré parti en laissant les insectes amener une partie de leur butin vers d'autres fleurs, accomplissant ainsi (et malgré eux) une fécondation croisée; c'est l'hypothèse privilégiée par les spécialistes du sujet (Danforth *et al.* 2013). Mieux encore, la fleur, colorée et suave, produisant de surcroît un nectar riche en éléments nutritifs, attire l'insecte adulte pour qu'il se nourrisse ici plutôt qu'ailleurs. Récemment, une étude met en évidence le champ électromagnétique des fleurs et la capacité que les abeilles et les bourdons ont à le percevoir. Lorsqu'un individu s'approche du centre d'une fleur chargée

de pollen, celui-ci est irrésistiblement attiré par le potentiel électrique inverse de l'insecte (Clarke, Morley & Robert 2017).

Durant des millions d'années, les abeilles sont restées solitaires. Aujourd'hui encore, chez la plupart des espèces d'abeilles, chaque femelle va pondre chacun de ses œufs isolément, dans une petite loge renfermant une réserve de pollen pour la larve. Après sa métamorphose, celle-ci sort de sa chambre et recommence le cycle de ses parents sans les connaître. À ce stade, aucune société n'est possible. Toutefois, un événement saisonnier particulier survient parfois. À la faveur d'un climat plus doux, la production de pollen devient plus abondante et s'étale sur une plus longue période. Cela augmente la durée de vie des adultes qui commencent fortuitement à se côtoyer, puis à se fréquenter. Ainsi, aujourd'hui encore, certaines abeilles dites «solitaires» peuvent former des regroupements de plusieurs dizaines de femelles qui pondent dans des galeries séparées de quelques centimètres. Chacune d'entre elles ne s'occupe que de son propre nid. C'est le cas de la collète commune (*Colletes davesianus*).

L'abeille appelée «andrène des sables» (*Andrena carantonica*) peut être considérée comme un bon exemple du premier stade d'adaptation à une vie subsociale: les femelles, qui nidifient dans le sol, entrent et sortent par une galerie commune (chacune d'elles utilisant cependant un endroit différent pour y pondre et s'occuper de son couvain). De même, la Seladonia dorée (*Halictus subauratus*) du genre *Halictus* (composé de nombreuses espèces solitaires) possède une organisation filiale présociale: au sortir du printemps, la femelle adulte qui a survécu à l'hibernation construit une galerie souterraine pour pondre quelques œufs non fécondés; des «ouvrières» en émergent, qui ressemblent à leur «reine» et aident celle-ci à construire un nouveau nid sitôt l'apparition des premiers mâles pour la reproduction sexuée. Cas intéressant, la petite abeille *Halictus rubicundulus* est sociale dans les régions les plus chaudes (la saison est assez longue pour produire la seconde génération d'ouvrières), mais solitaire en montagne. Des expériences de transplantation des nids ont permis de montrer que le comportement social change en fonction de l'altitude. Avec *Lasioglossum pauxillum*, une étape supplémentaire est franchie dans la sociabilité des abeilles. Au départ, tout se passe comme chez *Halictus subauratus*. Une vingtaine d'ouvrières, plus petites que leur mère, sortent d'une galerie simple que la fondatrice a creusée dans le sol. Ensuite, elles soignent le couvain déposé par la reine et travaillent à l'agrandissement du terrier

en creusant de nouveaux couloirs. L'accumulation des matériaux excavés forme de petites cheminées de terre à l'entrée desquelles se tiennent des gardiennes. Leur rôle est de ne laisser entrer que les ouvrières de la colonie. Si cette organisation sociale ne dure que le temps d'une saison, ce n'est pas le cas pour une espèce voisine, *Lasioglossum marginatum*, chez qui la reine peut vivre plus de cinq ans, et par conséquent constituer une colonie durable. En résumé, la totale socialité d'un groupe (ou «eusocialité» selon Wilson [1975]) dépend de la durée de vie de ses individus, celle-ci devant être suffisante pour que les géniteurs puissent produire de nombreux petits qui seront en contact les uns avec les autres, permettant ainsi de développer une coopération dans les soins apportés aux plus jeunes, ainsi qu'une spécialisation des tâches. Notez que le climat, par son influence sur la quantité de nourriture disponible, joue un rôle non négligeable.

L'un des types les plus avancés de société d'insectes est celui de l'abeille domestique (*Apis mellifera*), chez qui la reine a une espérance de vie qui dépasse trois ans (Seley 2010). De cet individu dépend l'avenir de la société. Elle est la seule à pondre et à pouvoir engendrer des femelles par fécondation des œufs ou des mâles dits « faux bourdons » par simple production d'œufs non fécondés. Les filles de la fondatrice seront stériles tant que la mère se portera bien. Dans certains cas exceptionnels, par exemple la mort de la reine, l'une des ouvrières peut devenir fertile, assurant ainsi la continuité de la société. Plus souvent, le groupe se scinde par production de nouvelles reines qui vont essaimer avec une partie des ouvrières, toutes sœurs les unes des autres. Lorsqu'elles sont larves, ces futures fondatrices sont nourries dans des loges particulières, avec de la gelée royale. Il est intéressant de détailler un peu plus les effets de ce produit « miracle » chez les abeilles. La gelée royale est une substance gélatineuse sécrétée par le système glandulaire céphalique des « nourrices », des ouvrières désignées comme telles et âgées de cinq jours à deux semaines après leur métamorphose. Les larves sont nourries de gelée royale les trois premiers jours de leur existence après éclosion, voire cinq jours si elles sont choisies pour devenir de futures reines (la reine mère, qui a besoin d'énergie pour pondre, pondre et pondre encore, absorbe quant à elle cet aliment toute sa vie, d'où le nom de celui-ci). Compte tenu de son importance dans le développement des larves, la gelée royale est bien entendue riche en hormones de croissance, notamment en œstrogènes. Ce produit miracle contient également sept types de sucres différents, ainsi que

des lipides, des protides, des vitamines (dont la vitamine B5 très présente) et des oligo-éléments. On y trouve aussi de l'acétylcholine, un neurotransmetteur essentiel pour les activités cérébrales cognitives et mémorielles (voir chapitre 2 «Avoir les yeux plus gros que le ventre»). En outre, ses protéines et lipides jouent un rôle dans la détermination de l'identité future de chaque larve : ouvrière, reine ou faux-bourdon. L'acide gras 10HDA, responsable de la formation de l'utérus, et la protéine appelée «royalactine», qui suractive la production des cellules, destinent par exemple les larves au rôle de reine (Kamakura *et al.* 2011).

Il y aurait peut-être là une piste à suivre pour expliquer le syndrome d'effondrement des colonies d'abeilles domestiques (*colony collapse disorder* en anglais); celui-ci se traduisant par la disparition inexplicquée au sortir de l'hiver de la plupart des ouvrières. Un changement hormonal anormal se produit-il à ce moment-là, peut-être en lien avec la qualité du miel ou la production de gelée royale pour nourrir la reine? Parmi la quarantaine de causes avancées, certains des effets qu'elles produisent semblent significatifs. En lien avec l'hypothèse que j'avance, je citerai la présence du virus IAPV (*Israeli acute paralysis virus*) responsable du dysfonctionnement cérébral des abeilles (Li *et al.* 2013). La qualité de production de la gelée royale peut-elle en être affectée?

À ce stade de la lecture, vous conviendrez que les sociétés animales, végétales, fongiques ou bactériennes sont régies par des échanges électrochimiques complexes. Depuis quelques années, les résultats d'études sur l'importance du microbiote pour la bonne santé des abeilles le confirment. Tout d'abord, une équipe de l'Université Washington de Saint-Louis s'est rendu compte que le comportement social des individus était influencé par la composition des bactéries présentes dans le système digestif de ces hyménoptères. Plus précisément, le parfum qu'émet le corps d'une abeille, reconnaissable par l'ensemble des individus de la ruche, serait une conséquence de la composition spécifique du groupe de bactéries vivant dans le tube digestif des abeilles (Vernier *et al.* 2020). La reconnaissance de ce parfum s'apprendrait par «trophallaxie», les ouvrières les plus âgées, parties chercher le nectar, échangeant leur salive avec les plus jeunes restées au nid. Une équipe de l'Université de Lausanne a non seulement confirmé ce fait, mais également mis en évidence la capacité de ces insectes sociaux à prendre soin de leur flore intestinale en produisant notamment des nutriments qui favorisent les bonnes espèces telles que la bactérie *Snodgrassella alvi* (Quinn, El Chazli, Escriv *et al.* 2024). Pour

mettre en évidence cette relation, ils ont utilisé les techniques similaires à celles employées pour étudier le microbiote des humains et des souris (voir chapitre 1 « Des souris et des hommes ») ; à savoir, comparer des populations d'abeilles axéniques, gnotobiotiques et normales, tout en suivant par photoluminescence la réponse de l'espèce de bactérie citée plus haut, par l'expression d'une protéine fluorescente au changement du régime alimentaire de l'abeille (Chhun, Moriano-Gutierrez & Zoppi 2024).

La conscience « réflexive »

La question de la conscience de soi chez les autres espèces animales a été abordée par les zoologues. Le sujet est très pertinent car il permet de répondre à l'une des grandes critiques des philosophes, selon laquelle il n'est pas possible de définir ce qu'est la conscience, car on fait *de facto* appel à elle pour tenter de lui donner une réalité : « La conscience est ce que notre conscience nous en dit ». Il faut bien admettre qu'on bute sérieusement à nouveau sur un problème de langage. Ainsi, réussir à démontrer qu'un autre « sujet » qu'*Homo Sapiens* puisse être doué de conscience, nous donne la clé d'une définition plus large. *A contrario*, elle sonne le glas de l'exception humaine.

Le test qui a été inventé pour prouver cela est relativement simple. Il s'agit de fournir un miroir à l'individu que l'on étudie et d'observer ses réactions. Mais pour s'assurer qu'il a une réelle perception de son image, l'astuce est de placer, après un certain stade d'observation, un point coloré au milieu de son front ; par conséquent à un endroit qu'il ne peut pas voir sans l'aide d'une image reflétée de son propre visage. Les comportements observés varient en fonction des espèces étudiées :

- Certaines ignorent superbement (ou feignent d'ignorer ?) leur reflet ;
- D'autres réagissent sans l'interpréter correctement, pensant avoir affaire à un congénère. C'est le cas du chat qui passe derrière le miroir pour chercher à l'apercevoir, et de certains oiseaux (mésanges, bergeronnettes, merles, rouge-gorges, etc.) qui, pendant la période des amours, se livreront même à des combats acharnés avec lui, comme ils le feraient avec un « concurrent ».
- Seules quelques espèces réussissent le test : le chimpanzé, le bonobo, l'orang-outan, l'éléphant d'Asie, les orques et les dauphins chez les mammifères (Parker, Mitchell & Boccia 1995), ainsi que les pies bavardes et les perroquets gris du Gabon chez les oiseaux (Prior,

Schwarz & Güntürkün 2008). Chez l'humain, l'enfant de moins de 18 mois sera intrigué par la tache sur le front de son reflet et ira gratter la surface miroitante. Avec le temps et l'expérience, il ne commettra plus cette erreur et frottera directement son front à l'endroit où est censée se trouver la marque qu'il ne peut voir sans l'aide du miroir (Archer 1992). Plus récemment, le poisson-nettoyeur et la raie manta ont également démontré leurs capacités (Ari & d'Agostino 2016; Kohda *et al.* 2018); il a évidemment fallu faire preuve d'astuce et adapter le test aux mammifères et poissons marins dépourvus de mains.

S'il a l'avantage d'avoir prouvé que d'autres espèces animales répondent aux critères de définition de la conscience (notamment d'une perception de soi par rapport au reste du monde), ce test a clairement des limites d'application. Il se base sur l'acuité visuelle du sujet. Or, en sortant l'objet d'étude du champ exclusif d'*Homo Sapiens*, on peut facilement accepter que la vision ne soit pas une condition *sine qua non* pour répondre aux critères de définition de ce qu'est la conscience. En outre, ce test ne remet pas du tout en question l'existence d'une conscience chez les animaux qui n'ont pas su «répondre à ce que l'on attendait d'eux» (Soler, Pérez-Contreras & Perlata-Sánchez 2014). Nous savons par exemple que les gorilles ne regardent jamais directement les autres individus «droit dans les yeux»: dévisager un dos argenté est une faute grave qui peut le rendre furieux. Un comportement très codifié qui explique l'échec des gorilles au test du miroir. L'abeille domestique s'en sortirait-elle mieux? Une tache rouge sur son front ne doit sans doute pas l'émouvoir beaucoup, elle qui se baigne parfois dans le pollen de fleurs dont les couleurs diffèrent du pissenlit au magnolia, en passant par celui des roses. En revanche, une goutte de parfum placée sous ses antennes risque de l'alerter. Elle n'aura pas besoin du test du miroir pour nous faire comprendre qu'elle a instantanément pris conscience que quelque chose avait changé dans son environnement, et plus précisément sur elle. Le «moi» de l'abeille se personnalise sans doute mieux dans ses perceptions olfactives que visuelles.

Si l'on en revient au cas d'*Homo Sapiens*, on peut se demander jusqu'où sa capacité à ressentir ce qui se passe en lui, tout comme ce qui change autour de lui, est une appréhension objective de la réalité. Comment se fait-il, par exemple, que nous ayons conscience de notre

environnement extérieur mais pratiquement pas de ce qui se passe en nous ? En d'autres termes, notre « manière de conscience » est-elle la réalité ou n'est-elle qu'une demi-conscience ? Une fois de plus, nous nous trouvons bloqués par notre langage qui oppose de manière unilatérale la « réalité » de l'irréalité, l'objectivité de la subjectivité. De même, comment une expérience scientifique pourrait-elle être « objective » tout en étant subordonnée à la perception de la conscience humaine ? Une subtilité parfaitement prise en compte par les philosophes lorsqu'ils déclarent que « la conscience est ce que notre conscience nous en dit ». Alors, à moins d'admettre que notre objectivité n'est qu'une certaine forme de subjectivité standardisée par des lois mathématiques établies par l'être humain, nous refusons d'accepter l'idée que des échanges d'informations entre microbes définissent une relation consciente. Il faut donc supputer des échanges que notre conscience ne peut pas percevoir pour admettre d'autres formes de consciences, comme celle du poulpe, de l'olivier ou du blob, ce myxomycète unicellulaire aux propriétés étonnantes.

La conscience altérée

Dans notre définition classique de la conscience, nous cherchons également à distinguer l'état dans lequel nous sommes plongés. La conscience serait le domaine réservé de notre « état d'éveil », celui qui nous permet de conclure « je pense donc je suis ». Tout le reste est classé dans le domaine du subconscient : rêves ou hallucinations. Pourtant, notre vie mentale continue à exister dans toutes les phases de notre sommeil, de l'endormissement au sommeil paradoxal. Il est même reconnu que la majorité des divisions cellulaires et surtout la production d'hormones de croissance se réalisent durant la phase de sommeil profond (Van Cauter, Leproult & Plat 2000). Cette phase précède toujours le sommeil paradoxal durant laquelle se produisent la plupart de nos rêves. En outre, une activité génétique particulière semble être favorisée par le sommeil ; on a en effet observé que le taux de réparation des cassures d'ADN (nécessaire pour sa transcription) est plus élevé lorsque le sujet dort (étude sur des souris : Bellesi *et al.* 2016). De même, réaliser une courte sieste quotidienne permettrait de développer significativement la taille de notre cerveau (Paz, Dashti & Garfield 2023). Notre conscience mène donc une double vie qui passe automatiquement par des états différents, du rêve à l'éveil.

Mais que se passe-t-il lorsqu'un individu est totalement privé de sommeil? Devient-il fou comme on le prétend? Et qu'est-ce que la folie? Une autre forme de conscience ou un état psychique altéré? Autant de questions qui montrent l'importance des études sur le sommeil. La privation de ce type primordial de repos influence durablement la conscience des individus en provoquant des changements dans la perception de ce qui les entoure (objets déformés), des hallucinations (apparitions d'images qu'un observateur ne perçoit pas; Fischer-Perroudon, Mouret & Jouvet 1974), des périodes d'euphorie alternées avec des moments d'abattement et de prostration, une désorientation spatiale mais aussi temporelle. La personne privée de sommeil n'arrive plus à se projeter dans le futur, ni même à savoir véritablement qui elle est. Son système immunitaire s'affaiblit. Il est toutefois intéressant de constater qu'un jeûne prolongé et un manque de sommeil aboutissent aux mêmes résultats, à savoir des hallucinations et une perte de repères. C'était du reste (et ça l'est toujours) l'une des techniques éprouvées des moines et autres fervents pour obtenir des visions. Nous nous rapprochons également des rites pratiqués dans de nombreuses communautés de par le monde, qui consistent à danser et à psalmodier sans manger durant des heures, voire des jours, pour entrer en transe et être en contact avec les esprits (Baud 2016).

La transe, pratiquée par une personne initiée au chamanisme, change la perception du « moi » et ouvre la conscience à des connaissances différentes. Nous devons à Corine Sombrun, musicienne initiée au chamanisme tsaatan, une avancée décisive dans l'étude neurologique des états de transe. Pouvant atteindre, par sa seule volonté, un état de conscience modifié (*altered states of consciousness* en anglais), elle a accepté de devenir sujet d'étude. Ses trances ont été mesurées par électro-encéphalographie (EEG) et par tomographie électromagnétique à basse résolution. Les résultats sont surprenants: au repos, l'encéphalogramme ne se différencie pas de ceux du groupe de contrôle (80 femmes droitières), mais en état de transe, les tracés des différents EEG (obtenus à différents stades du processus) ressemblent à ceux de personnes atteintes de schizophrénie et de troubles maniaco-dépressifs (Flor-Henry, Shapiro & Sombrun 2017). La question de fond est la suivante: comment une personne peut-elle passer de la normalité à « l'anormalité », puis revenir à la normalité par un simple claquement de doigts (technique développée par Madame Sombrun, avec l'aide d'un assistant, pour sortir de la transe lors des mesures

neurologiques)? La réponse de la principale intéressée est déconcertante de simplicité : les chamanes mongoles et tsaatans « le font tout le temps et en reviennent toujours » (Hove *et al.* 2015 ; Sombrun 2016) ! Parmi les conclusions de l'étude présentée ci-dessus, je relève que « la transe chamanique n'est pas un phénomène psychotique ou dissocia-tif clinique » et qu'il s'agit « de commencer à construire un modèle psy-chobiologique compréhensible des états de transe, autant du point de vue des recherches de base sur la conscience que du travail clinique sur leurs altérations pathologiques » (Flor-Henry, Shapiro & Sombrun 2017, traduction par l'auteur).

Comprendre l'altérité des consciences humaines permet de s'ouvrir à toutes les formes de « consciences organiques » (appelons-les comme cela) : celles des plantes, des bactéries, des champignons ou d'autres espèces animales. L'usage de substances qui altèrent la conscience est l'un des moyens que l'humanité a trouvés pour diversifier ses capacités de perception. Or, il se trouve que, dans un tout autre but, des expériences sur l'effet de différentes substances psychoactives ont été réalisées sur des araignées orbitèles par le pharmacologue suisse Peter Witt. Si l'objectif de départ était de réussir à changer l'heure à laquelle les araignées construisent leurs toiles, les résultats obtenus furent bien différents. Logiquement, le chercheur commença par administrer une bonne dose de café aux « pénélopes », en imaginant que ce stimulant leur permettrait de se mettre plus tôt à la tâche. Las, le résultat fut lamentable : les toiles ne ressemblaient plus à rien, devenant inutiles pour la capture des insectes volants. Intrigué, Peter Witt administra plusieurs autres substances censées stimuler ou endormir les tisseuses, telles que de la benzédrine (une forme d'amphétamine), du THC (ou « tétrahydrocannabinol », un extrait du *Cannabis sativa*), du LSD (ou « diéthyllysergamide », *Lysergsäurediethylamid* en allemand) et de l'hydrate de chloral (trichloracétaldéhyde monohydrate, un médicament aux vertus hypnotiques). Il put ainsi constater que les toiles construites étaient déstructurées mais encore fonctionnelles sous l'effet de la marijuana ou des amphétamines, géométriques mais très incomplètes sous l'action de l'hydrate de chloral. À l'inverse les araignées arrivaient à tisser des toiles plus régulières avec une faible dose de LSD que lorsqu'elles n'en absorbaient pas (Witt & Rovner 1982). Quant à la caféine, son effet était catastrophique sur le travail de la soie réalisé par les araignées. À petites doses (< 10 µg/araignée), la toile restait géométrique, mais devenait plus petite ; à fortes doses (100 µg/

araignée), la toile était méconnaissable et inutilisable. Un résultat somme toute bien logique dans la mesure où la caféine est une substance active développée par le caféier pour lutter contre les ravages des insectes défoliateurs, animaux qui, comme les araignées, font partie des arthropodes (Nathanson 1984). Bien qu'il ne permette pas d'illustrer le changement d'état de conscience d'un arthropode, cet exemple a au moins le mérite de nous montrer la variété des effets de différentes drogues sur son cerveau, des effets qui lui sont spécifiques (car le café n'a heureusement pas la même action sur nous). La conclusion générale que nous pouvons en tirer est évidente : les substances que nous ingérons ont des conséquences sur notre métabolisme. Cela paraît trivial de le rappeler, mais c'est tout de même nécessaire de l'avoir en tête (!) pour comprendre que n'importe quelle nourriture ingérée, à n'importe quelle dose que ce soit, joue un rôle (même infinitésimal) sur notre état de santé et, partant, sur notre perception et notre état de conscience.

Cela étant, les substances psychotropes qui altèrent la conscience ont ceci de particulièrement intéressant qu'elles miment certains des neurotransmetteurs abondant dans le monde animal. Ainsi, la benzédrine ressemble aux molécules des catécholamines (adrénaline, noradrénaline et dopamine); le LSD est une molécule de synthèse très proche des principes actifs de l'ololiuqui (*Turbina corymbosa*), une plante psychotrope de la famille des liserons; la mescaline produite par le cactus peyotl (*Lophophora williamsii*) mime la noradrénaline; la psilocybine, produite par des champignons (*Psilocybe sp.*), est très proche de la sérotonine, tout comme le diméthyltryptamine de *Diplopterys cabrerana*, une liane qui entre dans la composition de l'ayahuasca; le muscimol d'un autre champignon, l'amanite tue-mouches (*Amanita muscaria*), agit sur les récepteurs de l'acide gamma-aminobutyrique (GABA); enfin, les différentes espèces de tabac (*Nicotiana sp.*) synthétisent la nicotine qui trompe son monde au niveau des synapses qui reçoivent l'acétylcholine ou la dopamine (Schultes & Hofmann 1979; Baud 2018), aidé en cela par l'effet associé d'un autre alcaloïde du tabac, la cotinine (Mulhauser 2023).

Les états d'euphorie, de félicité, de décuplement de la confiance en soi et d'ouverture au monde qu'induit l'usage de ces psychotropes sont en lien avec la production des neurotransmetteurs cités. Or, j'ai présenté dans le chapitre 2 « Avoir les yeux plus gros que le ventre » les liens qui existent entre notre métabolisme et les activités du système

digestif (par exemple selon la qualité du sommeil). Nous avons vu notamment que le stress provoqué sur les micro-organismes symbiotiques de l'intestin pouvait aboutir à la production ou à l'altération de différents neurotransmetteurs. Nous avons également pu déterminer – en tout cas chez les rongeurs – que le microbiote a une influence sur la régénération des cellules nerveuses et le développement du cerveau. Par conséquent, il est plus que probable que les substances psychotropes aient des effets sur notre microbiote, ce qui provoque des neurotransmissions différentes (pour ne pas dire aberrantes) en direction de notre cerveau. Sans être aussi directes, les conclusions des différentes recherches sur le lien entre notre flore intestinale et notre système nerveux central peuvent être synthétisées ainsi :

Il est maintenant évident que la signalisation bidirectionnelle entre le tube digestif et le cerveau, principalement par le nerf vague (nommé axe microbiote-nerf vague-cerveau), est vitale pour maintenir l'homéostasie et peut également être impliquée dans l'étiologie de plusieurs dysfonctionnements et troubles métaboliques ou mentaux (Montiel-Castro *et al.* 2013, traduit par l'auteur).

Une construction symbiotique chimique

Au vu de ce qui précède, nous pouvons envisager par hypothèse la conclusion suivante : la conscience est une construction symbiotique chimique filtrant les informations et assurant une meilleure protection de l'être symbiotique.

Celui-ci peut être l'individu-hôte et la diversité des organismes qu'il accueille et protège, mais il peut tout aussi bien être la réunion de deux microbes. La conscience qui en émerge aide à la construction d'une « identité », celle-ci s'exprimant, au moins chez *Homo Sapiens*, par l'expression du « moi » de chaque individu ; ce qui revient à dire que la conscience n'est pas le « moi ».

Bien que le flux d'informations se fasse dans les deux sens (signalisation bidirectionnelle), le filtre de la conscience freine les perceptions de l'individu-hôte (au niveau de l'hypothalamus chez l'être humain), ce qui explique qu'il soit moins perméable à son monde intérieur qu'à ce qu'il se passe à l'extérieur. Il est par conséquent logique de penser que chaque organisme vivant est pourvu d'une conscience chimique

qui lui est propre. En s'élevant dans l'organisation du vivant, au-dessus des individus, chaque espèce devrait pouvoir être caractérisée par un certain type de conscience, tout comme il en va de la caractérisation morphologique de ses organes. Le bras d'*Homo Sapiens* est différent de l'aile du colibri, de même que leur conscience. Cette spécificité doit nous rendre attentifs au fait qu'il ne faut pas chercher un type de « conscience humaine » chez la laitue, ni un type de « conscience fongique » chez le papillon machaon. Par conséquent, la « conscience » est inscrite dans le continuum du vivant ; une typologie reste toutefois à proposer.

Bibliographie

- Anstey M. L., S. M. Rogers, S. R. Ott, M. Burrows & S. J. Simpson (2009). Serotonin mediates behavioral gregarization underlying swarm formation in desert locusts. *Science* 323(5914) : 627-630.
- Archer J. (1992). *Ethology and Human Development*. Rowman & Littlefield, Lanham.
- Ari C. & D. P. d'Agostino (2016). Contingency checking and self-directed behaviors in giant manta rays: do elasmobranchs have self-awareness? *Journal of Ethology* 34(2) : 167-174.
- Bassler B. L. (1999). How bacteria talk to each other: regulation of gene expression by quorum sensing. *Current Opinion in Microbiology* 2(6) : 582-587.
- Baud S. (2016). *Anthropologies du corps en transes*. Connaissances et Savoirs, Paris.
- Baud S. (2018). *Histoires et usages des plantes psychotropes*. Imago, Paris.
- Bellesi M., D. Bushey, M. Chini & G. Tononi (2016). Contribution of sleep to the repair of neuronal DNA double-strand breaks: evidence from flies and mice. *Scientific Reports* 6(1). doi.org/10.1038/srep36804 (consulté le 30.01.2024).
- Bever J. D. (2002). Negative feedback within a mutualism: host-specific growth of mycorrhizal fungi reduces plant benefit. *Proc. Royal. Soc. London B* 269 : 2595-2601.
- Chhun A., S. Moriano-Gutierrez, F. Zoppi, A. Cabirol, P. Engel & Y. Schaerli (2024). An engineered bacterial symbiont allows noninvasive biosensing of the honey bee gut environment. *PLOS Biology* 22(3) : e3002523. doi.org/10.1371/journal.pbio.3002523 (consulté le 19.03.2024).
- Clarke D., E. Morley & D. Robert (2017). The bee, the flower, and the electric field: electric ecology and aerial electroreception. *J. Comp. Physiol. A* 203 : 737-748.
- Danforth B. N., S. Cardinal, C. Praz, E. A. B. Almeida & D. Michez (2013). The impact of molecular Data on our understanding of bee phylogeny and evolution. *Annual Review of Entomology* 58 : 57-78.
- Fischer-Perroudon C., J. Mouret & M. Jouvet (1974). Sur un cas d'agrypnie (4 mois sans sommeil) au cours d'une maladie de Morvan. Effet favorable du 5-hydroxytryptophane. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 36 : 1-18.
- Flor-Henry P., Y. Shapiro & C. Sombrun (2017). Brain changes during a shamanic trance: Altered modes of consciousness, hemispheric laterality, and systemic psychobiology. *Cogent Psychology* 4 : 1313522.
- Holmgren D. (2002). *Permaculture: Principles and Pathways Beyond Sustainability*. Holmgren Design Services.

- Hove M. J., J. Stelzer, T. Nierhaus, S. D. Thiel, C. Gundlach, D. S. Margulies, K. R. Van Dijk, R. Turner, P. E. Keller & B. Merker (2015). Brain network reconfiguration and perceptual decoupling during an absorptive state of consciousness. *Cereb Cortex* 26(7) : 3116-3124.
- Kamakura M. *et al.* (2011). Royalactin induces queen differentiation in honeybees, *Nature* 473 : 478-483. doi.org/10.1038/nature10093 (consulté le 30.01.2024).
- Kohda M., H. Takashi, T. Takeyama, S. Awata, H. Tanaka, J.-Y. Asai & A. Jordan (2018). Cleaner wrasse pass the mark test. What are the implications for consciousness and self-awareness testing in animals? *bioRxiv*. doi.org/10.1101/397067 (consulté le 30.01.2024).
- Levallois C. (2017). The Development of sociobiology in relation to animal behavior studies, 1946-1975. *Journal of the History of Biology* 51(3) : 419-444.
- Li *et al.* (2013). Viral infection affects sucrose responsiveness and homing ability of forager honey bees, *Apis mellifera* L. *PLOS ONE* 8(10) : e77354. doi.org/10.1371/journal.pone.0077354 (consulté le 30.01.2024).
- Litman J. R., B. N. Danforth, C. D. Eardley & C. J. Praz (2011). Why do leafcutter bees cut leaves? New insights into the early evolution of bees. *Proc. Royal Soc. London B* 278 : 3593-3600.
- Miller M. B. & B. L. Bassler (2001). Quorum sensing in bacteria. *Annual Review of Microbiology* 55(1) : 165-199.
- Montiel-Castro A., R. M. González-Cervantes, G. Bravo-Ruiseco & G. Pacheco-López (2013). The microbiota-gut-brain axis: neurobehavioral correlates, health and sociality. *Front. Integr. Neurosci* 7(70). doi.org/10.3389/fnint.2013.00070 (consulté le 30.01.2024).
- Mulhauser B. (2023). Vers une approche communautaire de la santé par les plantes. In Mulhauser B. (dir.). *Plantes soignantes. Entre pouvoirs et partages*. Épistémé, Lausanne : 227-254.
- Muséum national d'histoire naturelle (2003-2024). Inventaire national du patrimoine naturel. https://inpn.mnhn.fr/habitat/cd_hab/8786/tab/description (consulté le 30.01.2024).
- Nathanson J. A. (1984). Caffeine and related methylxanthines: possible naturally occurring pesticides. *Science* 226(4671) : 184-187.
- Nealson K. H., T. Platt, & J. W. Hastings (1970). Cellular control of the synthesis and activity of the bacterial luminescent system. *Journal of Bacteriology* 104(1) : 313-22.
- Quinn A., Y. El Chazli, S. Escrig *et al.* (2024). Host-derived organic acids enable gut colonization of the honey bee symbiont *Snodgrassella alvi*. *Nature Microbiology* 9 : 477-489. doi.org/10.1038/s41564-023-01572-y (consulté le 19.03.2024).
- Parker S. T., R. W. Mitchell & M. L. Boccia (1995). *Self-awareness in Animals and Humans: Developmental Perspectives*. Cambridge University Press.
- Paz V., H. S. Dashti & V. Garfield (2023). Is there an association between daytime napping, cognitive function, and brain volume? A mendelian randomization study in the UK Biobank. *Sleep Health* 9(5) : 786-793.
- Prior H., A. Schwarz & O. Güntürkün (2008). Mirror-induced behavior in the Magpie (*Pica pica*): evidence of self-recognition. *PLOS Biology* 6(8) : e202.
- Rumbaugh K. P., J. A. Griswold & A. N. Hamood (2000). The role of quorum sensing in the in vivo virulence of *Pseudomonas aeruginosa*. *Institut Pasteur. Microbes and Infection* 2 : 1721-1731.
- Schultes R. E. & A. Hofmann (1979). *Plants of the Gods*. Mc Graw-Hill Book Company.
- Seeley T. D. (2010). *The Honeybee Democracy*. Princeton University Press. Princeton & Oxford.

- Soler M., T. Pérez-Contreras & J. M. Peralta-Sánchez (2014). Mirror-mark tests performed on jackdaws reveal potential methodological problems in the use of stickers in avian mark-test studies. *PLOS ONE* 9(1) : e86193.
- Sombrun C. (2016). Transe chamanique. De la Mongolie au laboratoire de neurosciences. In Baud S. (2016). *Anthropologies du corps en transes*. Connaissances et Savoirs, Paris: 385-400.
- Van Cauter E., R. Leproult & L. Plat (2000). Age-related changes in slow wave sleep and REM sleep and relationship with growth hormone and cortisol levels in healthy men. *JAMA* 284(7) : 861-868.
- Vernier C. L., I. M. Chin, B. Adu-Oppong, J. J. Krupp, J. Levine, G. Dantas, Y. Ben-Shahar (2020). The gut microbiome defines social group membership in honey bee colonies. *Sci. Adv.* 6(42) : eabd3431.
- Wilson E. O. (1975). *Sociobiology: the new Synthesis*. Harvard University Press.
- Witt P. & J. Rovner (1982). *Spider Communication: Mechanisms and Ecological Significance*. Princeton University Press.
- Zager A., M. L. Andersen, F. S. Ruiz & I. B. Antunes (2007). Effects of acute and chronic sleep loss on immune modulation of rats. *American Journal of Physiology. Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 293(1) : 504-509.

15 | La nécessité de la croyance

Il était une fois... dans une région d'Afrique couverte d'une grande forêt, un peuple nommé « masai », qui vénérât la déesse-mère « Enk'ai », source de toute vie sur Terre. Enk'ai avait créé les humains à partir d'un même arbre à trois branches, chacune donnant naissance à une peuplade : les « Dorrobos », chasseurs-cueilleurs à qui la déesse donna le miel et les animaux sauvages ; les « Kikuyus », cultivateurs qui reçurent les graines et les céréales ; et enfin les Masaïs. Les Dorrobos chassaient tant et plus que les animaux durent se réfugier profondément dans la forêt. Les Masaïs adressèrent alors des prières à la déesse pour qu'elle leur donne un animal qui ne partirait pas. Après sept jours d'attente, elle honora ces derniers en leur offrant le bétail. Les vaches descendirent du ciel le long d'une corde faite d'écorce. Les gens s'exclamaient : « Quel bel animal tacheté ! Il ne ressemble ni au gnou, ni au buffle, ni au zèbre. Il est facile à reconnaître, docile et nous donne du lait. Enk'ai a exaucé nos vœux ! » Pour parfaire son œuvre, Enk'ai prit soin des Masaïs et de leur bétail en faisant pleuvoir juste ce qu'il fallait pour que l'herbe pousse correctement, et darder les rayons du soleil de telle manière que les arbres déploient leurs feuilles et offrent un ombrage apaisant. Et lorsque la forêt était trop sombre, elle leur donnait le feu pour qu'ils créent des savanes d'herbes tendres, bonnes pour leur bétail. Alors les Dorrobos demandèrent à leur tour d'avoir des vaches, mais pour seule réponse, la déesse leur donna un arc et des flèches ; fâchés de ne pas recevoir ce qu'ils avaient demandé,

ils coupèrent la corde du ciel. Ceci ne fit que conforter les Masaïs dans leur certitude d'être le peuple élu, logé au centre de l'Univers (à l'endroit même où la corde avait atteint la Terre), et dépositaire exclusif du cadeau divin de l'élevage. Après s'être montrés impatients, les Dorrobos furent contraints de partir de plus en plus loin pour continuer à chasser dans la forêt, et plus personne n'entendit parler d'eux. Quant au métier de cultivateur pratiqué par les Kikuyus, il est depuis vécu comme un dés-honneur pour tout Masaï qui doit l'exercer.

Cette histoire savoureuse atteste de la sagesse des tribus traditionnelles, puisqu'elle donne aux pasteurs masaïs le bon rôle et exhorte à ne pas suivre l'exemple des chasseurs-cueilleurs. Elle se raconte de sage en sage dans les tribus masaïs du Kenya, de même que se sont transmis, de tout temps et sur tous les continents, de multiples récits inventés par les populations pour se rassurer et affermir leurs liens. Des récits cependant bien souvent éloignés de la réalité... Ainsi, aucune action humaine ou divine n'est à l'origine des grandes savanes herbeuses d'Afrique, qui sont avant tout le résultat d'une conjonction croisée de deux phénomènes : d'une part un climat sec et chaud, et d'autre part la présence d'un nombre important d'herbivores, comme l'éléphant et de grands ruminants, qui façonnent la savane en permanence, ne laissant aux arbres et arbustes d'autres choix que d'essayer de se prémunir (ainsi en va-t-il des différentes espèces d'acacias dont les épines sont de plus en plus coriaces !) En outre, si le feu permet effectivement la régénération d'herbes tendres, il n'est pas uniquement dû à l'action de l'être humain ; il peut aussi avoir pour origine des phénomènes naturels tels que les orages qui provoquent régulièrement des incendies à grande échelle (Dublin 1995).

De l'importance des croyances

Rares, très rares même, sont les biologistes qui ont eu le courage de s'aventurer sur le terrain de l'étude de la croyance. La raison en est simple : la science, construite sur l'expérimentation et la répliquabilité des expériences pour tendre à l'objectivité, cherche à effacer toute idée réfutable. De fait, la « croyance » est un concept bien délicat à manipuler, car ambigu. Il désigne à la foi l'état d'esprit de celui qui croit et le résultat de sa pensée, son contenu (Engel & Michaud 2001). Le philosophe Popper résume ainsi l'attitude rationnelle des scientifiques : ils « essaient d'éliminer leurs théories fausses, ils essaient de les faire mourir à leur place ».

Une tentative qui lui semble vouée à l'échec pour le commun des mortels, puisqu'il s'empresse d'ajouter : « Le croyant – qu'il soit animal ou homme – périt avec ses fausses croyances » (Popper 1972).

À croire donc (!) que la science ne doit pas s'occuper de ce sujet trop souvent objet de jugements arbitraires. Je pense au contraire qu'il faut urgemment réfléchir à la question : en quoi la croyance nous aide-t-elle à vivre ? Mais avant d'entrer dans le vif du sujet, j'aimerais pouvoir dissiper tout malentendu : mon approche sera non pas spirituelle, mais biologique. Je respecte profondément les croyances des communautés humaines et n'ai nulle intention de choquer en dissertant sur la justesse des unes ou des autres, ou en vous suggérant de renoncer aux vôtres. L'histoire qui introduit ce chapitre illustre à quel point elles portent le terreau fertile des traditions et peuvent notamment contribuer au respect de la nature. De façon plus globale, en alimentant notre « conscience morale » de ce qui est bien ou mal, honorable ou punissable, autorisé ou interdit (les bases de la « justice »), elles font œuvre de culture et de société. Et je vais encore plus loin en affirmant ici que les croyances ne sont pas simplement utiles : la capacité de croire est une nécessité, non seulement pour les êtres humains, mais également pour tous les organismes vivants. Elle participe au principe de maintien de l'homéostasie, répondant ainsi à l'une des fonctions majeures du vivant ; vaste programme !

Mais qu'est-ce que la croyance ? Le *Larousse* nous dit que c'est le « fait de croire à l'existence de quelqu'un ou de quelque chose, à la vérité d'une doctrine, d'une thèse ». Quant à moi, intuitivement, je la définirais comme l'acceptation par notre conscience d'un fait ou d'une chose dont on ne peut pas prouver la réalité et pour laquelle il subsiste forcément un doute. La conscience joue en effet un rôle majeur dans cette démarche ; c'est elle qui déclenche le processus d'acceptation et le mémorise. L'instinct (ou l'inconscient) peut aussi nous pousser à croire quelque chose, mais seulement par « réflexe » ; ensuite, libre à nous de nous rétracter et d'oublier, ou au contraire de confirmer la justesse du réflexe et de s'en souvenir. Comme l'écrit Nietzsche, « l'expérience n'est possible que grâce au secours de la mémoire... La vie est fondée sur l'hypothèse d'une croyance au durable, au retour régulier des choses » (Nietzsche [1901] 1995, p. 324). Comme notre conscience est la capacité à se reconnaître face à l'environnement qui nous entoure et face aux autres, la croyance, produit de notre conscience entraîné par notre mémoire, s'inscrit dans le temps. Mais celle-ci peut être très fugace.

La croyance naît et se transmet

Pour comprendre comment naît une croyance, prenons un exemple simple et anodin, issu de notre quotidien. Si un matin, vous demandez à l'une des personnes qui partagent votre vie « quel temps fait-il aujourd'hui? », celle-ci pourra vous répondre « je crois qu'il fait beau ». Elle aura utilisé le verbe « croire » car en réalité, elle n'en sait rien : elle n'a qu'une perception intuitive de la météo, peut-être liée à l'atmosphère ambiante, la lumière environnante ou l'humidité de l'air. Mais en s'approchant de la fenêtre, elle va pouvoir confirmer ou infirmer sa croyance. Il s'agit là d'un processus essentiel à comprendre, car expliquant de nombreux comportements : la croyance est une capacité d'adaptation à des situations futures. Je le répète car il s'agit d'un fait essentiel, la croyance est inscrite dans le temps ; le résultat d'un système d'anticipation. Misslin la définit quant à lui comme l'« aptitude à établir des liens de confiance avec des lieux et des congénères, liens sans lesquels l'être serait en permanence exposé à l'incertain, à l'inconnu, au hasard, et donc soumis à des stress chroniques » (Misslin 2010).

Partant de cette analyse, quelques biologistes se sont intéressés aux comportements de croyance. Puisque les autres espèces animales ont chacune un type de conscience, il doit être possible de mettre en évidence des comportements qui montrent qu'elles anticipent des situations, c'est-à-dire qu'elles acceptent de faire telle ou telle chose car elles croient en quelque résultat source de bien-être et nécessaire à leur vie. De toutes les merveilles de la nature décryptées par les biologistes, la « danse des abeilles » en est sans doute la forme la plus aboutie (von Frisch 1946). C'est ainsi que sont appelés les mouvements d'une ouvrière butineuse revenant de son exploration chargée de pollen, afin de signaler l'emplacement de la nourriture à ses sœurs restées dans la ruche. Sur l'un des rayons, elle tournera en rond ou « en huit » selon un rythme précis, une marche lente indiquant une source de pollen très éloignée, une cadence très rapide un champ de fleurs à proximité de leur abri. Mais encore faut-il pouvoir donner la direction d'envol vers le butin. L'astuce de l'abeille est de réaliser sa danse « en huit » selon un angle bien spécifique par rapport à la verticale ; un angle par ailleurs identique à l'angle que fait la direction de la nourriture par rapport à celle du soleil ! Il s'agit d'une abstraction remarquable : l'insecte réussit à transposer sur un plan vertical les coordonnées d'un point situé sur un plan horizontal, afin de les transmettre à des congénères

capables d'interpréter cette transposition. Toutefois, ce qui nous intéresse le plus dans le cadre de ce chapitre sur les croyances, c'est le fait que les autres abeilles reçoivent le message, le comprennent et le considèrent comme vrai. Elles croient ce que leur raconte la messagère avec les mouvements de son corps. Instinct me direz-vous? Pourtant, lorsqu'une ouvrière inexpérimentée tente une danse, personne ne bouge. Par l'odeur et la quantité de pollen ramené, les autres butineuses ont tout de suite compris qu'il existe une source de nourriture abondante, mais le message n'étant pas clair, elles ne partent pas dans l'azur « au petit bonheur la chance ». Chez une nouvelle butineuse, l'apprentissage de la danse dure deux jours. Ce type de langage n'étant pas inné, sa « lecture » ne peut pas l'être non plus. Et cela se vérifie à tous les coups : une fois que les butineuses ont reçu un message clair, elles s'envolent jusqu'au lieu de récolte. Néanmoins, tant qu'elles n'ont pas atteint leur but, elles ne peuvent pas « être sûres que c'est vrai ». Leur « doute » ne s'exprime évidemment pas selon les termes que je viens d'utiliser. Gageons que l'expression « il faut le voir pour le croire » se traduit chez les abeilles par des perceptions chimiques particulières au niveau des antennes.

Cette capacité à « croire » et à transmettre sa croyance s'observe chez bien d'autres espèces. Lors d'une exposition sur le thème de la science⁴⁸, j'ai repris et adapté (afin de la présenter au public⁴⁹) une expérience d'étude sur le « comportement de croyance » des souris. Celle-ci consistait à observer à différentes reprises le périple d'une souris à la recherche de nourriture dans un dédale de neuf terrariums, au sein duquel elle pouvait circuler dans tous les sens (vers le haut, vers le bas, à gauche ou à droite). Chaque terrarium était muni d'un fond interchangeable de couleur bleu, jaune ou rouge, ainsi que de parois amovibles permettant de modifier la configuration du labyrinthe à chaque itération. La souris et la nourriture étaient toujours placées dans des zones respectivement bleues et jaunes, mais jamais les mêmes afin que le chemin à suivre soit toujours différent, et que la souris ne puisse pas *croire* le contraire ; ainsi, tout phénomène d'habituation était exclu. Dans son périple, la souris traversait d'autres espaces bleus, tous imprégnés d'une odeur familière, afin qu'elle puisse s'y *croire* en sécurité. Au contraire, les espaces rouges étaient imprégnés d'une odeur répulsive afin qu'elle puisse s'y *croire* en

⁴⁸ Exposition « Sacrée science. Croire ou savoir... » créée et présentée au Muséum d'histoire naturelle de Neuchâtel en 2011.

⁴⁹ Dispositif initial de René Misslin, Université de Strasbourg.

danger (bien entendu, pour les besoins de l'exposition et la présentation au public, le danger était très relatif et rien de fâcheux ne pouvait arriver aux rongeurs). L'objectif de l'expérience était de savoir si les souris se comportaient toutes de la même façon. Ou si, au contraire, elles faisaient des choix différents. Ce fut justement le cas : certaines ont pris des risques en choisissant systématiquement le chemin le plus court mais potentiellement dangereux, quand d'autres ont privilégié la sécurité en faisant des détours. D'autres enfin ont vagabondé de manière aléatoire, ne semblant pas tenir compte de la nature des espaces traversés, au point parfois de rapporter et de manger de la nourriture dans un espace rouge. Cette expérience prouve donc une chose : la croyance est d'abord une réponse individuelle.

Bien sûr, on peut prétendre que c'est simplement l'instinct des souris qui les guide, et non des « croyances ». Mais une seconde phase de notre expérience prouve qu'une croyance se partage, et donc s'acquiert (ce qui, par définition n'est pas le cas de l'instinct) : en associant une souris expérimentée à une débutante, on observe que la première guide la seconde en partageant avec elle sa croyance (« cela vaut la peine de braver le danger » ou « soyons prudents »⁵⁰), et ce d'autant plus facilement qu'il y a un contact filial. Un résultat qui souligne l'un des intérêts majeurs de la socialité : l'expérience partagée abaisse le stress des individus ce qui, en langage darwinien, se traduit par une valeur adaptative (ou « valeur sélective », *fitness* en anglais) plus élevée, aboutissant à une meilleure activité reproductrice. Dans notre approche symbiologique, cela permet de comprendre l'importance de consolider les liens, attribuant à la croyance des uns un effet apaisant sur l'ensemble (y compris dans le cas du microbiote).

La croyance sous influence, le ciment du groupe

La croyance, liée à la conscience de soi, est donc individuelle, mais dans les sociétés animales, elle est influencée par la culture du groupe. Cela se passe à tous les niveaux de croyance, légère et fugace dans le cas de la pluie et du beau temps (« Je crois qu'il fait beau ! – Ha, tu crois ? J'ai plutôt l'impression qu'il pleut. – Oui, tu as sans doute raison. »), *a contrario* lourde de conséquences dans les croyances dogmatiques de

⁵⁰ Il s'agit là évidemment d'une traduction langagière humaine à des signaux chimiques et ultrasoniques que se transmettent les souris.

groupes. Il n'est pas question dans cet ouvrage de développer une thèse sur l'intégrisme du genre humain qui mène aux guerres et aux destructions incontrôlées de l'environnement, mais plutôt de comprendre que la croyance s'inscrit dans un rapport à l'autre et au monde qui nous construit en tant qu'individu. Voici ce que prétend Nietzsche :

Sans l'extraordinaire sécurité de la croyance, sans la complaisance infinie de la croyance, ni l'homme, ni l'animal ne pourraient subsister... L'habitude et la croyance absolue que toutes choses doivent être comme elles sont, voilà le fondement de toute croissance, de toute augmentation de force (Nietzsche [1901] 1995).

Ainsi, que l'on soit humain, souris, zèbre ou baleine, croire revient à accepter les valeurs communes qui unissent un groupe au point de lui faire confiance. Le soi-disant suicide des cétacés échoués sur une plage est peut-être un acte de croyance, un respect envers l'individu qui mène le groupe. De même, les zèbres et les gnous qui se jettent dans la gueule des crocodiles sont-ils guidés par la confiance envers le troupeau, mené lui-même par la croyance, renforcée chaque année, des individus les plus âgés à retrouver les meilleures pâtures.

De nombreuses études sur les rongeurs ont en effet démontré le rôle primordial des liens parentaux et sociaux sur la vitalité du groupe (Misslin *et al.* 1982, Hoffer 1994, Jahng *et al.* 2011, Beery & Kaufer 2015). De jeunes souris sevrées brutalement vont développer une anxiété continue, ayant perdu leurs repères (« ne sachant plus qui croire »), contrairement à celles dont la fin de l'allaitement se passe de manière progressive. Un phénomène généralisé lorsque toutes les mères s'accordent à imiter le comportement de leurs voisines (Hodé *et al.* 2000 ; Belzung 2007). Dans ce cadre-là, les observateurs n'arrivent pas à déterminer l'influence primordiale d'un individu sur les autres, comme si le signe d'un changement général de comportement était évident pour tous, de manière simultanée. Toutefois, il est nécessaire de nuancer ce que dit Nietzsche. La croyance structure la société, mais elle n'est pas immuable. Le comportement de croyance n'est pas « absolu » ; il induit la possibilité d'une remise en question. Il est donc préférable à la certitude, puisqu'il permet au groupe de rester adaptable aux conditions changeantes de l'environnement.

Après avoir émis, dans le chapitre précédent, l'hypothèse selon laquelle une conscience existe en tout être vivant, j'y ajoute dans ce

chapitre les comportements de croyance et propose de les placer au cœur des réflexions sur le continuum du vivant. Mais conscience et croyance sont deux concepts à première vue étrangers, voire incompatibles, avec une vision « naturaliste » du monde selon laquelle la nature n'a ni but ni intention. Il semble donc qu'une nouvelle énigme se présente, que nous allons à présent tenter de résoudre.

Bibliographie

- Beery A. K. & D. Kaufer (2015). Stress, social behavior, and resilience: insights from rodents. *Neurobiology of stress* 1: 116-127.
- Belzung C. (2007). *Biologie des émotions*. De Boeck, Bruxelles.
- Dublin H. T. (1995). Vegetation dynamics in the Serengeti-Mara ecosystem: the role of elephants, fire and other factors. In Sinclair A. R. E & P. Arcese. *Serengeti II. Dynamics, Management and Conservation of an Ecosystem*. The University of Chicago Press: 71-90.
- Engel P. & Y. Michaud (2001). *Sommes-nous responsables de nos croyances?* Université de tous les savoirs, 6. Odile Jacob, Paris: 429-439.
- Hodé Y., C. Ratomponirina, S. Gobaille, M. Maitre, C. Kopp & R. Misslin (2000). Hypoexpression of benzodiazepine receptors in the amygdala of neophobic Balb/c mice compared to C57BL/6 Mice. *Pharmacology, Biochemistry and Behavior* 65: 35-38.
- Hoffer M. A. (1994). Hidden regulators in attachment, separation and loss. In Fox N. A. The development of emotion regulation. Biological and behavioural considerations. *Soc. Res. Child Development* 59(2-3): 192-207.
- Jahng J. W., S. B. Yoo, V. Ryu & J. H. Lee (2011). Hyperphagia and depression-like behavior by adolescence social isolation in female rats. *Int. J. Dev. Neurosci.* 30(1): 47-53.
- Misslin R. (2010). *Le comportement de croyance*. Publibook, Paris.
- Misslin R., F. Herzog, B. Koch & P. Ropartz (1982). Effects of isolation, handling and novelty on pituitary-adrenal response in Mouse. *Psychoneuroendocrinology* 7(2-3): 217-221.
- Nietzsche F. (1901 [1995]). *La volonté de puissance*. Gallimard, Paris.
- Popper K. R. (1972). *La connaissance objective*. Flammarion, Paris.
- Von Frisch K. (1946). Die Tänze der Bienen. *Österreichische Zoologische Zeitschrift*, 1: 1-48.

16 | Qu'est-ce que la Vie ?

«Pour comprendre notre monde, il faut se placer dans un contexte cosmique», nous rappelle Sean Carroll (2018). Pour l'être humain, ce contexte est celui des lois de la physique qu'il a pu définir en observant une infime partie de l'Univers. Selon les connaissances actuelles, il en a tiré l'enseignement suivant : l'histoire universelle s'inscrit dans le temps et l'espace. Cette histoire a débuté il y a 14 milliards d'années avec le Big Bang. Depuis, l'Univers est en expansion et son état physique passe d'un état d'entropie faible à un «désordre» de plus en plus élevé. Ce développement est uniforme dans l'espace, mais dynamique dans le temps. Ainsi, le concept que les physiciens nomment «la flèche du temps» est construit sur l'idée que l'entropie augmente quand le temps s'écoule dans le sens de l'avenir et que, par conséquent, elle diminue en remontant vers le passé, pour être pratiquement nulle à l'origine. Même si, par les termes des lois de la physique, l'expansion infinie de l'Univers ne se fait ni dans une direction particulière, ni selon des causes voulues, dans le moment présent, nous nous accrochons à l'idée d'un changement entre le passé et l'avenir. Cette «hypothèse du passé», invérifiable, à part par les équations quantiques, est l'une des croyances fondatrices de notre rapport au monde et à la manière dont on l'observe. Carroll le résume bien :

Ce raisonnement procède pas à pas en remontant 14 milliards d'années dans le passé, jusqu'au Big Bang. C'était peut-être ou peut-être pas le commencement absolu de l'espace et du temps, mais très certainement le commencement de la partie de l'Univers qu'on peut observer ; l'origine de la flèche du temps est, par conséquent, ékinologique⁵¹, elle résulte d'une condition particulière dans un passé lointain.

Avant d'aller plus loin, il est nécessaire de faire un petit aparté sur le naturalisme prôné par la science d'aujourd'hui et auquel j'adhère. Dans la perspective de la philosophie naturaliste, la physique joue un rôle fondamental puisqu'elle permet à elle seule d'énoncer toutes les lois et tous les phénomènes rencontrés dans la nature, sans explication d'intervention transcendante et, de fait, sans cause surnaturelle (Esfeld 2009). On parle alors de « physicalisme » pour prétendre que toutes les connaissances sont expliquées par les énoncés complets de la physique, touchant ainsi à l'universalité. Cela implique par conséquent que tous les savoirs acquis par les autres disciplines scientifiques (chimie et biologie notamment) ne peuvent être complets s'ils ne sont pas expliqués par les lois de la physique.

Or, les concepts de croyance et de conscience ne semblent pas pouvoir satisfaire aux lois strictes de la physique – la nature n'a pas de but ni d'intention. Ils flottent donc à la frontière d'un idéalisme anthropocentrique flou selon lequel le dualisme corps-esprit de l'être humain reste une exception inexpliquée. Je pense qu'il s'agit là avant tout d'un problème épistémologique, certes complexe, mais qu'il faut avoir le courage de tenter de démêler.

Nous l'avons vu dans le chapitre précédent – et la phrase de Carroll que je viens de citer le confirme –, nos croyances sont nécessaires, mais plus encore, elles sont intimement liées à cette conscience du temps qui passe, nous permettant d'échafauder un avenir possible. La conséquence logique de cette capacité de croyance est de pouvoir construire sans cesse des hypothèses dans le présent (notamment des hypothèses scientifiques physicalistes!), en reliant le passé et l'avenir. Ces hypothèses sont les définitions de causes (et d'impossibilités probables de causes) en lien avec les effets que l'on observe. Ce raisonnement modal nous est nécessaire pour rester en vie. Mais la Vie, telle que je la conçois, est un continuum, si bien que, en l'état actuel de nos

⁵¹ Pour Carroll, le monde est ékinologique, du grec *ekinon* qui signifie « début », en opposition à la pensée classique d'un monde téléologique, qui tend vers un futur déterminé.

connaissances, il faut considérer que consciences et croyances sont des phénomènes vitaux partagés par l'ensemble des organismes vivants, même si leurs expressions diffèrent selon les types (virus, bactéries, champignons, etc.) et que les moyens de les mettre en évidence sont encore bien embryonnaires dans la science du XXI^e siècle.

Une approche cosmologique

La symbiologie est une approche scientifique qui doit permettre de comprendre l'évolution comme une action nécessaire au maintien du vivant dans son ensemble et non le résultat de mutations de gènes par erreur. Elle permet de jeter les bases de cette approche cosmologique de la Vie en partant du postulat que nous avons déjà énoncé dans plusieurs chapitres :

Où qu'elle se situe dans l'Univers, mais en présence d'une source d'énergie, la Vie s'auto-organise, dès son émergence sur un corps céleste, en un système qui lui est propre en ce lieu et qui évolue sous l'influence des conditions environnementales qu'elle rencontre.

Lorsque j'ai présenté ce postulat pour la première fois dans une conférence publique⁵², par chance (ou par hasard?), un astrophysicien se trouvait dans la salle. Il est venu vers moi à la fin de mon exposé et m'a simplement dit que mon postulat était trop vague, puisque, selon les termes employés, on pouvait affirmer que les étoiles étaient des êtres vivants. Je lui suis profondément reconnaissant d'avoir pointé du doigt un problème récurrent en science; celle des domaines de validité non hiérarchiques qui donnent à penser qu'une théorie émergente est obsolète et s'effondre dès lors qu'elle ne s'applique pas à l'ensemble des champs de la connaissance. Ce spécialiste d'un autre domaine m'a rendu attentif au fait que, dans l'approche cosmologique, «l'universalité» d'un phénomène devait suivre, selon notre logique humaine, un système hiérarchisé, du macroscopique au microscopique. Un physicien des particules aurait également pu me faire une critique semblable en prétendant que, selon mon postulat, les atomes sont des êtres vivants. Cet apparent problème est résolu dès l'instant où le champ d'application est précisé. Il s'agit donc de proposer une définition de ce

⁵² Le 17 octobre 2019, au Club 44 de La Chaux-de-Fonds (Suisse).

qu'est la Vie dans le cadre universel du postulat, et de le préciser dans son contexte terrestre.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 9 « Une question de vie et de mort », l'exercice est beaucoup plus ardu que ce qu'on imagine car deux difficultés se présentent sur des plans différents. La première est de savoir dans quelle mesure il est possible d'accepter la définition actuelle de la Vie en la plaçant dans le contexte du continuum du vivant. La seconde, beaucoup plus intimidante, est de déterminer s'il est possible et légitime de proposer une définition universelle de la Vie, alors que rien ne nous permet d'affirmer qu'un processus semblable ou « approchant » est possible ailleurs que sur Terre. Je pense que oui, et j'ajouterais que c'est même essentiel.

Pour préciser notre définition de la Vie, la logique veut que nous débutions par ce que nous connaissons et avons observé jusqu'à ce jour, quitte à, si besoin, faire *tabula rasa*. Cependant, dès le départ, il me semble nécessaire de préciser une chose dans le cadre du postulat décrit ci-dessus : la définition de la Vie exclut celle d'une vie, soit celle d'un individu qui naît, grandit et meurt. Il faut rapidement s'écarter de ce concept qui souffre de tant d'exceptions qu'il en devient obsole ou uniquement probable dans le champ de la zoologie (et encore). De même, pour aboutir à une vision universelle du vivant, il faut s'extraire du particulier (l'espèce) pour tendre au global (le continuum du vivant). Par exemple, les approches restrictives de la théorie synthétique de l'évolution ne sont d'aucun secours pour décrire la théorie émergente du continuum du vivant. Des trois définitions de la Vie proposées dans le chapitre 9 « Une question de vie ou de mort », on peut donc mettre de côté la deuxième et la troisième, pour ne retenir, comme point de départ, que la première :

[La Vie est un] caractère propre aux êtres possédant des structures complexes (macromolécules, cellules, organes, tissus) capables de résister aux diverses causes de changement, aptes à renouveler, par assimilation, leurs éléments constitutifs (atomes, petites molécules), à croître et à se reproduire.

Le principal problème de cette définition est qu'elle subordonne le « processus » (la Vie) à ces sujets. En effet, « caractère propre aux êtres » signifie que l'on réduit la Vie à ceux qui la possèdent. Ce serait comme définir que l'Univers « est propre aux corps spatiaux qui s'y meuvent ».

La Vie n'est donc pas un « caractère propre à... » Mais alors, comment la caractériser : est-ce un « système », un « phénomène naturel », un « processus » ? Dans ma compréhension des choses, le « système » est un résultat ; je le cite du reste dans le postulat : « la vie s'auto-organise [...] en un système qui lui est propre ». « Phénomène naturel » paraît quant à lui trop vague, car l'essence même de la nature est englobante : les multiples univers s'y meuvent et les actions « artificielles » de l'être humain y sont absorbées. J'opterais donc plutôt pour un « processus » (ou un terme s'approchant de l'idée de processus ; mot que les physiiciens seraient sans doute capables de définir).

Remplissant toutes les conditions des lois de la nature, ce processus doit nécessairement s'accorder avec les lois de la thermodynamique et de la physique des particules. C'est un présupposé qu'il ne me semble donc pas nécessaire d'intégrer dans la définition : pour « être » dans l'Univers, il faut bien s'en accommoder ! En outre, le postulat fait état de la présence d'une source d'énergie. Par rapport à ce que l'on connaît de la Vie terrestre, la principale source d'énergie est un astre, mais il en existe d'autres (par exemple, le magma en sous-sol), c'est pourquoi le postulat reste vague à ce sujet. Pourtant, quelle que soit cette source, elle met en jeu des particules électriques (par exemple, photons, électrons libres) et des atomes qui s'assemblent. Si nous devions donc caractériser le processus, nous dirions qu'il est chimique et nous pourrions le préciser en ajoutant le préfixe « électro- » (a contrario, dire qu'elle est « bio- » conduirait à une tautologie). Ce « processus électrochimique » obéit sans ambiguïté possible aux lois de la physique. Il s'accommode toutefois d'une apparente distorsion aux règles du deuxième principe de la thermodynamique. Cette anomalie n'est qu'apparente et les astrophysiciens nous en donnent une fois de plus l'explication : du Big Bang à l'état d'équilibre, l'entropie ne fait que croître, mais lorsqu'elle aura atteint son paroxysme, plus aucune énergie libre ne circulera. La Vie a besoin de cette énergie libre, de la « capturer » afin de l'utiliser pour se maintenir. Le processus du vivant ne fait que « ralentir » l'entropie, par effet de cycle, mais finit tout de même par contribuer à sa croissance. Il faut toutefois retenir de ceci que la Vie « répond », « lutte », « se bat », « résiste »... Bref, elle imprime une action dynamique permanente nommée « homéostasie » par les biologistes, pour rester en état « d'entropie contrôlée » ou néguentropie. Comment traduire en mots cette dynamique que n'ont ni les roches, ni le vent, ni même les planètes (en réponse à la proposition de Lovelock & Margulis [1974], sans la Vie, la

Terre n'est pas Gaïa et ne peut par conséquent être considérée comme un organisme vivant) ?

Nous voici donc avec un début de définition : la Vie est un processus électrochimique dynamique. Doit-on s'arrêter là, ou bien peut-on préciser certaines caractéristiques, tant au niveau universel que terrestre ? Il faut bien avouer qu'à ce stade, cette proposition ne fait que dessiner les contours du phénomène. Tentons donc l'expérience d'une description plus précise. Dans cette optique, le plus sage est d'aller chercher des informations vers ceux qui ont déjà travaillé sur cet épineux problème.

Je dois dire que je suis assez déçu des biologistes du XX^e siècle qui, dans la continuité du point de vue de Claude Bernard (1878), ne se sont occupés que d'étudier le vivant par organismes séparés sans se préoccuper de proposer une ontologie de l'objet de leurs études. Bernard disait notamment que les biologistes n'avaient pas à dire ce qu'est la Vie, car se baser sur une définition était contraire à la déontologie. Il prétendait également que c'était « illusoire et chimérique, contraire à l'esprit même de la science, d'en chercher une définition absolue ». Il a donc fallu attendre la mise en forme de la mécanique quantique pour que l'un de ses théoriciens, Erwin Schrödinger, s'attelle à cette tâche nécessaire. Dans son ouvrage *What is Life?* (1944), il construit sa définition du vivant autour de l'idée que celui-ci est capable d'« échanger de la matière avec son environnement, et cela sur un temps plus long qu'attendu pour qu'un élément inanimé perdure dans des circonstances similaires ». L'idée sous-jacente est celle du maintien du processus vital qui découlera plus tard sur la notion d'« autopoïèse », mais elle soulève une problématique connue sous le nom de « paradoxe de Schrödinger » : comment un organisme peut-il maintenir l'ordonnement de ses cellules durant un certain laps de temps, sans transgresser le deuxième principe de la thermodynamique ? La réponse a déjà été donnée ci-dessus : le processus du vivant ne fait que « ralentir » l'entropie, par effet de cycle, mais finit tout de même par contribuer à sa croissance. De même, dans le Système solaire, on estime que si la Terre émet une quantité d'énergie équivalente à celle qu'elle a captée du Soleil, elle le fait au cours d'un processus qui voit l'entropie s'accroître d'un facteur vingt (Carroll 2018). Rappelons en effet pour préciser que, même dans un état d'ordre maintenu, un organisme vivant n'est jamais un système fermé et que le flux d'énergie, sans être forcément constant, y est continu, si bien qu'à cet ordre interne répond un désordre externe accroissant l'entropie.

Mais ce n'est pas tant la résolution du paradoxe de Schrödinger qui est intéressante, que les implications du raisonnement qui la soutient : tant que l'on cherche à définir la Vie en considérant exclusivement l'activité individuelle des organismes, on ne se contente que d'une partie de l'équation. Car s'il y a maintien d'un état d'«entropie contrôlée», celui-ci passe par le recyclage incessant des déchets (ou énergie dégradée) d'un type d'organisme à l'autre. Ce maintien n'intervient pas au sein d'un unique organisme, mais bien dans le phénomène global que j'ai appelé «continuum du vivant» et qui intègre aussi la réutilisation d'énergie potentielle stockée dans les organismes morts.

Du reste, la difficulté d'un consensus entre les spécialistes de l'histoire du vivant réside dans le fait que les critères d'acceptation des définitions oscillent entre la conception de l'être vivant en tant qu'individu et le processus général de la Vie. La meilleure illustration de cette confusion est la définition proposée par la NASA dans les années 2010, qui prétend qu'«est vivant tout système délimité sur le plan spatial par une membrane semi-perméable de sa propre fabrication et capable de s'autoentretenir, ainsi que de se reproduire en fabriquant ses propres constituants à partir d'énergie et/ou à partir d'éléments extérieurs»⁵³. Réfléchir à la Vie par le biais de ses seules composantes vivantes individuelles exclut d'emblée les organismes morts du processus. Or, un être organique inerte mort participe toujours au continuum du vivant. On l'a vu dans le cas très dynamique de transfert de gènes d'une bactérie morte vers une bactérie vivante par transformation (voir chapitre 12 «Un trafic génétique continu»). C'est pour cela que la définition de la Vie doit s'établir dans le cadre du principe de continuum du vivant qui intègre simultanément tous les cycles de flux de matières.

Définir sans exclure

Il vous semble peut-être que nous n'avons pas beaucoup avancé dans cette recherche d'une définition acceptable de ce qu'est la Vie. Au contraire, je crois que nous avons fait un pas de géant en précisant qu'il ne faut pas s'attacher à la cellule (ou à l'organisme), mais considérer l'ensemble. Cela confirme d'une part l'idée de processus et cela

⁵³ Cette définition était la définition officielle de la NASA dans les années 2010. Elle a été remplacée depuis par la définition suivante : «la vie est un système chimique autoentretenu capable d'évolution darwinienne» (<https://astrobiology.nasa.gov/research/life-detection/about/> ; consulté le 08.04.2024).

élimine d'un seul coup le problème des laissés-pour-compte que sont les virus, prions, transposons et autres viroïdes. En réalité, beaucoup de biologistes s'achoppent sur une définition « cellulaire » des organismes vivants, telle que celle de la NASA. D'autres chercheurs ont insisté sur le fait que, pour maintenir les conditions internes conservant vivant un organisme (homéostasie), il fallait qu'il puisse y avoir une membrane de protection rendant ce système fermé, ou du moins peu perméable, et qui puisse contrôler l'échange de matière entre le milieu interne et l'environnement (Varela, Maturana & Uribe 1974). Ces conditions et d'autres critères tels que la réplication et/ou la reproduction éliminent du domaine du vivant les virus qui n'ont pas de membrane cellulaire à proprement parler et ne peuvent se reproduire sans l'aide des organismes à cellule chez lesquels ils vont puiser leur matériel génétique. Cela évacue également les prions, des protéines qui ont la capacité de se répliquer (et de provoquer des maladies graves chez les mammifères), ou encore les transposons qui sont de simples séquences d'ADN pouvant se déplacer ou se multiplier de manière autonome au sein d'un génome. Tous ces « corps » répliqueurs ne « s'expriment » que dans le cadre d'un phénomène vital. Hors de ce contexte, ils disparaissent. La définition générale de la Vie doit donc pouvoir les intégrer.

En réalité, nous nous rendons compte que si les critères traditionnels utilisés pour qualifier quelque chose de vivant – les capacités d'autopoïèse⁵⁴, de reproduction et de réplication – sont pratiques pour définir ce qu'est un organisme vivant, ils ne sont pas forcément pertinents quand il s'agit de définir la Vie. Une limite parfaitement illustrée par une proposition trouvée sur Wikipédia, selon laquelle la Vie est un « phénomène naturel observé à ce jour uniquement sur Terre, et se manifestant à travers des structures matérielles appelées organismes vivants, reconnaissables par la grande complexité de leur structure interne et leur activité autonome »⁵⁵. Cette définition a cependant ceci d'intéressant qu'elle intègre les individus (organismes vivants) dans un contexte global. Et bien qu'aussi peu précise que celle que nous avons

⁵⁴ Autopoïèse: propriété d'un système de se produire lui-même, en permanence et en interaction avec son environnement, et ainsi de maintenir son organisation (structure) malgré son changement de composants (matériaux).

⁵⁵ Wikipédia 2020 selon les définitions lexicographiques et étymologiques du mot « vie ». Trésor de la langue française informatisé. Centre national de ressources textuelles et lexicales (CNRTL).

obtenue jusqu'alors, elle possède en outre trois mérites :

- Le premier est de permettre l'inclusion de toutes les structures organiques, y compris les bactéries et les virus, dans le « phénomène naturel » qu'elle décrit.
- Le deuxième est d'englober, sans en avoir l'air, la mort dans le processus du vivant.
- Le troisième est d'admettre les limites de nos connaissances en spécifiant qu'à ce jour la Vie n'a été observée que sur Terre, sans exclure la possibilité qu'elle existe ailleurs dans le cosmos. Car si la Vie s'inscrit dans le temps (au cours duquel les individus naissent, s'activent et meurent), elle s'inscrit également dans l'espace : en un lieu où les conditions sont propices à l'agencement de composés chimiques, d'organites et de cellules. Sur Terre, cela semble impliquer, comme condition *sine qua non*, la présence d'eau. Ailleurs, on n'en sait rien. Voici donc déjà une caractéristique qui permet d'avoir une définition plus précise de ce qu'est la Vie terrienne.

Une autre caractéristique majeure que l'on peut observer sur notre globe est que la Vie modèle son environnement physico-chimique. Oui, l'activité du vivant a toujours un impact sur ce qui l'entoure, y compris dans le domaine actuellement si discuté du climat. Ceci nous permet d'aborder la notion de l'évolution. Ce principe doit-il être inscrit dans la définition de la Vie ? Au risque de choquer un bon nombre de mes lecteurs, je pense que ce n'est pas nécessaire et je m'en explique. Comme je l'ai proposé, sous forme de contre-hypothèse au néodarwinisme dans le chapitre 8 « Théories de l'évolution, évolution des théories », « l'évolution du Vivant est continue, incessante et interdépendante à tous les organismes, afin qu'il [le vivant] soit adaptable à tout changement, même infime, de son environnement ». Cela implique qu'il existe un continuum du vivant à travers le temps et l'espace, reliant tous les organismes, et que l'évolution (des organismes) se fait par un échange continu d'informations électrochimiques à partir des organismes les plus « simples » vers les organismes les plus « compliqués ». Ces notions nous ramènent au principe de l'autopoïèse, non pas pour les organismes seuls mais pour l'ensemble du processus appelé Vie : celle-ci est autopoïétique, c'est-à-dire qu'elle a, selon la définition, « la propriété de se produire elle-même, en permanence et en interaction avec son environnement, et ainsi de maintenir son organisation, malgré son changement de composants ». De cette affirmation suit la

conclusion logique suivante : la Vie est condamnée à évoluer ; la notion d'autopoïèse suffit à le préciser.

En 1993, Rosenthal rédige un article intitulé « Cognition, vie et... temps » dans lequel il discute de l'idée que la cognition est un phénomène inséparable de la Vie (Maturana 1974). Son raisonnement est si limpide que je ne saurais l'améliorer. Voici donc ce qu'il écrit :

Du fait même du maintien de son organisation invariante, un système autopoïétique est un système clos, au sens d'une clôture organisationnelle (ou opérationnelle). Cette clôture organisationnelle n'empêche pas son ouverture matérielle et thermodynamique, sans laquelle il ne pourrait survivre. Mais le produit du fonctionnement d'un système autopoïétique est dans tous les cas le système lui-même ; c'est un système clos sans entrées ni sorties. Cette clôture organisationnelle n'est pas seulement nécessaire pour conserver l'identité du système vivant, elle est aussi nécessaire pour le maintenir en vie. Un système autopoïétique dont l'organisation est altérée se désintègre et meurt. D'un autre côté, pour maintenir son autopoïèse, un système vivant doit interagir avec son environnement. Or, toute interaction ou couplage avec l'extérieur qui perpétue l'autopoïèse (donc l'identité de l'organisme et sa vie) implique une connaissance de l'environnement participant à ce couplage. [...] Autrement dit, l'autopoïèse implique la cognition : tout organisme vivant est, du fait même de sa qualité de vivant, doué de la cognition. Le domaine cognitif d'un organisme vivant correspond à l'ensemble de ses interactions avec le milieu (ou de ses états possibles) qui préservent l'autopoïèse. [...] En ce sens, la cognition n'est pas une propriété émergente du cerveau des primates supérieurs, elle est coextensive à la vie. La connaissance qu'a un sujet vivant de son milieu n'est qu'expression de sa viabilité ; l'individu n'a pas besoin d'une représentation de l'objet de sa connaissance, celle-ci est l'émanation de l'histoire de son adaptation. En ce sens, la connaissance n'est pas une substance, mais l'expression de la dynamique des couplages structurels dans lesquels entre l'organisme, autrement dit, l'expression de son savoir-faire.

Outre le fait que ce texte fait écho à ce que vous avez pu lire dans le chapitre 14 « La conscience en tout être », il donne un bel aperçu de l'imbrication des organismes dans le continuum du vivant. Cependant Rosenthal trouve une faille dans l'idée que l'autopoïèse puisse définir la vie : « Les principes d'autopoïèse paraissent très convaincants en tant que caractérisation fonctionnelle des organismes vivants, mais ils

semblent insuffisants pour définir la vie et ne sont pas consistants avec la temporalité, qui est une des caractéristiques les plus saillantes du vivant : suivant les principes d'autopoïèse un organisme vivant devrait, sauf accident, être immortel ».

L'auteur en conclut que, pour accepter l'idée que la cognition soit une capacité originelle du vivant, il faut l'inscrire dans sa temporalité intrinsèque, la « flèche du temps » des physiciens, proposant au passage la notion d'« autochronie », selon laquelle « la vie est autogénération du temps, elle est temps » (Rosenthal, 1993). Cette idée s'accorde parfaitement avec la notion de continuum du vivant, permettant ainsi de se libérer de la variable des vies individuelles des organismes. Ce ne sont pas les organismes qui sont immortels, c'est la Vie qui tend vers cet état.

À ce stade, on peut proposer de franchir une étape décisive en remplaçant le mot « dynamique » par le mot « autopoïétique » : la Vie est un processus électrochimique autopoïétique... Il est peut-être temps de revenir au mot premier de cette définition : qu'est-ce qu'un « processus » ? Je cite, selon différentes sources : « un enchaînement ordonné de faits ou de phénomènes, répondant à un certain schéma... », « une suite continue d'actions ou d'opérations constituant la manière de faire »⁵⁶ ou encore « un ensemble d'activités corrélées ou en interaction qui utilise des éléments d'entrée pour produire un résultat escompté »⁵⁷. Toutes ces définitions semblent adaptées à un contexte anthropocentrique, et impliquent un but, une intention. Or, les lois de la physique nous apprennent qu'il n'y a pas d'intention dans la nature. Peut-on donc utiliser le terme de « processus » pour parler de la Vie⁵⁸ ?

Nous voilà face à la plus grande pierre d'achoppement de la science : nos actions conscientes sont intentionnelles et dirigées dans le temps, mais il n'y a pas de dirigisme dans la nature. Faudrait-il donc en conclure que nous sommes hors de la nature, hors de la Vie ? Bien sûr que non. Il y a donc nécessairement quelque chose qui échappe encore à la science. Car l'intentionnalité, c'est-à-dire la capacité, pour la conscience, à avoir une intention, de se donner un objet, existe non seulement chez l'être humain, mais aussi, selon le concept de continuum du vivant, chez l'ensemble des espèces. C'est une autre manière de prétendre, à la suite de Maturana (1974) que la cognition est un

⁵⁶ Dictionnaire de la langue française, consulté en ligne (mai 2020).

⁵⁷ Wikipédia commons, consulté en ligne (mai 2020).

⁵⁸ Notez qu'utiliser le terme Système aboutirait au même problème.

phénomène inséparable de la Vie ou, comme l'écrit si bien Rosenthal (1993), «coextensive à la Vie». Voici un immense défi : accepter l'idée selon laquelle l'intentionnalité fait partie de la Vie, qu'elle en constitue une caractéristique et qu'elle s'intègre parfaitement dans le corpus des lois de la nature décrit par la physique fondamentale. Rien que ça ?

Finalement, la manière la plus simple de redéfinir l'intentionnalité est bien de l'extraire de l'exception humaine (Schaeffer 2007) et de la rattacher au vivant dans son ensemble. Il s'agit à nouveau d'un problème de sémantique. En effet, dire avec les scientifiques que la nature – et la Vie qui s'y imbrique – n'a pas de dessein, pas d'intention, c'est déjà accepter le présupposé d'une définition de ce qu'est l'intentionnalité. Il s'agit là d'un problème majeur du langage humain : définir l'impossibilité d'une chose (le dessein, l'intentionnalité de la Vie) en se référant à la prédéfinition de cette même chose (si ces mots ont une définition, c'est que leur sens existe). Comment avons-nous donc pu accepter le concept d'une chose qui n'existe pas ? En toute logique, il nous faut accepter l'idée d'un «intentionnalisme»⁵⁹ de la nature dont la définition échappe à l'entendement humain et diffère du concept d'intentionnalité qu'*Homo Sapiens* a défini pour sa conscience.

Mon hypothèse est donc que le processus de la Vie fait preuve d'un «intentionnalisme» dont l'objet est : se maintenir. Parce que cet «intentionnalisme» est intrinsèque au processus, il n'est pas nécessaire d'en faire mention dans une définition acceptable de la Vie. En revanche, son objet y a toute sa place, ainsi que les moyens de sa réalisation. Une définition simple de la Vie pourrait ainsi être celle-ci :

Processus électrochimique autopoïétique se maintenant par circulation et recyclage continu de la matière.

Bibliographie

- Bernard C. (1878). *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux*. 2 tomes. Albert Dastre, Paris.
- Carroll S. (2018). *Le grand tout*. (tr. fr. *The Big Picture: On the Origins of Life, Meaning and the Universe itself*). Quanto, Lausanne.
- Esfeld M. (2009). *La philosophie des sciences. Une introduction*, 2^e éd. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.
- Lovelock J. & L. Margulis (1974). Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: The Gaia hypothesis. *Tellus*, 26 (1-2) : 2-10.

⁵⁹ Néologisme que je propose pour avancer dans la réflexion, faute de mieux.

- Maturana H. (1974). Stratégies cognitives. In Morin E. & M. Piattelli-Palmarini (éd.), *L'unité de l'homme. 2 : Le cerveau humain*. Le Seuil, Paris : 156-180.
- Rosenthal V. (1993). Cognition, vie et... temps. *Intellectica* 1993(1) : 175-205
- Schaeffer J.-M. (2007). *La fin de l'exception humaine*. Gallimard, Paris.
- Schrödinger E. (1944). *What is Life?* Cambridge University Press, London.
- Varela F. G., F. H. Maturana & R. Uribe (1974). Autopoiesis: The organization of living systems, its characterization and a model. *Biosystems* 5 : 187-196.

17 | La symbiologie

L'embryon de définition proposé en fin du chapitre précédent est très certainement perfectible. Mais, au stade actuel de nos connaissances, il est compatible avec la notion de continuum du vivant (par les notions de circulation et recyclage continu) et avec les lois de la physique. Il s'agit donc d'une proposition de définition universelle. Je rappelle qu'elle est nécessaire pour améliorer notre approche de l'étude du vivant, bien que nous ignorions tout d'une Vie en dehors de celle, terrestre, dont nous sommes les observateurs privilégiés. Je précise aussi que cette définition n'est encore que partielle. En effet, rien n'infirmes qu'il existe dans l'Univers d'autres processus électrochimiques autopoïétiques qui se maintiennent par circulation et recyclage continu de la matière et qui ne soient pas la Vie. Le cycle de l'eau sur Terre, par exemple, pourrait-il entrer dans cette catégorie? Non, car on dit du cycle de l'eau que c'est un phénomène, pas un processus autopoïétique: il n'a donc pas «l'intentionnalisme» de se maintenir. C'est là toute l'importance des termes choisis sur lesquels repose une fragile acceptation de ce qu'est la Vie.

Cela dit, alors que la définition universelle ne peut que rester vague à l'aune de nos connaissances, celle de la Vie terrestre peut désormais être précisée. En voici une proposition sans doute elle aussi perfectible:

«La Vie est un processus électrochimique autopoïétique se maintenant par circulation et recyclage continu de la matière. Sur Terre,

elle est fondamentalement basée sur la chimie du carbone en présence d'eau (H₂O) sous forme liquide, ainsi que par l'apport d'énergie exogène (Soleil) ou endogène (noyau terrestre). Elle se maintient et se développe par diversification d'organismes dont l'échange continu d'informations est basé sur une réplication du système de codification des molécules carbonées.»

Plus qu'une simple expansion de la biologie en étude des symbioses, la symbiologie est l'étude de ce continuum du vivant ; les symbioses en étant une expression particulière et les « parasitoses » une autre. Dans la définition ci-dessus, « l'échange continu d'informations » est l'expression de ce continuum. Je pense ne pas l'avoir écrit jusqu'alors : il n'existe pas d'exemple d'un organisme vivant terrestre qui ait un système de réplication des protéines totalement différent du reste des autres espèces. Comme précisé dans le chapitre 8 « Théories de l'évolution, évolution des théories », l'évolution du vivant est continue, incessante et interdépendante à tous les organismes, afin qu'il soit adaptable à tout changement, même infime, de son environnement.

Nous l'avons déjà vu, mais il est bon de le rappeler, cette hypothèse implique un certain nombre de principes :

- 1) Il existe un continuum du vivant à travers le temps et l'espace, reliant tous les organismes.
- 2) L'évolution (des organismes) se fait par un échange continu d'informations à partir des organismes les plus « simples » (procarotes) vers les organismes les plus « compliqués » (êtres eucaryotes multicellulaires spécialisés).
- 3) Le langage utilisé pour la transmission des informations est celui de la codification génétique.
- 4) À tout nouveau changement environnemental, la connectivité des organismes implique une solution évolutive commune allant du plus simple vers le plus complexe :
 - a) pour se prémunir des variations environnementales, les organismes les plus « simples » se sont organisés, par symbiose homéostatique, en organismes plus compliqués (être symbiotique ou holobionte), formant un réseau continuant à échanger et à codifier leurs informations (hologénome);
 - b) le long d'un réseau d'échanges, le taux de changement des codifications génétiques par unité de temps diminue avec l'augmentation de la complexité de l'organisme.

Des interactions communes obligatoires

Si les trois premiers principes ont déjà largement été discutés ou illustrés dans plusieurs chapitres sans que nous ayons besoin d'y revenir, le quatrième n'a en revanche pas été explicitement abordé, mais seulement esquissé dans certains exemples relatifs aux cycles biologiques. La compréhension de ce principe est essentielle, car il constitue ni plus ni moins le fait sur lequel s'appuie la symbiologie, à savoir l'étude des interactions communes obligatoires à tous les organismes. Il évoque la solution, la propriété émergente, que le vivant a trouvée pour s'adapter au deuxième principe de la thermodynamique. Car le processus autopoïétique évoqué dans notre définition de la Vie ne vaut que pour le vivant pris dans son ensemble, il est impossible pour un organisme isolé. Et un être seul, mais vraiment seul, ne peut pratiquer l'autopoïèse que durant un temps très limité, avant d'éclater par entropie. Selon le bon vieil adage aristotélécien selon lequel le tout vaut plus que la somme des parties, la Vie a construit son maintien sur une répartition des tâches continue entre toutes ses composantes (organismes vivants actifs puis morts recyclables). Grâce à de multiples relais, les états d'énergie sont sans cesse remis en jeu, donnant l'illusion qu'elle maîtrise le niveau d'entropie. Cet état de fait est l'explication de la nécessité de la mort ; une remise en jeu de la matière et de son énergie potentielle. À l'inverse, l'immortalité des individus, à laquelle certains hurluberlus aspirent, est contraire à ce principe, et dès lors non viable.

Cette remarque est fondamentale, car elle permet de comprendre que l'évolution n'est pas une question de sélection naturelle mais qu'elle est intrinsèque à la Vie : afin que la matière continue à circuler, chacun des « relais » doit savoir comment le faire et être là pour le faire. C'est le sens des mots « implique une solution évolutive commune » du principe n° 4. Dans le chapitre 9 « Une question de vie ou de mort », j'ai évoqué le problème des cimetières européens dans lesquels les corps ne se décomposent plus. On peut voir ce phénomène comme étant une excellente façon de constituer des puits de carbone, mais on peut également s'inquiéter de la disparition des organismes décomposeurs. De même, l'exemple des excréments des éléphants et autres herbivores qui s'accumuleraient dans la savane après disparition des micro-organismes recycleurs illustre bien le genre de problèmes auxquels nous serions confrontés si l'un des éléments de la

chaîne disparaissait. Ce qui permet de maintenir le réseau est l'échange d'informations continu. On a vu qu'il prenait, grâce aux microbes, une forme beaucoup plus dynamique qu'un simple système de mutation par erreur ou par hasard. Cela implique, mais ce n'est encore qu'une hypothèse, que la mutation d'un groupe d'individus d'une espèce X est nécessairement connue par les micro-organismes qui vivent en symbiose avec lui.

Assez lente chez les organismes multicellulaires complexes, l'adaptation par changement du génome est beaucoup plus rapide chez les unicellulaires (points a) et b) du principe n° 4). Pourquoi? Simplement parce que l'échange de matière se fait toujours fondamentalement par les microbes, même dans la cellule photosynthétique d'un végétal ou dans la panse d'un animal. Sans prendre d'exemple précis, le simple fait d'accepter le deuxième principe de la thermodynamique qui nous dit que l'entropie augmente en même temps que l'âge de l'Univers permet de comprendre que la matière dont celui-ci est fait change constamment. Cela provoque une série d'effets indubitables : la Vie est condamnée à évoluer continuellement, développant son réseau d'échanges de manière de plus en plus complexe, par simple effet thermodynamique. Si l'on accepte cela, l'évolution (du continuum du vivant) peut être érigée en conséquence des lois de la nature, en accord avec le physicisme de la science.

Cette réadaptation perpétuelle et ce changement continu d'informations impliquent une chose dont la plupart d'entre nous n'avons pas conscience : les micro-organismes à la base de tous ces échanges nous ont non seulement construits, mais ne nous ont également jamais quittés. Si nous n'en avons pas conscience, c'est principalement dû au système de classification proposé par les biologistes qui est séparatif : plantes, animaux, champignons, bactéries, virus. Un système très pratique (je ne pense pas que nous en changerons de sitôt) mais qui, au regard de l'évolution de la Vie sur Terre, doit être complété par une vision plus ontologique ou, exprimé autrement, plus intégrative. Par exemple, en parlant (du plus simple au plus compliqué) 1) d'organisme sans membrane, 2) de cellule libre, 3) de coopération de cellules libres, 4) de colonies de cellules fixes, 5) de système multiple de colonies de cellules fixes en coopération avec des cellules libres, etc. Dans ce système de classification, l'être humain entrerait, tout comme les autres mammifères, dans une sous-catégorie de la dernière citée, soit un système multiple de colonies de cellules fixes en coopération avec

des cellules libres thermorégulatrices. Le sujet de la classification du vivant mériterait une thèse en soi, mais n'étant pas indispensable à la compréhension de mon propos, je me garderai bien de le faire ici.

Le vivant dans sa globalité, un nouveau paradigme

Face à tout ce qui vient d'être écrit, la question principale est : comment étudier le continuum du vivant ? Les principes de la biologie « classique » étant trop fractionnaires, les résultats de ce type d'études ne peuvent rendre compte que d'une approximation. La symbiologie propose donc de sortir du cercle peu vertueux de la biologie classique qui isole les paramètres.

« Symbiologie » est un néologisme que j'utilise depuis une dizaine d'années, et qui peut faire sens pour aider les chercheurs à dépasser la seule idée d'étudier le vivant de manière compartimentée comme c'est encore largement le cas : les plantes par des botanistes, les champignons par des mycologues, les bactéries par des microbiologistes et les animaux par des zoologues. Avec ce mot, mon intention n'est pas de créer une nouvelle discipline, mais de différencier une nouvelle approche auprès des chercheurs afin qu'ils assimilent un concept plus large. Une fois cette étape franchie, le mot lui-même pourrait être amené à disparaître puisque la symbiologie n'est rien d'autre que la biologie de l'ensemble, celle du continuum du vivant prise dans un contexte cosmologique (d'où la nécessité d'un postulat sur la Vie dans l'Univers).

Cette nouvelle approche ne rompt pas avec la méthode scientifique. Elle en accepte les critères d'objectivité, de reproductibilité, de systématisme et de cohérence. Elle cherche simplement à ouvrir la biologie à de nouveaux champs de recherche en élargissant ces principes. Ainsi, faut-il tendre à ce que :

- 1) les recherches n'isolent pas les sujets (individus, espèces), mais prennent en compte la biocénétique systémique (toutes les espèces dans un système) ;
- 2) les recherches n'isolent pas les facteurs, mais soient multifactorielles ;
- 3) les résultats soient considérés comme temporaires.

Ces principes sont la réponse à un changement de paradigme dans l'étude du vivant : ce n'est pas le bout d'une chaîne que l'on étudie mais

bien l'ensemble, afin d'arriver à mieux comprendre les interactions entre tous les êtres qui forment ce continuum. Comment comprendre cette différence ? Prenons le cas de recherches sur un micro-organisme qui affecte la santé de l'être humain (il s'agit certainement du cas représentant, et de loin, le plus grand nombre d'études depuis plusieurs siècles). Aujourd'hui, en biologie « classique » – et donc en médecine –, on considère que le micro-organisme « attaque » l'humain. La réponse à cette attaque est qu'il faut lutter contre le microbe en cherchant si possible à l'éradiquer. L'approche symbiologique consiste au contraire à considérer que ce nouveau venu n'attaque pas *Homo Sapiens*, mais se retrouve dans un nouvel écosystème composé de plusieurs centaines d'espèces d'autres micro-organismes qui vont interagir avec lui. Cette relation nouvelle va induire une multitude de réactions incalculables, générant des changements substantiels dans cet écosystème *Homo Sapiens* : flux de gènes horizontaux dans le biote, production de nouveaux signaux neurotransmissibles par les bactéries, réponses nouvelles des différents systèmes nerveux, fonctionnement différent des organes, etc. C'est cet ensemble d'organismes – cet holobionte qui « agit en consortium » (Zilber-Rosenberg & Rosenberg 2008) – qu'il s'agit de prendre en compte. Ainsi :

- 1) on n'isole pas les sujets (le sujet central de l'étude est l'ensemble du biote, et non seulement *Homo Sapiens*);
- 2) on n'isole pas les facteurs (car on cherche à comprendre les effets multifactoriels qu'engendre cette situation sur l'ensemble du biote);
- 3) on considère que le résultat n'est que temporaire (soit que l'arrivée d'un nouveau venu dans notre corps engendre nécessairement un état de déséquilibre passager⁶⁰).

Ces nouvelles clés de compréhension ne s'appliquent pas uniquement au domaine de notre santé, mais également à celle de la planète. Ainsi, ne pas isoler les sujets ni les facteurs d'évolution paraît logique pour celui qui cherche à comprendre l'organisation des cycles (non seulement ceux des éléments tels que le carbone, l'eau ou l'azote, mais également celui des biocénoses et de leurs écosystèmes).

⁶⁰ Relire à ce propos, dans le chapitre 13 « Symbionte *versus* parasite, un équilibre fragile », le compte rendu de l'étude sur la biologie de l'amibe protégée (*Amoeba proteus*) du biologiste Kwang Jeon, ou encore l'évocation du développement de résistance des bactéries face aux antibiotiques.

Pour ouvrir la voie, prenons l'exemple d'une recherche sur la conséquence que de nouvelles interactions trophiques pourraient avoir sur la flore alpine à la suite d'un réchauffement continu (Descombes *et al.* 2020). Pour rendre compte de ces changements, les auteurs ont prélevé à 1400 m d'altitude dans les Alpes suisses des communautés entières de criquets et de sauterelles, phytophages les plus abondants des prairies alpines. Ils ont ensuite placé les insectes dans des cages de même superficie, sur des sites proches, mais à 1800, 2070 et 2270 m d'altitude. Ces milieux enrichis d'insectes ont pu être comparés avec trois autres situations : deux servant de contrôles témoins (milieu à peuplements actuels sans enrichissement, avec ou sans cage) et une troisième simulant le changement climatique direct en insufflant un réchauffement contrôlé dans certaines cages (*open-top chamber's*). Les scientifiques ont quantifié le changement de la biomasse, de la structure et de la composition des communautés de plantes sous l'action des nouveaux arrivants et du réchauffement climatique. Ils ont ainsi documenté la réduction de la surface des feuilles, la quantité de matière sèche, la dureté des végétaux ainsi que la teneur en silice et chlorophylle. Grâce à la métabolomique, une nouvelle discipline permettant de mesurer simultanément de nombreux métabolites dans un organisme vivant (Defossez & Rasmann 2023), la réponse chimique des plantes a également été déterminée par analyse de la teneur en flavonoïdes, terpénoïdes, alcaloïdes, polyphénols et tanins, ainsi que le ratio entre carbone et azote contenu dans les feuilles. Il est en effet reconnu que les plantes poussant à des altitudes élevées ont un système de défense plus lâche contre les phytophages, car ces derniers sont moins nombreux, alors qu'elles augmentent le taux de certains métabolites spécialisés (par exemple les flavonoïdes) qui leur permettent de lutter contre des conditions abiotiques défavorables telles que le froid ou la sécheresse (Rasmann *et al.* 2014). Les résultats démontrent que, dans les prairies situées au-dessus de la limite de la forêt, l'arrivée des sauterelles et des criquets de basse altitude augmente la consommation des herbes les plus grandes (graminées notamment), celles-ci étant de composition comparable aux plantes constituant leur bol alimentaire à plus basse altitude. Cette conservation de la diète va modifier la structure de la végétation, la rendant plus hétérogène, favorisant ainsi par endroits l'émergence de plantes basses (pensées, myosotis, gentianes, etc.) à surface foliaire plus petite. Ces dernières sont riches en tanins, des composés amers qui les protègent de la dent ou des mandibules des

herbivores. Par comparaison des données avec celles obtenues dans les cages dans lesquelles les chercheurs ont induit un réchauffement sans ajouter d'insectes, l'étude a également précisé que l'impact des nouveaux arrivants est plus important que celui du climat.

Les auteurs de l'étude en concluent logiquement que les interactions biotiques doivent être prises en compte dans les modèles prédictifs de l'impact des changements climatiques. Cette proposition est correcte, mais incomplète. Cette étude sur l'arrivée massive de phytophages conduisant à un surpâturage (il faut se souvenir que l'expérience se passe dans des cages) ne prend par exemple pas en compte l'augmentation des prédateurs (araignées à toile notamment), ni la présence de pathogènes. Elle n'étudie pas non plus l'effet que produit cette augmentation de phytophages sur le recyclage de la matière organique dans le sol par les champignons, bactéries et invertébrés. Finalement, loin de répondre à elle seule à l'amélioration des prédictions, l'étude souligne le caractère très aléatoire des modélisations en biologie de la conservation, une discipline qui a pourtant le vent en poupe actuellement.

Cela dit, ce travail admirable augmente réellement notre compréhension sur les changements qui sont en train de s'opérer dans les écosystèmes alpins. Par une approche multifactorielle (changements biotiques et abiotiques) sur une partie importante de la « biocénose systémique » (végétation et orthoptères), il répond aux critères d'une étude symbiologique qui « tend » à ce que les recherches n'isolent ni les sujets ni les facteurs. L'explication donnée est concluante, permettant ainsi de continuer à développer la recherche dans ce domaine de l'écologie trophique en complétant, dans le futur, les résultats sur le reste de la chaîne trophique (prédateurs, parasites, décomposeurs, recycleurs).

Le problème réside donc plus dans l'acceptation des modèles prédictifs, imparfaits par définition. C'est pourquoi le troisième principe – considérer tout résultat comme temporaire – est particulièrement important. Cela signifie que la conclusion d'une étude est le reflet d'une « réalité » au temps t , et qu'elle est différente de celle d'une étude menée au temps $t + 1$. S'il paraît déjà être appliqué en biologie classique, ce principe ne l'est en réalité que partiellement, car il s'appuie sur une mauvaise compréhension de ce qu'est l'évolution, considérée comme un phénomène ayant pour origine des mutations arrivées par hasard et par erreur chez les individus, alors qu'elle est une condition *sine qua non* du continuum du vivant.

Prenons le cas de la pandémie de la Covid-19. Ayant marqué l'humanité entière en quelques mois, c'est l'exemple le plus parlant qui soit pour illustrer le principe de temporalité. Tout le monde a suivi avec attention le développement des connaissances du monde scientifique sur ce coronavirus, la découverte de semaine en semaine de nouveaux variants et la recherche de vaccins successifs visant à éradiquer la maladie. Mais entretemps, avec la présence de ce nouveau venu, notre corps a évolué, et avec lui, irrémédiablement, le génome de chaque être humain. Ce changement intervient, on l'a vu, par transfert de gènes de virus à bactérie, puis de microbe à microbe, en se répliquant dans l'ensemble du biote. Lorsqu'une partie de celui-ci est incapable de « comprendre » le nouveau message en synthétisant les molécules adéquates, le système immunitaire de l'holobionte s'affole, au risque de provoquer la mort. Si rien de tel ne se produit, l'individu accepte la nouvelle forme de virus. Ainsi, variantes du virus et vagues de contaminations nouvelles sont les reflets d'une même cause : la recherche d'une solution pour intégrer le nouveau venu. C'est du reste aussi l'idée des chercheurs lorsqu'ils développent des vaccins : offrir au corps une solution moins virulente que celle qui circule librement. Cependant, nous le savons tous pertinemment, le *modus vivendi* d'un virus est de renouveler rapidement le matériel génétique qu'il capte d'autres microbes. En se modifiant, il devient moins sensible au vaccin présent. Si au temps t , il ne résistera pas, au temps $t + 1$, il provoquera une nouvelle poussée de fièvre chez son hôte et au temps $t + 2$ un nouveau vaccin sera sans doute temporairement plus efficace et ainsi de suite.

Alors, comment réagir ? Laisser faire la nature ? Je comprends bien que dans le cas de virus particulièrement mal adapté à vivre dans notre corps, on ne puisse rester les bras croisés. La recherche de solutions médicales est légitime et nécessaire. Il serait toutefois profitable que nous changions notre regard sur la dynamique du vivant qui est en nous et autour de nous.

La Vie est de nature chimique et électrique, mais elle est soumise aux lois physiques du cosmos. Elle s'organise en cycles d'états et de matières, impliquant la mort des individus, ce qui lui permet de résister à l'entropie. Cette adaptation n'est que provisoire, dans un état de déséquilibre thermodynamique grandissant. Ainsi doit-elle sans cesse remettre l'ouvrage sur le métier, induisant explicitement son évolution perpétuelle.

Bibliographie

- Defossez E. & S. Rasmann (2023). Des premières pharmacopées à la métabolomique. Une exploration de la diversité chimique des plantes. In Mulhauser B. (dir.). *Plantes soignantes. Entre pouvoirs et partages*. Épistémé, Lausanne : 17-30.
- Descombes P., C. Pitteloud, G. Glauser, E. Defossez, A. Kergunteuil, P.-M. Allard, S. Rasmann & L. Pellissier (2020). Novel trophic interactions under climate change promote alpine plant coexistence. *Science* 370 : 1469-1473.
- Rasmann S., L. Pellissier, E. Defossez, H. Jactel & G. Kunstler (2014). Climate-driven change in plant–insect interactions along elevation gradients. *Functional Ecology* 28 : 46-54.
- Zilber-Rosenberg I. & E. Rosenberg (2008). Role of microorganisms in the evolution of animals and plants: the hologenome theory of evolution. *FEMS Microbiology Reviews* 32 : 723-735.

Conclusion

Nous voici arrivés au terme d'un récit qui vous a peut-être désorienté. Comment ne pas l'être, tant le changement de paradigme semble radical? L'humanité n'est pas un petit satellite isolé au milieu du vivant contre lequel elle doit lutter pour survivre. Elle n'est pas non plus le résultat d'une compétition qui la place au sommet de l'évolution. Elle fait partie d'un tout, un continuum qui se construit, s'organise et change au fil du temps. Elle disparaîtra donc dans l'inexorable marche évolutive du processus autopoïétique qu'est la Vie, laissant à d'autres réseaux d'espèces le soin de la perpétuer.

À l'heure où les démocraties vacillent, permettant à certains dirigeants de profiter de leur égoïsme démesuré, il est temps de rappeler que la Vie est ce continuum qui nous relie les uns aux autres, non seulement au sein de chaque espèce, mais également entre elles et à des niveaux organisationnels dont les limites ne sont que temporelles. Ainsi, plantes, champignons, bactéries, virus et animaux échangent la matière en cycles continus, au-delà des croyances et des consciences qui les animent. Répondant par nécessité aux outrages du temps, ce réseau se développe en un plus grand nombre de possibles. Cette biodiversité grandissante est le résultat d'une entropie, une confirmation que la Vie obéit aux lois de la physique. Son évolution est intrinsèque; nous ne pouvons pas nous en soustraire.

L'évolution du vivant ne concerne pas les individus pris isolément, mais se rapporte à l'ensemble. Par conséquent, il est temps d'abandonner la théorie trop étriquée du néodarwinisme pour s'ouvrir à une nouvelle manière d'étudier le vivant. Une approche dite « symbiologique » qui cherche, autant que faire ce peu, à prendre en compte toutes les relations entre organismes, vivants ou morts. Discipline intégrative de la biologie, elle admet les changements continus, envisageant les résultats de manière transitoire. Elle réfute le dualisme anthropocentrique qui part du principe que tout changement provoqué par des organismes sur l'humain est une attaque, un mal qu'il faut combattre. Elle demande, de la part des biologistes, une grande ouverture d'esprit afin de déplacer les objectifs de leurs recherches sur les relations entre les espèces au sein du continuum, plutôt que sur l'étude des impacts que

ces espèces peuvent avoir sur l'être humain. De cette tolérance naîtra certainement un plus grand respect pour le vivant, aboutissant, je l'espère, à notre réconciliation avec la nature.

Table des matières

Sommaire	5
Avant-propos	9
Remerciements	11

Première partie

Ce qui est en «soi» 13

1 Des souris et des hommes	15
Ces rongeurs que nous connaissons si mal	15
Microbiote et microbiome	18
Bibliographie	23
2 Avoir les yeux plus gros que le ventre	25
Le système nerveux entérique	25
Hormones et neurotransmetteurs, le microbiote à l'œuvre	26
Le système nerveux sous influence	32
Bibliographie	33
3 Symbioses	37
La vie, ensemble	37
Symbioses chez les plantes	39
Focus sur les mycorhizes	43
Bibliographie	49

Deuxième partie

Étudier le passé pour comprendre le présent 53

4 Aux origines du vivant	55
Du Soleil à la Terre	55

La naissance de la Vie en conditions extrêmes	57
Fermentations et respirations « primitives »	60
Bibliographie	62
5 La Grande Oxydation, la plus grande révolution de l'histoire de la Vie sur Terre	65
De la Vie sans oxygène à la Vie oxydée	65
L'oxygénation massive de l'environnement et ses conséquences	66
Eucaryote, mitochondries et chloroplastes	68
Des chloroplastes aux algues	70
Épilogue	73
Bibliographie	74
6 Extinctions, action, réaction	77
L'extinction de la fin de l'Édiacarien	78
De l'extinction du Cambrien-Ordovicien à la conquête du milieu terrestre	79
De l'extinction du Dévonien à l'apparition des arbres	81
Des extinctions du Permien et du Trias à la naissance puis à l'expansion des plantes à fleurs	82
Bibliographie	86
7 L'humain descend d'un tout	89
L'extinction de la fin du Crétacé et ses conséquences	89
Faune et flore du Paléogène	91
<i>Homo Sapiens</i>	94
Bibliographie	95

Troisième partie
Postulat sur la Vie _____ 99

8 Théories de l'évolution, évolution des théories	101
Du darwinisme à la théorie synthétique de l'évolution	101
Les failles du néodarwinisme	105
Une contre-hypothèse au néodarwinisme	107
Bibliographie	112

9 Une question de vie ou de mort	115
La mort, cette source de vie	116
Le cycle de la « Vie » : de « vie » à trépas	119
Bibliographie	123
10 Un cycle continu	125
De haut en bas	126
Dans les profondeurs du sol, un univers en soi	128
Bibliographie	131
11 Le continuum du vivant	133
Coder la complexité : une « lecture commune »	134
Interdépendance	138
Le microbiote humain	141
L'individu multiple	142
Bibliographie	143
12 Un trafic génétique continu	145
Transferts verticaux ou horizontaux	145
La conjugaison	146
La transformation	147
Les virus et la transduction	149
Du parasite pathogène au vecteur évolutif	152
Un avantage essentiel	154
Bibliographie	156
13 Symbiote <i>versus</i> parasite, un équilibre fragile	159
Parasitisme ou mutualisme ?	159
Du microbe à l'endosymbiote : l'évolution en marche	164
Bibliographie	171

Quatrième partie

De la biologie à la symbiologie : un changement fondamental

14 La conscience en tout être	177
La « conscience du monde »	178

Socialisation	182
La conscience « réflexive »	186
La conscience altérée	188
Une construction symbiotique chimique	192
Bibliographie	193
15 La nécessité de la croyance	197
De l'importance des croyances	198
La croyance naît et se transmet	200
La croyance sous influence, le ciment du groupe	202
Bibliographie	204
16 Qu'est-ce que la Vie?	205
Une approche cosmologique	207
Définir sans exclure	211
Bibliographie	216
17 La symbiologie	219
Des interactions communes obligatoires	221
Le vivant dans sa globalité, un nouveau paradigme	223
Bibliographie	228
Conclusion	229
Table des matières	231

