



HAL
open science

Le commun du vivant

Patrick Giraudoux

► **To cite this version:**

Patrick Giraudoux. Le commun du vivant. Sarah Carvallo; Arnaud Macé. L'humain et le végétal. Processus et formes de vie partagés, Presses Universitaires de Franche-Comté, pp.195-216, 2024, Sciences: concepts et problèmes, 978-2-84867-105-5. hal-04632956

HAL Id: hal-04632956

<https://hal.science/hal-04632956>

Submitted on 12 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - ShareAlike 4.0 International License

Le commun du vivant¹

Patrick Giraudoux, Chrono-environnement, Université de Franche-Comté/CNRS
patrick.giraudoux@univ-fcomte.fr

Résumé :

L'écologie donne ici un sens fort à l'idée d'un monde partagé entre toutes les formes vivantes, dont plantes et microbes constituent près de 100% de la biomasse. Les eucaryotes (dont font partie les plantes, les animaux et les champignons) sont par leur phylogénie et leur ontogénèse des organismes symbiotiques formés au cours de l'évolution à partir d'un ancêtre commun associant une archée et une ou deux bactéries conférant au nouvel organisme des propriétés émergentes supplémentaires, la respiration pour tous, et pour les plantes vertes, en plus, la photosynthèse chlorophyllienne. D'un point de vue fonctionnel, la biosphère se maintient depuis plus de 3.8 milliards d'années sous forme d'une succession d'écosystèmes et de formes vivantes (la plupart éteintes). Celle-ci est partagée entre organismes autotrophes (capables de produire leur biomasse à partir de matière minérale) et hétérotrophes (qui en sont incapables), indispensables l'un à l'autre et en équilibre dynamique. L'évolution darwinienne qui est le moteur du réassortiment des formes vivantes terrestres a sélectionné positivement d'innombrables formes d'associations à avantages réciproques à tous les niveaux d'organisation biologique, tout en éliminant celles incompatibles entre elles dans la durée. Comme les animaux (dont l'humanité), sur un tronc métabolique commun, les plantes entretiennent des relations mutualistes avec les microbes et avec de nombreux autres organismes. La différence essentielle singularisant l'humanité du reste des formes vivantes, dont les plantes, est celle d'une conscience de soi extraordinairement développée et la transmission culturelle intergénérationnelle (néanmoins partagée sous des formes plus simples avec un certain nombre d'autres espèces animales). Elle ne la dispense cependant pas, sous peine de disparaître, de penser et d'entretenir les relations nécessairement symbiotiques qui la lie aux autres vivants.

Summary :

Ecology gives a strong meaning to the idea of a world shared by all living forms, of which plants and microbes constitute almost 100% of the biomass. Eukaryotes (which include plants, animals and fungi) are symbiotic organisms in terms of their phylogeny and ontogeny. They originated from the evolution of a common ancestor that combined an archaea and one or two bacteria, giving the new organism additional emergent properties: respiration for all, and chlorophyll photosynthesis for green plants. Functionally, the biosphere has been maintained for more than 3.8 billion years as a succession of ecosystems and life forms (most of them extinct). The biosphere is shared between autotrophic (able to produce biomass from mineral matter) and heterotrophic (unable to do so) organisms, which are interdependent and in dynamic equilibrium. Darwinian evolution, which is the driving force behind the reassortment of terrestrial life forms, has positively selected countless forms

¹ Cet article CC-BY-SA 4.0 est dédié à la mémoire de Claude Combes, parasitologue français, pédagogue hors pair, décédé le 8 juillet 2021. Il a eu une immense influence sur l'approche écologique et évolutive de la parasitologie, et par extension sur ma perception écologique de l'ensemble du vivant.

of mutually beneficial associations at all levels of biological organisation, while eliminating those that are incompatible with each other over time. Like animals (including humans) and based on a common metabolic core, plants maintain mutualistic relationships with microbes and with many other organisms. The essential difference that singularises humanity from the rest of the living forms, including plants, is that of an extraordinarily developed self-consciousness and intergenerational cultural transmission (though shared in simpler forms with a number of other animal species). It does not, however, exempt it, on pain of extinction, from considering and maintaining the necessarily symbiotic relationships that bind it to other living beings.

Avant-propos

Avant de partager ici la vision d'un écologue sur le monde vivant, je me dois d'avertir le lecteur d'où j'écris. On ne peut comprendre la nature de la vie qu'en étant imprégné des concepts du darwinisme, et plus précisément maintenant du néo-darwinisme. Au moment où j'écris ces lignes, l'émergence des variants successifs du virus responsable de la COVID19, la sélection progressive des plus contagieux en moins d'un an, et leurs effets très concrets, sont suivis au jour le jour par les médias. Ces variants nous montrent que l'évolution du vivant est observable même sur le temps très court. Le corpus du néodarwinisme intègre les savoirs, notamment génétiques, qui n'existaient pas du temps du vénérable maître. Ma pensée d'écologue est donc profondément « darwinienne ». Par ailleurs, je n'ai pas une connaissance approfondie des textes si riches du corpus philosophique, mais je garde une admiration sans limite pour les philosophes présocratiques (à partir de ce que j'ai lu sur eux, et non des textes originaux). Il y a près de 3000 ans, ils m'apparaissent déjà poser les questions essentielles sur la nature, sans être obstrués, à la différence de trop des suivants, de mythologies encombrantes telles que celles dérivées de la notion de dieu. Ils entrent donc en bon écho avec mes interrogations de naturaliste, au sens d'observateur du monde perceptible. Ces interrogations m'ont conduit à être d'abord professeur de Sciences de la vie et de la terre (on y embrasse toutes les disciplines du vivant et la géologie) pendant plus d'une dizaine d'année, puis enseignant-chercheur en écologie pendant près de 30 ans, et depuis, comme professeur émérite, à faire de la recherche en écologie un « loisir productif ». Ma culture philosophique plonge également quelques racines dans ce que les courants empiristes ont pu apporter à une pensée expérimentale qui cherche à s'arracher au dogme, comme celles de Roger et Francis Bacon. Enfin, la raison et la rationalité qui traversèrent le siècle des Lumières, ô combien libératrices, me conduit à penser que le doute critique est la meilleure arme pour mieux comprendre qui nous sommes et comment nous vivons, à défaut de ne jamais savoir pourquoi. Aidée d'autodérision, elle permet de ne pas succomber aux dogmatismes de toutes sortes qui cherchent fanatiquement à figer la pensée dans la liturgie et l'arbitraire de tabous.

Je vais donc témoigner depuis ma pratique de chercheur en écologie, de « travailleur de la preuve », dirait Gaston Bachelard. Je l'ai forgée initialement comme adolescent naturaliste, curieux des animaux, des plantes et des roches, puis en généraliste préparant les concours du CAPES et de l'agrégation de sciences naturelles, et enfin, à l'épreuve de la résolution de problèmes qui m'étaient posés comme chercheur en écologie, pour comprendre les effets de l'organisation des paysages sur la dynamique des populations animales et la transmission d'organismes parasites dans les écosystèmes.

Ce témoignage s'organise en deux parties, la première montrant comment l'ontogenèse du vivant et la phylogénie des organismes établissent notre parenté avec le monde des plantes, la deuxième montrant en quoi les écosystèmes sont essentiellement structurés par le mutualisme.

Le commun ontogénique du vivant

De la description du vivant

Autorisons-nous ici à schématiser quelque peu les choses, pour mieux faire apparaître deux courants de pensée majeurs qui se mêlent dans le présent de l'écologie. Tout en s'inscrivant dans une vision globalisante de la nature nourrie par le concept de *phusis* des présocratiques, Aristote (384-322 avant notre ère) nous a livré une des premières tentatives connues de classification systématique du monde vivant, selon une échelle à plusieurs niveaux de perfection allant des plantes à l'homme. Pour Aristote, plus l'être est un individu accompli selon la chaleur ou la présence d'organes comme le cœur ou le cerveau, plus il est haut hiérarchiquement dans la classification. Qui dit classification, dit « classe » ou « coupure », doublée ici d'une hiérarchisation. Cette approche fondée sur des critères de ressemblance morphologique hiérarchisée a été le soubassement de descriptions fondamentalement fixistes (malgré quelques aménagements de circonstance depuis) de ce qui était pensé dans les religions monothéistes comme la « création » d'un dieu unique. Carl von Linné (1707-1778) et ses disciples naturalistes systématisèrent une nomenclature binomiale² qui est encore le standard de la description du monde vivant de nos jours. Toujours l'homme y est présenté comme l'achèvement ultime de la création, et les animaux comme supérieurs aux plantes. Dans cette nomenclature, la notion d'espèce a été ensuite formellement catégorisée sous le critère d'interfécondité de Mayr (1904-2005) : « Les espèces sont des groupes de populations naturelles, effectivement ou potentiellement interfécondes, qui sont génétiquement isolées d'autres groupes similaires et engendrent une progéniture viable et féconde ». Cette définition de l'espèce qui n'est plus simplement « morphologique », mais liée à la réalisation d'un processus, la reproduction sexuée, pose encore un sérieux problème pour les espèces asexuées.

Et advint Charles Darwin (1809-1882) qui bouleversa notre représentation du vivant aussi profondément que Nicolas Copernic (1473-1543) et Albert Einstein (1879-1955) le firent pour notre représentation du cosmos. La nature vivante n'a plus de finalité, elle est le résultat de processus évolutifs et du jeu de la sélection sur les organismes. Il a fallu attendre jusqu'à la deuxième moitié du XX^e siècle pour comprendre pleinement que la biodiversité actuelle était le résultat procédural du jeu sur le temps long, dans une diversité d'environnements variables dans l'espace et dans le temps, de l'apparition de mutations successives d'une molécule préexistante répliquable (acide nucléique) et de la sélection de l'organisme qui les porte sur les propriétés qui en émergent (fécondité, mortalité). L'homme tombe de son piédestal, et devient un primate parmi les autres primates, résultat comme toutes les autres formes vivantes de son temps, de plus de 3.8 milliards d'années d'évolution, où chaque forme est issue d'une autre forme par le jeu des mutations/sélections. Qu'il s'agisse d'eucaryotes (les plantes, les fonges³, et les animaux), d'archées ou de bactéries, toutes sont des *success stories* pour un observateur du XXI^e siècle, par le seul fait qu'elles existent. Elles laissent

² Chaque espèce est désignée par un nom de genre (première lettre toujours en majuscule) et un nom d'espèce (première lettre toujours en minuscule), indissociables, en latin et italique, suivis du nom de l'inventeur et de l'année de la première description. L'homme par exemple est désigné par *Homo* pour le genre et *sapiens* pour l'espèce : *Homo sapiens* Linnaeus, 1758. Peut s'y ajouter parfois un nom de sous-espèce. Le chien considéré à l'heure actuelle comme une sous-espèce de loup est nommé *Canis lupus familiaris* Linnaeus, 1758. L'homme et le chien ont été nommés (inventés) dans la nomenclature binomiale linnéenne par Carl von Linné, la même année.

³ Le terme de fonge est utilisé pour distinguer le règne de ce qu'on appelait autrefois « les champignons ». Dans le langage courant, le champignon représente en fait le sporophore de certaines espèces de fonges (« aller aux champignons », dit-on, pour ce qui consiste en fait à « cueillir des sporophores »). Les espèces de basidiomycètes et d'ascomycètes qui produisent des sporophores, les moisissures, les levures (unicellulaires), constituent la fonge, dont le terme « champignons », était jadis synonyme.

derrière elles d'innombrables formes vivantes ancestrales et écosystèmes disparus, victimes de leurs performances adaptatives insuffisantes à un moment donné, mais dont certaines et certains ont laissé des traces fossiles de leur passage sur terre dans la roche.

L'unicité ontogénique du vivant...

La conjonction entre deux nécessités, celle de nommer les formes vivantes et les choses, donc de différencier des catégories hiérarchisées (des espèces, genre, famille, ordre, classe, embranchement, règne, etc. et leurs divisions en sous-espèces, sous-genre, etc.), toujours découpées artificiellement au gré des besoins, et celle de considérer dans le temps la réalité de leur continuité évolutive, aboutit à l'établissement d'arbres phylogéniques tels que celui présenté Figure 1 (nous verrons plus loin pourquoi celui-ci est maintenant dépassé et comment il a été révisé).

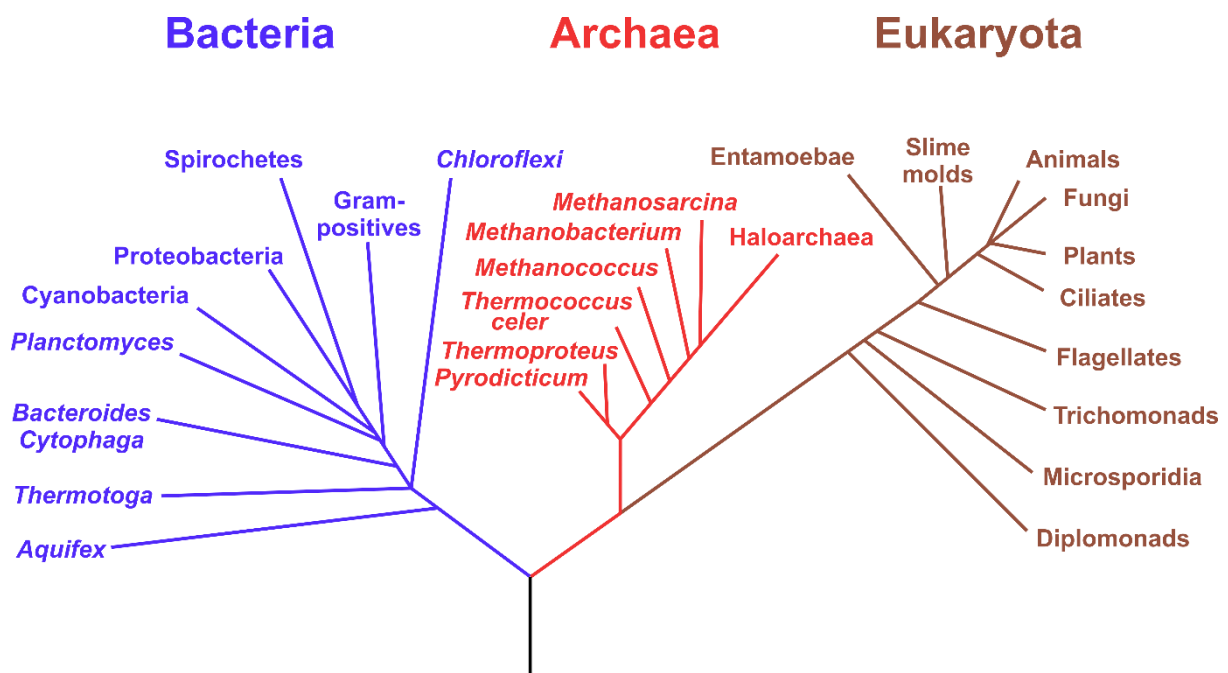


Figure 1. Arbre phylogénique des organismes vivants, basé sur des séquences de l'ARNr 16S. À l'origine proposé par Carl Woese, il montre l'histoire évolutive des trois domaines du vivant (bactéries, archaea et eucaryotes) (d'après Eric Gaba, Wikipedia commons).

Mais chaque catégorie résiste au classement au point que ces subdivisions, y compris au niveau de l'espèce, sont parfois des obstacles épistémologiques à la compréhension de la fluidité du vivant. Par exemple, l'espèce est une des subdivisions électives pour décrire les composantes d'un écosystème, mais l'établissement d'une limite claire entre deux espèces (censées n'être pas fécondes entre-elles, par définition) n'est pas toujours possible, dès lors qu'on est proche de la bifurcation de leur branche phylogénique. De nombreuses espèces appartenant à tous les règnes présentent le même modèle : par exemple, plusieurs sous-espèces du pouillot verdâtre, une petite « fauvette », sont interfécondes de proche en proche autour du plateau tibétain et des déserts de l'ouest de la Chine (donc appartiennent à la même espèce), mais accumulent tant de différences avec l'éloignement, que les deux « sous-espèces » qui se rencontrent en un point de l'anneau formé par leur distribution géographique, ne peuvent s'hybrider (ce sont deux espèces différentes sur cette ligne de contact) (Figure 2). Il est donc, dans l'actuel, des espèces en train de se créer par isolement progressif, et ces situations résistent aux compartiments artificiels que nous plaquons sur la réalité biologique. Le

critère d'interfécondité de Mayr est donc partiellement battu en brèche aux bifurcations de chaque branche, bifurcations qui existent nombreuses dans l'actuel de l'Évolution en marche.

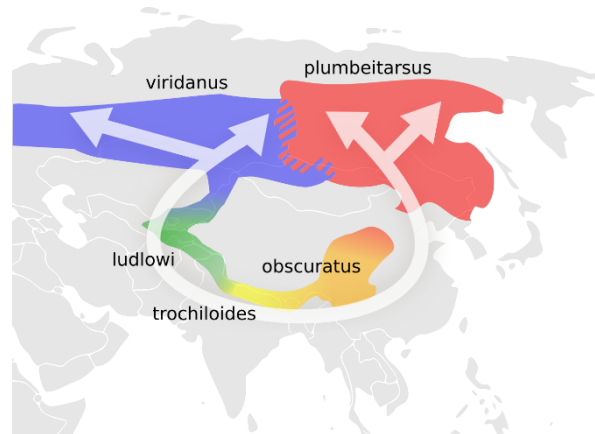


Figure 2. Le pouillot verdâtre, *Phylloscopus trochiloides*, compte deux formes reproductivement isolées, *P.t. viridanus* et *P.t. plumbeitarsus*, reliées par une chaîne de populations qui s'hybrident. D'après Irwin et al. (2005)⁴.

De plus, il a été découvert récemment que les échanges d'acides nucléiques (ADN, ARN) entre organismes hors reproduction sexuée, étaient beaucoup plus répandus qu'on ne le pensait auparavant, en particulier par l'intermédiaire de virus, ou directement entre bactéries. À tel point qu'à défaut de savoir quel statut catégoriel accorder à telle ou telle unité biologique, les chercheurs qui étudient l'ADN ou l'ARN du vivant, notamment les bactéries et les virus, parlent « d'unité taxonomique opérationnelle » (opérationnelle pour leur étude, et non classement absolu). L'écologue a cependant besoin de noms à poser sur ses objets d'étude, entre lesquels il essaie d'identifier des relations, mais les modèles nominatifs qui lui sont offerts sont faux comme tous les modèles. Il les apprécie donc selon la valeur de leur utilité pratique du moment, en ayant hautement conscience de leurs limites. Nous proposons dans les paragraphes suivants, quand il est nécessaire d'échapper aux divisions trop rigides potentiellement trompeuses dès lors qu'on a besoin de comprendre les processus en action, de parler pour notre part de « forme vivante » plutôt que d'unité taxonomique. Nous considérons ici comme « forme vivante », à quelque niveau d'organisation du vivant qu'elle s'applique, toute entité porteuse d'un code sous forme d'acide nucléique auto-réplicable, susceptible de mutations (motrices d'innovation), possiblement partagé entre plusieurs organismes (métagénome) et qui évolue soumis à la sélection de son environnement. Les virus quant à eux sont à la limite de la définition du vivant, puisque la réplication de leur ADN ou de leur ARN dépend d'enzymes fournis par la forme vivante qui l'héberge, et que la sélection des formes mutées ne peut se faire que sur l'ensemble virus – hôte et sur la résistance de la forme libre du virus aux facteurs environnementaux (température, lumière, etc.). Nous verrons plus loin l'extension de cette notion à tous les eucaryotes, car ce sont tous des formes vivantes symbiotiques : la notion de métagénome, ou de « génotype étendu »⁵, devient plus pertinente que celle de génome. Par exemple, l'organisme humain est l'expression intégrée de son génome nucléaire, mitochondrial et des génomes de son microbiote (intestinal, cutané, etc.) : il ne peut survivre sans l'expression conjointe de ses trois éléments constitutifs, et c'est cette expression globale (le « phénotype

⁴ Irwin, D.E., Bensch, S., Irwin, J.H., Price, T.D., 2005. Speciation by Distance in a Ring Species. *Science* 307, 414–416. <https://doi.org/10.1126/science.1105201>

⁵ Dans *Interactions durables. Ecologie et évolution du parasitisme*. Masson. Combes (1995) propose la notion de « génotype étendu », à propos du parasitisme, auquel correspond celui de « phénotype étendu ». Il fournit dans cet ouvrage un foisonnement d'exemples montrant que les interactions durables entre plusieurs génotypes (celui du parasite et de son hôte, ou de plusieurs organismes symbiotiques) fournissent un phénotype émergent sur lequel s'exerce la pression de sélection darwinienne.

étendu ») qui est soumise à la sélection de son environnement. L'emploi du terme « forme vivante » se réfère à la fonctionnalité évolutive d'un ensemble vivant dont on peut définir sans excès un certain degré d'internalité et d'externalité relationnelle. Il permet d'échapper provisoirement, pour les besoins du raisonnement, à certains compartimentages visibles (par leur limite membranaire, leur tégument, etc.) ou niveaux d'organisation (individu, population, communauté, etc.) trop rigides qui font parfois obstacle épistémologique pour penser la perméabilité des dépendances écologiques et leurs continuités. Par exemple, le moi biologique d'un humain, tel que présenté plus haut, est une forme vivante constituée par une colonie symbiotique de cellules d'origines diverses. De ce moi biologique et de sa relation à son environnement émerge la conscience du moi, épigénétique, conscience qui lui permet même de ne pas connaître ou d'oublier sa nature symbiotique, et, avec l'acquisition du langage, de créer avec ses semblables la catégorie *Homo sapiens* (qui est, bien-sûr, aussi une espèce linnéenne dérivée d'autres maintenant éteintes, du genre *Homo*).

La parenté biochimique entre toutes les formes vivantes au niveau cellulaire est si forte, que l'on considère actuellement que toutes celles connues sont issues d'un ancêtre commun unique, cellulaire, LUCA (*Last Unique Common Ancestor*). LUCA n'est pas supposé être le premier être vivant, d'autres formes de vie ont pu apparaître avec lui, il y a près de 4 milliards d'années. Par contre, l'unicité biochimique du monde vivant actuel ne peut s'expliquer que par la sélection darwinienne de LUCA parmi ces formes de vie. Qu'ont en commun tous les descendants de LUCA ? D'abord la capacité à se répliquer en transmettant un plan d'organisation porté par un acide nucléique, l'acide désoxyribonucléique (ADN). En s'autorépliquant à l'identique, ou en se combinant à d'autres brins d'ADN créant ainsi des combinaisons nouvelles, l'ADN transmet le plan de protéines qui catalysent ensuite chacune les réactions cataboliques (celles qui « cassent » des molécules complexes en molécules plus simples sont sources d'énergie) et les réactions anaboliques (celles qui, grâce à cette énergie, en assemblant des molécules simples – acides aminés, glucides simple, etc.- élaborent la matière plus complexe de chaque forme vivante). Toutes les formes vivantes partagent un grand nombre de gènes (portions codantes d'ADN) identiques à des variations mineures près, dues à des erreurs de réplication, les mutations. Nous avons vu plus haut que le cas des virus est à part. Parasites obligatoires, ils ont joué (et jouent encore) un grand rôle dans l'évolution, entre autres et non des moindres, comme vecteurs d'acides nucléiques entre organismes (soit sous forme d'ADN, soit sous forme d'ARN). Toutes les formes vivantes sont donc parentes plus ou moins éloignées, et leurs apparitions peuvent être considérées comme le résultat d'un jeu de construction par lequel le jeu des mutations/sélections a ajouté ou retranché un plus ou moins grand nombre de modules, que j'appellerai ici plugins, dont tout le monde peut comprendre la place fonctionnelle par analogie avec le monde des logiciels. Ces plugins sont des ajouts dans le code génétique (génome ou métagénome) conférant à la cellule des propriétés nouvelles.

L'organisation modulaire du vivant

Ces plugins peuvent provenir de plusieurs sources : mutation du code génétique donnant un nouveau gène, incorporation d'un ADN viral, inclusion d'autres organismes ayant leur propre génome, par exemple, et trouver leur expression la plus achevée dans des propriétés épigénétiques émergentes à des niveaux d'organisation plus élevés que cellulaire. C'est le cas par exemple de la conscience, nous y reviendrons.

Au jeu des différences, la séparation entre plante et animal n'est pas nécessairement la plus pertinente. Le biologiste peut, selon les besoins de sa démonstration et sans contradiction aucune, à la fois pointer des collections de différences (celles qui constituent la « diversité » du mot « biodiversité ») et souligner des collections de points communs. L'unité du vivant est telle que, sans la remettre aucunement en cause, on peut décliner les différences jusqu'à constater que chaque

individu est unique, plante ou animal, et montrer comme nous l'avons fait plus haut, que chacun partage avec les autres le même essentiel. D'un point de vue fonctionnel, l'écologue distinguera plutôt les êtres vivants hétérotrophes et les êtres vivants autotrophes, dont la complémentarité est vitale dans le fonctionnement durable d'un écosystème. Les autotrophes sont tous les êtres vivants qui possèdent un plugin cellulaire supplémentaire par rapport aux hétérotrophes leur permettant de synthétiser leur biomasse (sucres, acides aminés, lipides, acides nucléiques, etc.) à partir de la matière minérale (gaz carbonique, eau, sels minéraux) et d'énergie (lumière, oxydation chimique, etc.). Il existe plusieurs formes de ce plugin selon les organismes. Chez les végétaux c'est un organite intracellulaire chlorophyllien. Nous reviendrons plus loin sur son origine. On trouve des autotrophes dans tous les règnes sauf les animaux et les champignons. Les hétérotrophes sont tous les êtres vivants ne possédant pas ce plugin, et qui donc ne peuvent élaborer leur propre biomasse qu'en consommant celle des autotrophes ou d'autres hétérotrophes. Les animaux et les champignons sont des hétérotrophes obligatoires, mais certaines plantes qui ont perdu leur plugin chlorophyllien, alors parasites obligatoires d'autres formes vivantes, sont hétérotrophes, comme les animaux. Ceci-dit, si différencier quantitativement la part fonctionnelle de chacun dans l'inextricable réseau des relations constitutives d'un écosystème est tâche ardue, parfois même impossible, l'examen des biomasses relatives des plantes et du reste des vivants est révélateur de leur importance quantitative, liée d'ailleurs en partie à l'importance écologique du plugin chlorophyllien dans les écosystèmes actuels (Figure 3).

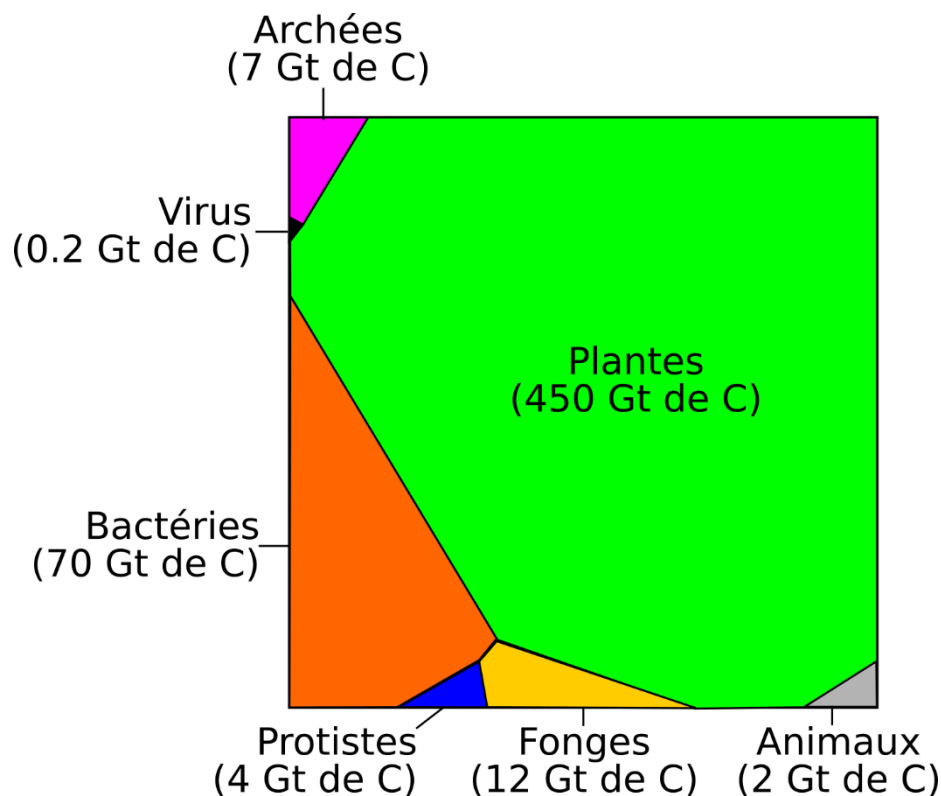


Figure 3. Biomasse globale des formes vivantes terrestres (en gigatonnes de carbone) d'après Bar-On et al. (2018)⁶.

Le fait que les plantes (chlorophylliennes, autotrophes) soient dominantes en biomasse de façon si écrasante, s'explique par le fait que toutes les autres formes vivantes, hétérotrophes, dépendent de leur production de biomasse pour assurer la fabrication de leur propre matière (à l'exception de

⁶ Bar-On, Y.M., Phillips, R., Milo, R., 2018. The biomass distribution on Earth. PNAS 115, 6506–6511. <https://doi.org/10.1073/pnas.1711842115>

quelques bactéries chimiolithotrophes, autotrophes elles-aussi, dont certaines sont à la base des écosystèmes des fonds marins, dans l'obscurité des sources hydrothermales des rifts océaniques). La transformation qui passe d'un niveau trophique à l'autre (par exemple de producteur primaire, des plantes, à consommateur primaire, des herbivores) se fait avec une dissipation importante d'énergie selon les règles de la thermodynamique : de l'ordre de 1 à 10% de biomasse est créée au niveau trophique supérieur à partir de 100% de biomasse consommée du niveau inférieur. Les hétérotrophes sont donc nécessairement moins « abondants » en biomasse que la production autotrophe dont ils se nourrissent, sinon l'écosystème s'effondre.

Cette différence fonctionnelle entre autotrophie et hétérotrophie, ne correspond pas à des différences radicales dans le « tronc commun » métabolique partagé entre toutes les formes vivantes, et encore moins entre plantes et animaux, finalement très voisins dans l'arbre phylogénique (Figure 1). Quelles sont les grandes différences entre un animal et une plante au niveau cellulaire ? Il m'en vient seulement deux ou trois saillantes à l'esprit : la plante possède un plugin « fabriquer une paroi » (pecto-cellulosique), mais les fonges, les bactéries et les archées aussi. Un grand nombre de plantes possèdent le plugin « synthèse chlorophyllienne » (nous y reviendrons), mais de nombreuses bactéries aussi. Enfin certains plugins offrent des voies métaboliques particulières comme « stocker des polymères de sucres simples sous forme de chaînes d'amidon », alors que les animaux ont le plugin « stocker des polymères de sucres simples sous forme de chaînes de glycogène ». Mais les deux ont des plugins « stocker des réserves sous forme de lipide », auxquels s'ajoutent d'innombrables variantes biochimiques propres, à l'intérieur de chaque règne comme entre les deux règnes. Ce qui frappe, ce sont plutôt les ressemblances : la membrane phospholipidique avec des protéines et glycoprotéines enchâssées limitant, dans toutes les formes vivantes, et donc chez les plantes comme chez les animaux, un cytoplasme, un réseau interne de membranes appelé appareil de Golgi, des mitochondries, un noyau limité par sa membrane, des acides nucléiques qui se rendent visibles au microscope sous forme de chromosomes et de ribosomes. Tous ont le plugin « multiplication cellulaire à l'identique » (un cas général amusant où une division conduit à une multiplication), certaines plantes comme certains animaux peuvent opter pour cette forme de reproduction. D'autres la complètent avec la reproduction dite sexuée (qui n'est pas au sens strict une reproduction à l'identique, mais la création d'une nouvelle combinaison d'information). Par les mêmes mécanismes chromosomiques, les ADN de deux parents, plantes ou animaux, se combinent et donnent naissance à un descendant.

Plantes et animaux possèdent en commun le plugin « transformer par oxydation un sucre simple en gaz carbonique et en eau et générer de l'énergie récupérable », c'est la respiration, en tant que fonction cellulaire. Elle commence dans le cytoplasme par une hydrolyse anaérobie du glucose (une fermentation !), et elle finit dans les mitochondries par un cycle de Krebs et une chaîne de phosphorylations oxydatives. Oui, les plantes comme les animaux respirent, ont donc une fonction hétérotrophe. Seulement, les plantes possèdent le plugin « chlorophyllien » en plus, capable de la réaction inverse, c'est ce qui en fait des autotrophes au bilan global. Une merveille : grâce à la lumière du soleil, une molécule d'eau H_2O est cassée et libère son oxygène, l'hydrogène récupéré (deux protons pour être exact) peut ensuite, dans un cycle dit de Calvin qui inclut de nombreuses réactions intermédiaires, se combiner au gaz carbonique pour former un sucre ! Les plantes ont donc l'avantage fantastique d'être en intracellulaire à la fois hétérotrophe et autotrophe, mais comme nous l'avons vu plus haut, être plus hétérotrophe qu'autotrophe sans source supplémentaire de matière organique « toute faite » n'est pas viable. Le bilan chez les plantes vertes est, à la lumière, en faveur de l'autotrophie, et c'est donc non seulement la plante, mais aussi tous les hétérotrophes sans plugin « chlorophyllien » la consommant, qui en profitent. Elle et ils profitent en plus aussi pour leur respiration du déchet de réaction émis par la plante qu'est le dioxygène. Sous cet angle, on peut

se représenter la plante comme un animal avec plus d'options : une paroi et le plugin « chlorophyllien ». D'ailleurs à ce niveau la barrière animale – plante est floue. Les euglènes, organismes unicellulaires (plus de 100 espèces connues) sont rangés dans les algues vertes, bien qu'elles n'aient pas de paroi et se meuvent, comme d'autres protozoaires animaux et les spermatozoïdes humains, avec un flagelle. Elles sont capables de perdre leur plugin « chlorophyllien » dans certaines conditions (naturelles, mais aussi si on ajoute de la streptomycine, un antibiotique, à leur milieu de culture) et de très bien vivre comme un animal. Les animaux seraient-ils des plantes ayant perdu des plugins ? Ou les plantes des animaux ayant acquis des plugins supplémentaires ? La vie se rit des catégories que nous avons créées pour la décrire.

La condition d'autotrophe ou d'hétérotrophe a déterminé les mille manières de se procurer sa « nourriture ». Une plante chlorophyllienne n'a pas à courir après les sels minéraux, la lumière et le gaz carbonique. Il lui suffit de ne pas être à l'obscurité et de disposer d'un réseau de captage souterrain qui explore le sol où se trouvent les ions dont elle a besoin. Dans l'eau qui contient des sels minéraux dissous, les algues et certains autres végétaux peuvent même se passer de racine. Pour un hétérotrophe, c'est différent. La recherche de nourriture oblige pour la majorité au déplacement rapide, et a donc favorisé l'acquisition de plugins spécifiques (fibre musculaire, appareil sensoriel sophistiqué, etc.). Un hétérotrophe peut cependant adopter la vie fixe si un courant (ou une association symbiotique avec un autotrophe, nous y reviendrons) lui amène la nourriture, ou s'il parasite un autre organisme, ou dispose à l'envi de matière organique morte (c'est le cas des champignons du sol). La moule ou l'huître fixées sur leur rocher, ou encore les coraux, profitent des courants marins qui leur apportent leur nourriture (ces derniers, nous le verrons disposent aussi d'une algue symbiotique qui les nourrit). L'orobanche, une plante non-chlorophyllienne parasite, dispose d'un appareil racinaire qui plonge dans celui d'une autre plante, elle chlorophyllienne. Les deux formes de vie fixe, autotrophe et hétérotrophe, doivent cependant se propager, car celles qui n'auraient pas acquis cette propriété se rendraient très vulnérables à l'épuisement local des ressources et à l'extinction. Elles émettent alors des « propagules », qu'elles soient végétales ou animales, parfois sur plusieurs centaines de kilomètres, selon une variété impressionnante de solutions (cellules sexuelles, partie d'organe, embryon, etc.). Celles-ci ne diffèrent entre elles que par des détails de mise en œuvre, sous contrainte des acquis évolutifs (en d'autres termes, des plugins disponibles).

Dans les formes anciennes pluricellulaires du vivant, plantes comme animaux, la sélection a conduit à une forme d'organisation souvent métamérique : un organisme est composé d'une série linéaire de segments, appelés métamères, fondamentalement similaires dans leur structure. Par exemple, un métamère de plante, appelé phytomère, est constitué d'un entre-nœud et de son nœud supérieur avec la feuille attachée, la plante elle-même pouvant alors être une succession branchue de phytomères qui se développent chacun à partir d'un bourgeon. Chez les animaux, l'organisation originelle « métamérique » est clairement perceptible par exemple chez les vers de terre, mais aussi chez l'embryon humain dans ses premiers stades de développement en « somites », jusqu'à l'adulte qui en garde trace dans sa segmentation vertébrale (Haeckel, qui avait remarqué la segmentation de tous les embryons de vertébrés, y compris la présence d'arc branchiaux métamériques dans les stades précoces de l'embryogénèse humaine, en avait conclu au XIX^e siècle que « l'ontogénèse récapitulait la phylogénèse »). La segmentation modulaire de l'organisme, phylogénique et ontogénique, n'est pas propre aux plantes, et pour les plantes comme pour les animaux, cette organisation a été le soubassement structurel de formes apparues plus tardivement, dans lesquelles elle est moins facilement détectable car réarrangée. Elle a aussi été la base de l'organisation en colonie de nombreux organismes tant animaux que végétaux. La succession d'entre-nœuds constitue les cascades de ramification d'un arbre, par exemple. Chaque bourgeon, qui donne naissance à

l'entre-nœud suivant, est capable de mutations dont ce dernier hérite. L'arbre est donc en fait une colonie d'entre-nœuds et de bourgeons, chacun pouvant avoir un génome modifié évoluant indépendamment des autres et produisant (selon sa place) des graines. L'arbre, même s'il est issu d'une graine unique, est donc, par ce processus, une communauté faite d'une mosaïque de génomes mutés à des degrés divers. Cette construction n'est pas propre aux arbres. On la retrouve identique dans son principe dans les organismes coloniaux animaux bourgeonnants, comme les coraux.

Tous les animaux ne possèdent pas un système nerveux central et certains n'ont pas de système nerveux du tout, tous, nous l'avons vu, ne se déplacent pas. Beaucoup de plantes sont douées de mouvement, qui peuvent être rapides (pensez à la dionée attrape-mouche qui referme ses feuilles sur l'insecte), ou lents. Par exemple, le palétuvier rouge et le palmier marcheur se déplacent de plusieurs mètres par an en implantant de nouvelles racines et en décentrant ensuite leur tronc ; le film de ces déplacements en accéléré, comme de celui de la branche de lierre cherchant son support sont très troublants par leur analogie avec un déplacement animal. Toutes les plantes se déplacent par leurs propagules.

Les mouvements chez l'animal sont le plus souvent commandés par la fibre musculaire, effecteur d'un influx nerveux, dont on peut enregistrer l'activité électrique. Cette activité électrique est en fait le résultat de changements de perméabilité ionique de la membrane cellulaire, qui se propage le long de structures support (comme l'axone ou la dendrite de la cellule nerveuse, ou la cellule musculaire, mais pas que). Chez les plantes, pas de système nerveux « spécialisé », mais une activité électrique mesurable, également résultat de changements locaux de perméabilité ionique de la membrane cellulaire. Le mouvement est alors généré par flux osmotique (déplacement d'eau) intercellulaire, car aucune plante n'a de plugin « fibre musculaire ».

Chez les plantes comme chez les animaux, les fonctions vitales se déroulent en dehors d'une pensée consciente, ou tout au moins de l'idée que l'humanité a de la conscience. Plante comme animaux peuvent communiquer grâce à des substances chimiques, hormones pour la communication interne entre organes, phéromones pour la communication externe. Plantes et animaux perçoivent et répondent à la perception. Il est facile de s'en convaincre pour les animaux. Il n'est qu'à voir la forme d'un arbrisseau à proximité d'une haie qui lui fait de l'ombre, de son tronc et ses branches qui de toute l'énergie dont elles sont capables se tendent vers la lumière, pour comprendre que la plante perçoit bien son environnement et y répond de façon adaptative.

Reste la question de la conscience, qui, du point de vue humain, semble propre à une partie du monde animal, avec un abîme de questions encore non résolues. Comme écologue, je n'ai pas les moyens conceptuels d'aller très loin philosophiquement à propos de la notion de conscience, des autres et de celle de soi. Ce plugin qui a émergé graduellement comme une propriété épigénétique, apparemment uniquement chez les animaux, présente, semble-t-il un avantage sélectif, au moins provisoire, puisqu'il a émergé. L'émergence de forces comportementales qu'on qualifie de culturelles ne me semble pas avoir d'équivalent chez les plantes. Chez l'homme, elle dépasse de très loin, par le niveau d'abstraction atteint, sa complexité et ses impacts, toutes les émergences comportementales décrites chez d'autres formes vivantes. Les populations de nombreuses d'entre elles ont néanmoins aussi une culture propre, un savoir transgénérationnel, comme entre autres les baleines et certains primates, et la conscience de soi, comme certains primates, les éléphants, le labre nettoyeur (un poisson marin), la pie bavarde, certains cétacés, le porc (et nous-même, donc, mais à partir de l'âge de 18 mois seulement). Ce qui est sûr, c'est que cette émergence apparemment tardive dans l'évolution a inventé un mode de transmission biologique d'information qui n'est plus basé sur la génétique (le passage d'acide nucléique d'une génération à l'autre), et permet donc l'héritage épigénétique de certaines formes d'acquis (les connaissances, les comportements), et plus

seulement de l'inné. Cet héritage continue cependant à être sélectionné de façon darwinienne, au sens où son caractère adaptatif ou maladaptatif peut entraîner sa sélection ou sa contre-sélection dans un écosystème donné. Ainsi peuvent apparaître puis disparaître des savoirs transgénérationnels et des civilisations. Savoir maintenant si ce nouveau plugin sera un avantage à long terme pour les formes vivantes qui en sont dotées est une autre histoire dont seul le temps long permettra aux éventuels survivants de l'apprécier (s'ils en sont toujours dotés). En attendant, l'écologue que je suis, qui est aussi, du fait de ce plugin, un humain capable d'empathie, se sent physiquement mal à l'aise, sincèrement, devant une plante qui se flétrit, manifestement stressée voire mourante, parce que, par négligence, on a oublié de l'arroser ou mise à mauvaise lumière. Je m'interroge aussi sur ce qu'une plante, ma cousine en phylogénie avec qui je partage tant d'éléments ontogéniques et de plugins, mais aussi d'irréductibles altérités, perçoit ou non de ma propre existence. Je m'interroge aussi sur le fait que le génome du riz possède 37544 gènes, soit presque deux fois plus que le mien (estimé à environ 20 000), moi qui appartient à une forme vivante dont certains de ses représentants ont la naïveté, et parfois même l'imbécillité fanatique, de croire encore qu'elle serait l'achèvement ultime de l'arbre évolutif, parmi les innombrables autres complexités présentes et dizaines de millions de formes de vie qui, comme elle, traversent la même ligne temporelle du temps de l'Évolution. On peut rire de cette prétention, et, plus souvent encore, en pleurer quand on en constate les conséquences.

Le commun relationnel du monde

« Jamais seul ». C'est le titre d'un ouvrage fascinant de Marc-André Selosse⁷, du Muséum National d'Histoire Naturelle. Il montre par des exemples foisonnants en quoi les mutualismes de tous ordres, appelées aussi symbioses, ont organisé le monde vivant, à pratiquement tous ses niveaux d'organisation, de la cellule à la biosphère, civilisations incluses. Une lecture réductionniste, donc incomplète, du darwinisme, veut faire croire que la compétition, « la survie du plus apte », est le moteur cardinal de la sélection. Si l'on ne peut nier que les formes vivantes disparues étaient par définition compétitivement défailantes dans le jeu coévolutif, il n'en reste pas moins que la plupart pour ne pas dire virtuellement toutes celles qui sont parvenues jusqu'au présent l'ont été, comme nous le verrons plus loin, par l'acquisition d'adaptations mutualistes entre plusieurs formes vivantes. Il s'agit là de mettre en commun les plugins dont on n'a pas hérité de ses ancêtres. De plus, l'aptitude à la survie dans un environnement donné peut être une inaptitude dans un autre environnement et donc inverser les aptitudes compétitives. C'est donc bien la (bio)diversité des aptitudes, leur coexistence dans un espace hétérogène, qui assurent la résistance aux perturbations et la résilience des formes de vie au niveau d'intégration supérieur, c'est-à-dire la robustesse du système.

En biomasse, actuellement, l'humanité constitue 36% des mammifères présents sur terre, les mammifères domestiques 60%, et les mammifères sauvages 4% seulement. Cette écrasante dominance de l'humanité et de ses animaux domestiques dans le taxon « mammifères » coexiste avec une autre réalité globale : les animaux (dont les mammifères) ne constituent que 4 pour mille de la biomasse terrestre, et l'homme 1 pour dix mille. Comme l'indique la Figure 3, notre terre est un monde de plantes (82%) et de microbes (17%), qui pourrait fonctionner sans les animaux, avec des différences qu'on peut considérer comme marginales à cette échelle. Il est vrai que l'impact d'une espèce sur les autres ne se mesure pas à sa seule biomasse : un mathématicien a calculé que toutes les particules virales de SARS-COV2 dans le monde pendant la pandémie ne suffiraient pas à remplir une canette de coca-cola. Malgré tout, d'un point de vue écologique, comme nous l'avons

⁷ Selosse, M.-A., 2017. Jamais seul. Ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations. Actes Sud, Arles.

mentionné plus haut, le monde vivant fonctionne parce qu'une forme d'équilibre existe entre la fonction autotrophe et la fonction hétérotrophe. C'est d'ailleurs à la rupture de cet équilibre que nous devons l'atmosphère du monde actuel, riche de 21% d'oxygène, l'accumulation de carbonates dans les roches, et nos réserves en carbone fossile. Il y a 3.7 milliards d'année, à l'origine de la vie sur terre, l'atmosphère et les eaux étaient réductrices, et l'oxygène rare, toxique pour la plupart des organismes. La respiration aérobie (utilisant l'oxygène) n'est apparue qu'il y a 2.5 milliards d'années, après que les premiers organismes photosynthétiques aient modifié suffisamment la composition de l'atmosphère. Ensuite, certains écosystèmes (les forêts carbonifères, par exemple) ont permis l'accumulation des charbons, lignites et pétroles dans le sous-sol, les soustrayant à l'action des hétérotrophes. Ceux-ci n'ont alors pas pu utiliser ce déchet des végétaux chlorophylliens qu'est l'oxygène, largement disponible au niveau actuel depuis le début de l'ère cambrienne il y a environ 450 millions d'années.

L'adaptation des organismes à ce changement d'atmosphère, fournit un exemple d'évolution mutualiste. Comme souvent, l'innovation vient des bactéries, dont le nombre (des milliards de milliards) et la vitesse rapide de génération (quelques heures) multiplient les mutations sans commune mesure avec les formes vivantes plus complexes, et donc les chances d'émergence de propriétés nouvelles. La phosphorylation oxydative fut inventée à ce niveau. L'ancêtre commun aux plantes et aux animaux a très probablement été produit par l'absorption par une archée, par endocytose, d'une bactérie permettant cette phosphorylation oxydative, formant ainsi si ce n'est le premier organisme eucaryote, du moins son ancêtre. Les mitochondries de nos cellules sont les descendants de cette bactérie. Les mitochondries possèdent leur propre ADN (circulaire, comme celui de toutes les bactéries), une double membrane (celle interne étant celle de la bactérie, celle externe celle de la vésicule d'endocytose de l'archée). Notre cytoplasme est celui de l'archée et notre ADN est pourvu d'histones (protéines de configuration) et de mécanismes de transcription semblables à celui des archées dont il est le descendant. La cellule eucaryote est donc en fait une forme vivante symbiotique, et elle est commune aux plantes et aux animaux. Nous sommes, plantes et animaux, les descendants symbiotiques de deux formes vivantes plus anciennes : archées et bactéries.

La Figure 1, de ce fait, doit être révisée en profondeur : la branche tardive et buissonnante des eucaryotes, n'est pas une branche singulière et homogène d'une forme vivante « simple » comme le sont chacune des deux autres branches (bactéries et archées), mais comme le buissonnement d'une forme vivante symbiotique, fusionnelle (on reconnaît encore les éléments d'origine) issue de la fusion d'archées et de bactéries (Figure 4).

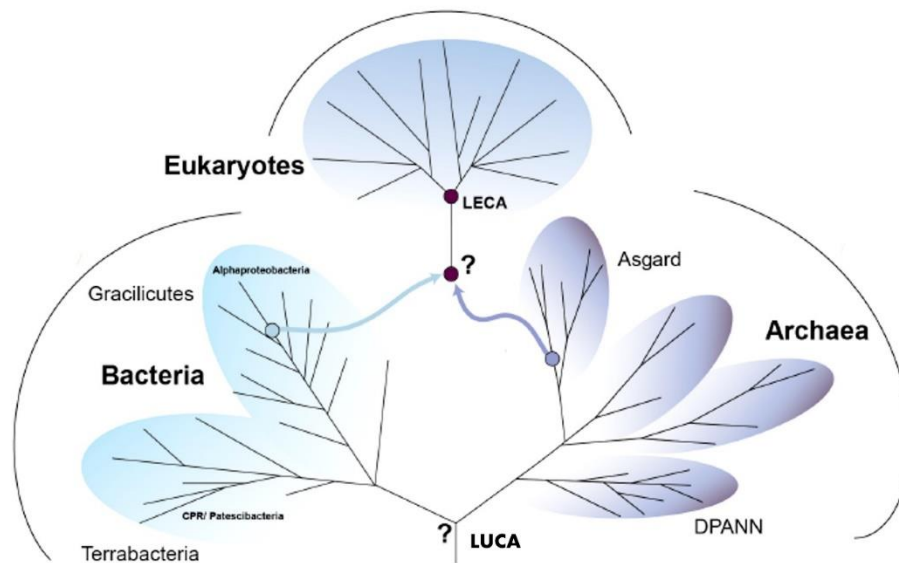


Figure 4. Origine des eucaryotes revisitée⁸. Le point de fusion (marqué "?") sous LECA, Last eukaryotic common ancestor, est le FECA, first eukaryotic common ancestor, le premier ancêtre commun des eucaryotes, il y a environ 2,2 milliards d'années. Bien plus tôt, il y a environ 4 milliards d'années, le LUCA a donné naissance aux deux domaines de procaryotes, les bactéries et les archées. Après le LECA, il y a environ 2 milliards d'années, les eucaryotes se sont diversifiés en un groupe couronne, qui a donné naissance aux animaux, aux plantes, aux champignons et aux protistes.

Les plantes chlorophylliennes sont de plus dotées de chloroplastes dans leurs cellules. Le chloroplaste a une origine analogue à celle la mitochondrie : c'est le descendant d'une bactérie photosynthétique incorporée dans la cellule eucaryote. Les plantes sont donc les descendantes issues de l'association mutualiste de trois organismes : une archée, une bactérie respirante, une bactérie photosynthétique. La Figure 5 présente la succession de ces fusions symbiotiques.

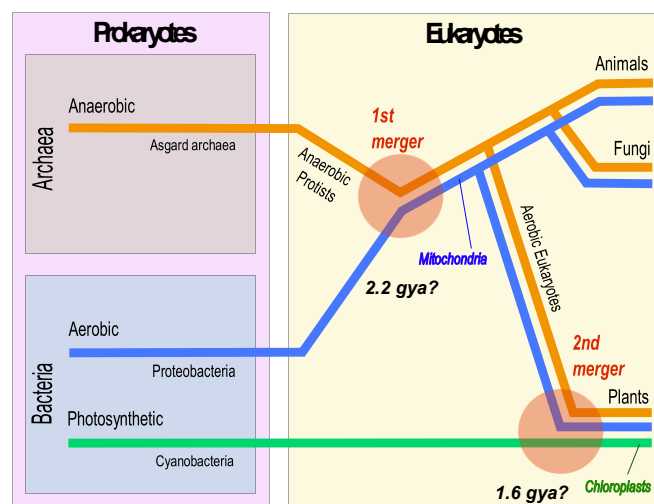


Figure 5. La fusion d'un archée et d'une bactérie aérobie a donné naissance aux eucaryotes, avec des mitochondries aérobie, il y a environ 2,2 milliards d'années (le « 1st merger » est le LECA de la Figure 4). Une seconde fusion, il y a 1,6 milliard d'années, a ajouté des chloroplastes, créant ainsi les plantes vertes⁹.

⁸ McGrath, C., 2022. Highlight: Unraveling the Origins of LUCA and LECA on the Tree of Life. Genome Biology and Evolution 14, evac072. <https://doi.org/10.1093/gbe/evac072>

⁹ Latorre, A., Durban, A., Moya, A., Pereto, J., 2011. The role of symbiosis in eukaryotic evolution, in: Gargaud, M., Lopez-Garcia, P., Martin, H. (Eds.), Origins and Evolution of Life: An Astrobiological Perspective, Cambridge: Astrobiology. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 326–339.

Des mises en commun partielles d'ADN peuvent d'ailleurs être favorisées par l'action des virus, qui sont capables de transporter de l'ADN (ou de l'ARN) d'une forme vivante à l'autre, même si elles ne sont pas apparentées. On estime par exemple qu'au moins 8% de l'ADN humain est d'origine virale. On a pu montrer que l'Aleurode du tabac, un insecte du même ordre que celui des punaises, les hémiptères, possédait un gène de détoxification baptisé BtPMT1, acquis il y a environ 35 millions d'années, qui lui confère une plus grande résistance aux toxines de sa plante hôte. Cette séquence n'existe ailleurs que chez certaines espèces végétales, de bactéries ou de champignons. Cette découverte rend vraisemblable un scénario dans lequel cet herbivore aurait acquis les outils génétiques de sa plante hôte et serait devenu ainsi, par ce « bricolage », usager d'un outil de détoxification originellement appartenant à la plante. La transgénèse a été pratiquée de tout temps par le vivant bien avant que l'humanité n'invente les organismes génétiquement modifiés. S'y ajoute les échanges directs de morceaux d'ADN entre bactéries.

Ces acquisitions-fusions d'organismes sont la règle générale du fonctionnement d'écosystèmes évolutifs donc durables, durables donc évolutifs, à quelque niveau d'organisation qu'on se place. Ils découlent de la règle qui veut que si deux organismes sont en compétition l'un élimine l'autre, sauf dans deux cas. Le premier cas est celui où l'avantage compétitif est limité par une tierce force qui limite la croissance du compétiteur. Par exemple, la prédation par une étoile de mer de la moule de Californie, compétitivement dominante, laisse place à d'autres organismes benthiques fixés, qui autrement seraient éliminés faute de place sur les rochers. Autrement dit, une relation perçue comme néfaste à l'échelle d'un des individus si on en fait une lecture à ce seul niveau (la prédation se solde par la mort de la proie), peut se révéler un bénéfice pour un ensemble d'espèces si elle est perçue à l'échelle de la communauté. Autre exemple de ce type, la prédation, qui se fait préférentiellement vis-à-vis des proies les plus faciles à capturer, élimine de fait plus les individus malades que les autres et peut contribuer ainsi à limiter la propagation d'épidémies à l'échelle de la population de proies. On peut également citer la prédation où, à basse densité, la proie peut échapper au prédateur (par sa rareté ou des caches inaccessibles). Le système aboutit alors à un équilibre stable en moyenne dit de Lotka-Volterra, où alternent des pics de proies et des pics du prédateur en décalage d'un quart de phase (ce schéma de stabilité devient beaucoup plus complexe dès lors qu'existent plusieurs espèces de prédateurs et de proies).

Le deuxième cas, qui peut-être un prolongement du premier sur un temps plus long, procède d'une coévolution poussée ; le compétiteur dominant sélectionne (involontairement) les génotypes du compétiteur dominé qui échappent à sa compétition, jusqu'à un équilibre durable. Le mécanisme peut aller très loin : nous avons vu que l'endocytose (une forme de prédation) par les archées de bactéries respirantes (et de bactéries photosynthétiques ultérieurement chez les végétaux), a sélectionné un assemblage finalement favorable à la bactérie et à l'archée, et à leur association mutualiste, qui a donné la cellule eucaryote. De nos jours les mitochondries et les chloroplastes sont incapables de vie libre, et la cellule eucaryote est incapable de survivre sans mitochondrie (et est hétérotrophe sans chloroplaste). Les exemples d'associations mutualistes plus ou moins poussées, plus ou moins obligatoires sont infinis et peuplent nos écosystèmes. L'écosystème lui-même, y compris dans sa dynamique évolutive, peut-être pensé comme un gigantesque symbiote. On touche alors, si on étend ce constat à la biosphère, une notion proche de l'intuition métaphorique « Gaïa » de James Lovelock. Largement dévoyée par les surinterprétations mystiques dont se sont emparés de fumeux courants spiritualistes ou religieux, elle repose sur la simple idée que la biosphère, par des emboîtements complexes de systèmes relationnels, est soumise à des règles thermodynamiques et évolutives qui assurent, sous forme d'équilibre dynamique et de flux de matière et d'énergie, la

persistance du vivant depuis plus de 3.8 milliards d'années¹⁰. Le point sur lequel je veux insister ici, c'est que ce qui semble sélectionné sur la durée, c'est un nombre considérable d'associations à avantage réciproque à une échelle donnée : les symbioses. C'est sur elles que s'exerce également la pression de sélection. La compétition à mort, celle qui élimine l'autre, ne peut-être que locale, sur le temps court, et limitée. Sur le temps long, si elle n'entraîne pas de coévolution ou n'est pas limitée, elle entraîne la mort de l'écosystème. Cela concerne toutes les formes vivantes qui le constituent. Notre monde et ses symbioses multiples n'émerge donc pas d'une téléonomie pacifiste, mais bien parce que les formes vivantes qui le composent extraient leurs ressources propres d'une autre forme vivante dans le cas de l'hétérotrophie (exemple : la relation prédateur-proie, ou le parasitisme), ou du minéral dans le cas de l'autotrophie. Cette extraction peut aboutir à l'extinction de la ressource. Elle n'est durable que dans l'établissement progressif d'un équilibre dynamique issu d'une forme de coévolution. On peut-même présenter la symbiose comme un parasitisme réciproque en équilibre dynamique perpétuellement menacé par la triche (exemple : une mutation où un des protagonistes prend l'avantage, ou subit un désavantage, et mange l'autre ou est mangé par l'autre). Si le cimetière des extinctions peut être contemplé dans les formes fossiles conservées dans la roche, seules sont actuelles, et socle provisoire d'un futur évolutif (on ne se baigne jamais deux fois dans le même fleuve de la vie), les formes vivantes dont la « puissance d'agir » n'a pas entraîné l'effondrement du système.

Les eucaryotes, qui sont de typiques symbiotes, peuvent eux-mêmes développer des relations mutualistes, devenant de fait des super-symbiotes (des symbiotes de symbiotes). C'est le cas bien connu des lichens, association d'une algue et d'un champignon. Mais les exemples sont également innombrables entre végétal et animal. Par exemple, les récifs coraliens sont constitués d'organismes, les polypes, capables de former d'immenses colonies marines et de produire un squelette calcaire. Ils sont capables d'absorber des algues unicellulaires, les zooxanthelles, et d'établir une relation symbiotique favorable aux deux partenaires. Dans certaines conditions (changements de températures, pollutions, etc.) cette symbiose est rompue, et entraîne la perte des zooxanthelles, c'est le blanchissement des coraux. On voit ici en quoi une symbiose peut se révéler provisoire, et en quoi son succès peut dépendre de variations des conditions environnementales. Là encore les exemples de mutualisme plante – animal sont innombrables : plantes entomogames dont la fécondation dépend du transport du pollen par des insectes (souvent spécialistes) ; même principe avec des oiseaux ou des chauves-souris ; zoochorie où la dispersion des graines dépend des animaux ; associations de défense qui ont sélectionné des loges dans le végétal hébergeant des fourmis qui elles-mêmes repoussent les herbivores ; etc. L'humanité elle-même participe à ces processus et oriente même la sélection darwinienne à son profit à travers la création et l'entretien de multiples espèces végétales et animales domestiques.

Comme les animaux (dont l'homme), les plantes sont rarement seules. La plupart (plus de 80%) entretiennent des relations mutualistes avec d'autres organismes. Par exemple, deux types de symbiose prolongent, en étant indispensables, la fonction racinaire. Les ectomycorhizes sont des manchons constitués par des hyphes mycéliens (des cellules de champignons) qui se ramifient dans les interstices du sol que la racine elle-même ne peut pas pénétrer. Là, leur hétérotrophie leur permet de consommer la matière organique et de fournir l'eau et les sels minéraux extraits à la plante ; il s'agit donc d'une prédigestion et d'un accès aux interstices fins du sol que la plante ne

¹⁰ On frôle la lapalissade : si la biosphère et ses formes vivantes existent encore après 3.8 milliards d'années, c'est qu'elle vit encore. Donc que les formes vivantes qui la composent, toujours changeantes dans un flux permanent de matière et d'énergie, sont le résultat et la cause de boucles régulatrices qui le permettent, dans la limite des incontournables règles de la thermodynamique.

pourrait pas réaliser. La plante en retour nourrit le champignon par des sucres et les facteurs de croissance qu'elle produit à partir de son plugin chlorophyllien. Des endomycorhizes doublent ou même se substituent à ce système, les hyphes mycéliens étant alors étroitement imbriqués dans l'intérieur des tissus végétaux, et même des cellules végétales, qu'ils parcourent. Au total, on estime que 30 à 50% du produit de la photosynthèse est englouti dans l'entretien des mycorhizes. Mais par ailleurs, sans ces mycorhizes, la plante meurt. Certaines plantes comme les légumineuses, entretiennent des bactéries du genre *Rhizobium* dans des nodosités spéciales de leurs racines, bactéries capables de transformer l'azote de l'air en nitrates et donc de fournir à la plante un ion parfois critiquement rare, qui lui permet de fabriquer ses propres acides aminés.

Chez les animaux (dont l'homme), on a découvert l'importance fondamentale du microbiote intestinal et cutané récemment. Notre peau est couverte de microbes (bactéries, levures) qui par la place écologique qu'elles occupent nous protègent de microbes pathogènes qui peuvent difficilement s'installer dans de telles communautés compétitivement dominantes. Le microbiote intestinal peut, lui, fonctionner de deux manières. Chez les ruminants, l'herbe avalée et ruminée dans une poche gastrique (le rumen) remplie d'une communauté de bactéries et de protozoaires, qui se nourrissent de la cellulose végétale et d'autres substances végétales assimilables pour eux (mais pas pour la vache). Cette prédigestion donne des éléments simples, assimilables par le ruminant mais surtout multiplie les microbes eux-mêmes qui sont détruits dans l'estomac de la vache par une dizaine de sortes de lysozymes. Ils constituent alors la part de la nourriture la plus importante que la vache peut assimiler. Sous des apparences d'herbivore, la vache est en réalité un microphage ! Chez d'autres mammifères le microbiote du tube digestif est seulement intestinal. Chez l'homme il pèse environ 2 kg et compte plusieurs dizaines de milliers d'espèces de bactéries et de levures. Il ne sert pas directement à la digestion primaire des aliments, qui commence dans l'estomac, mais son absence est mortelle. Son rôle commence seulement à être éclairci. Il sert de barrière aux pathogènes qui peuvent difficilement s'y développer (toujours cette résistance de la communauté), il fabrique des vitamines assimilables, les lactobacilles convertissent les protéines du lait en acide lactique, et toutes produisent des antigènes qui stimulent le système immunitaire de l'hôte. Le microbiote est également technologique : l'usage des bactéries et des levures est central dans la production des nourritures prédigérées qui ont permis l'expansion démographique de l'humanité : transformation du lait en fromage, yaourt, kéfir ; des céréales en pain, alcool (plus sûr que l'eau douce à des époques anciennes où elle n'était pas purifiée) ; conservation de la viande, etc. Mais cette utilisation des microbes comme symbiotes de préparation d'aliments, n'est dans son principe ni très différente de celle des fourmis champignonnistes, ou de la plante mycorhizée dans sa rhizosphère. Qu'il s'agisse de plante ou d'animaux, les relations symbiotiques avec le monde microbien sont primordiales, et là encore, si elles diffèrent dans certains détails, la coupure ne passe pas par une dualité plante/animal ou plante/homme. Les relations restent fondées sur des principes analogues, voire communs.

En conclusion, d'un point de vue écologique, la dichotomie phylogénique finalement tardive plante – animal, ne se résume qu'à quelques plugins différentiels, notamment le chloroplaste et la paroi pour l'essentiel, et à des détails moléculaires qu'on peut juger secondaires. L'écologue verra plutôt l'animal, hétérotrophe, comme un « parasite » obligatoire, à peine visible en biomasse relative, de la plante maîtresse de la fonction autotrophe. Parasite direct pour les consommateurs primaires (les herbivores, par exemple), par transitivité pour les autres consommateurs des niveaux trophique supérieurs (mangeurs d'herbivores et mangeurs de mangeurs d'herbivores, etc.). Si maintenant on essaie de situer une dichotomie homme – plante dans ce cadre, on touche vite une comparaison oiseuse. Cette humanité « un pour dix mille de la biomasse totale », s'accroche ici pathétiquement à l'orgueil de désirer une singularité et une importance factice, face à un monde symbiotique, à près

de 100% végétal et microbien, dont elle est l'épsilon symbiotique fonctionnellement non indispensable. La biosphère peut se passer de l'humanité : elle l'a fait pendant les 99.99% de la durée de son histoire, *Homo sapiens* n'y ayant participé que très récemment pendant les derniers 300 000 ans. L'Anthropocène, malheureusement, pourrait aussi et finalement être la période qui se débarrassera de cette forme vivante, virale et pathogène pour l'écosystème-terre si elle continue, au prétexte de PIB et de rêve de croissance sans limite, à ignorer sa nature symbiotique par essence, et la contingence de sa relation symbiotique au reste de la biosphère. La seule différence qui mérite d'être mentionnée, séparant l'humanité du reste des formes vivantes est le plugin de la conscience et de la transmission culturelle intergénérationnelle. Encore s'agit-il d'une affaire de degré, en l'occurrence, puisqu'on a la preuve, comme mentionné plus haut, que ce type de conscience et de transmission est déjà partagé sous des formes plus simples avec un certain nombre d'autres espèces animales. Reste donc à prouver sur le long terme que ce plugin qui a émergé récemment et nous donne conscience, entre autres, de notre propre finitude individuelle et le pouvoir de détruire les écosystèmes dont nous sommes parties, est un avantage évolutif. Qui vivra verra...

Remerciements à Sarah Carvallo, Adrien Giraudoux, Arnaud Macé, Jean-Philippe Macchioni, Michel Magny qui, par leur amicale relecture du manuscrit, ont contribué à son amélioration.