



MARC-ANDRÉ
SELOSSE

JAMAIS SEUL

**Ces microbes qui construisent
les plantes, les animaux
et les civilisations**

postface de Francis Hallé

ACTES SUD

LE POINT DE VUE DES ÉDITEURS

Au fil d'un récit foisonnant d'exemples et plein d'esprit, Marc-André Selosse nous conte une véritable révolution scientifique. Les microbes jouent un rôle en tout point essentiel : tous les organismes vivants, végétaux ou animaux, dépendent intimement de microbes qui contribuent à leur nutrition, leur développement, leur immunité ou même leur comportement. Toujours pris dans un réseau d'interactions microbiennes, ces organismes ne sont donc... jamais seuls.

Détaillant d'abord de nombreuses symbioses qui associent microbes et plantes, Marc-André Selosse explore les propriétés nouvelles qui émergent et modifient le fonctionnement de chaque partenaire. Il décrypte ensuite les extraordinaires adaptations symbiotiques des animaux, qu'ils soient terrestres ou sous-marins. Il décrit nos propres compagnons microbiens – le microbiote humain – et leurs contributions, omniprésentes et parfois inattendues. Enfin, il démontre le rôle des symbioses microbiennes au niveau des écosystèmes, de l'évolution de la vie, du climat, et des pratiques culturelles et alimentaires qui ont forgé les civilisations.

Destiné à tous les publics, cet ouvrage constitue une mine d'informations pour les naturalistes, les enseignants, les médecins et pharmaciens, les agriculteurs, les amis des animaux et, plus généralement, tous les curieux du vivant. À l'issue de ce périple dans le monde microbien, le lecteur, émerveillé, ne pourra plus porter le même regard sur notre monde.

MARC-ANDRÉ SELOSSE

Professeur au Muséum national d'histoire naturelle et à l'université de Gdańsk (Pologne), Marc-André Selosse enseigne également dans d'autres universités en France et à l'étranger. Ses recherches portent sur les associations à bénéfices mutuels (symbioses) impliquant des champignons, et ses enseignements, sur les microbes, l'écologie et l'évolution. Il est éditeur de revues scientifiques internationales ainsi que d'Espèces, une revue de vulgarisation dédiée aux sciences naturelles. Il est aussi passionné de diffusion des connaissances scientifiques au travers de conférences, de documentaires et d'articles.

DU MÊME AUTEUR

LA SYMBIOSE. STRUCTURES ET FONCTIONS, RÔLE ÉCOLOGIQUE ET ÉVOLUTIF, Vuibert, 2000.

Illustration de couverture : © Getty Images, 2017

© ACTES SUD, 2017
ISBN 978-2-330-08455-4

MARC-ANDRÉ SELOSSE

JAMAIS SEUL

Ces microbes qui construisent
les plantes, les animaux et les civilisations

Postface de Francis Hallé

ACTES SUD

*Cet essai,
à Alicja, qui colorie le monde,
à mes parents, qui me l'ont offert,
et à tous ceux qui aiment à le comprendre.*

INTRODUCTION

PRÉLUDE TARDIF : SYMBIOSE ET MUTUALISME – ET SURTOUT DES MICROBES

Où l'on pêche de nuit ; où les lichens sont atteints de schizophrénie ; où émergent deux concepts tardifs en histoire des sciences ; où la triste réputation des microbes devient injuste. Et comment s'enchaîneront les pages qui suivent.

UNE PÊCHE NOCTURNE ACCOMPAGNÉE

Notre cheminement commence dans les îles du Pacifique, de nuit. La Lune illumine le bord de mer, et l'onde, qui est claire, laisse passer la lumière. On devine le fond.

Un petit calmar, *Euprymna scolopes*, chasse à la lueur lunaire. La pénombre propice lui permet d'échapper à ses propres prédateurs... Mais il lui faut quand même un peu de lumière pour entrevoir ses proies. Et du coup, vue de dessous, sa chasse tourne au problème : en effet, ses proies ou ses prédateurs, lorsqu'ils sont situés plus en profondeur, peuvent facilement repérer l'animal à cause de l'ombre projetée. Or, la nuit, le calmar luit faiblement par en dessous, compensant ainsi son ombre ! Le jour, en revanche, il reste inactif et caché, et son ventre est devenu terne. Ce calmar abrite en fait des bactéries luminescentes, des *Aliivibrio fischeri*, qui colonisent de petites glandes où elles sont nourries par l'animal. Ce sont ces bactéries qui, la nuit, transforment une partie de leur énergie cellulaire en lumière. Lorsqu'elles vivent libres dans l'eau, elles se protègent ainsi de leurs propres prédateurs, des microbes un peu plus gros qui flottent avec elles : leur luminescence attire de petits crustacés qui consomment ces microbes. Les ennemis de leurs ennemis deviennent alors leurs alliés ! Ces bactéries ne luisent

cependant que lorsqu'elles se trouvent en population dense, car luire isolément ne servirait de rien : seule une forte densité émet assez de lumière pour attirer les crustacés. Dans la nuit, en grand nombre dans les glandes du calmar, les bactéries produisent de la lumière. À l'aube, le calmar expulse 95 % de ses bactéries, histoire de ne pas nourrir des bouches inutiles. Celles qui demeurent, esseulées, cessent de luire, faute d'une densité suffisante. Mais dans la journée, elles se multiplient lentement et, le soir venu, la concentration aidant, la production de lumière recommence : *fiat lux*, jusqu'au matin suivant.

Ainsi émerge le phénomène que décrit cet ouvrage : dans sa pêche nocturne, le calmar n'est pas seul ; c'est aidé de bactéries qu'il peut se nourrir et qu'il est protégé. Ce sont elles qui lui apportent la lumière... Jamais seul, il est notre premier exemple de cet accompagnement microbien qui, nous allons le voir, façonne les êtres vivants. Mais revenons aux bactéries lumineuses, qui n'accompagnent pas que les calmars.

De nombreux poissons des milieux profonds et obscurs ont recours à la lumière produite par des bactéries des genres *Aliivibrio* et *Photobacterium*. Ils les abritent dans des poches internes, parfois bordées d'un feuillet réfléchissant, voire même escamotables à volonté, et qui ont des fonctions différentes selon les espèces. Certains poissons se dissimulent passivement de leurs prédateurs cachés en profondeur, comme les calmars précédents. D'autres en font des leurres brillants qui attirent... leurs propres proies ! Certains aussi les utilisent en véritables phares pour éclairer leur chasse. Plus folâtres, quelques espèces attirent leurs partenaires sexuels avec ces poches lumineuses : la fréquence d'ocultation par une membrane opaque, ou des particularités de la disposition des poches sur le corps assurent une reconnaissance très spécifique des partenaires de chaque espèce ; ces signaux lumineux permettent aux animaux de profondeur de trouver l'âme sœur dans l'ombre. Enfin, certains poissons, poursuivis par un prédateur, relâchent brutalement leurs bactéries en un halo lumineux qui distrait ou éblouit le poursuivant. Parfois, ce halo est rendu poisseux par un mucilage et il marque ainsi durablement l'assaillant, ce qui attire alors ses propres prédateurs – en une autre histoire d'ennemis des ennemis... L'évolution des animaux marins, surtout en eaux profondes, a donc joué à l'envi avec les bactéries lumineuses, donnant à qui sait les abriter la capacité de

fabriquer de la lumière – un peu comme pour nous l’application “lampe torche” de notre téléphone portable.

Anecdotes que ces multiples animaux accompagnés et rendus brillants par des bactéries? C’est l’apparence où s’arrêtent trop de narrations. Tant du côté bactérien que du côté animal, une telle association lumineuse est souvent apparue au cours de l’évolution. En fait, ce type d’association n’est qu’un cas banal où le monde microbien est instrumentalisé par de plus gros organismes.

Cet ouvrage décrit comment les animaux, mais aussi les plantes, sont intimement construits par les microbes qui les habitent, et les aident à accomplir des fonctions variées et souvent vitales – et donc comment les plus gros organismes ne sont jamais seuls, mais fourmillent de microbes utiles.

L’INCLASSABLE NATURE DES LICHENS

Commençons par un peu d’histoire des sciences, et campons le décor conceptuel de cet ouvrage : un décor qui émerge tardivement, au XIX^e siècle... avec des lichens.

Écorce d’arbre, piquet, rocher exposé, toiture : en toutes conditions hostiles, des lichens poussent à même le support ingrat, entre couleur verte et tonalités plus pâles ou orangées. En croûte, en feuille rampante, ou même en arbuscule dressé ou pendant, leur forme suggère un organisme à part entière – *le* lichen, en un mot. Depuis l’Antiquité, leur place était incertaine. Ils sont verts et donc végétaux, mais on ne savait s’il fallait plutôt les rattacher aux algues, aux mousses, ou aux plantes. D’un autre côté, les lichens forment des spores d’une façon identique à celle de champignons du groupe de la truffe et de la morille, ce qui suggère une autre position possible dans la classification. Problème irritant, mais enfin, *un* lichen doit bien avoir *sa* place dans la classification ?

Un botaniste suisse, Simon Schwendener (1829-1919), proposa une réponse en forme de révolution. Il avait observé, comme d’autres, une dualité de structures sous le microscope : le lichen mélange des filaments translucides, qui rappellent les filaments végétatifs des champignons, ce qu’on nomme des hyphes, et de petites cellules rondes et vertes. Ces dernières étaient alors créditées d’un rôle dans

la reproduction (d'où leur ancien nom de gonidies, du grec *gonos*, semence). Mais Schwendener proposa lors d'une conférence en 1867 une autre interprétation : les lichens ne seraient en réalité que l'association d'algues capables de photosynthèse (les cellules vertes) et d'un champignon les enchâssant dans une structure formant le lichen. Le compte rendu de son intervention indique que "la conception du conférencier est que le lichen ne doit pas être vu comme un organisme autonome, mais comme un champignon connecté à des algues". Le "schwendenérisme", comme on l'appela alors ironiquement, fut d'abord critiqué et tourné en dérision, notamment par l'un des plus grands lichénologues du XIX^e siècle, le Finlandais William Nylander (1822-1899), qui décrivit plus de 3 000 espèces de lichens sans croire un instant à une théorie aussi farfelue!

Et pourtant... d'autres reprennent bientôt cette idée. Parmi eux, le botaniste russe Andreï Famintsyne (1835-1918) sera le premier à isoler et cultiver séparément les algues des lichens au laboratoire. Au début du XX^e siècle, un autre botaniste, le Français Gaston Bonnier (1853-1922), bien connu pour ses ouvrages de botanique qui servent encore à identifier les plantes françaises, réalisa la re-synthèse de lichens : il reforma des lichens en partant de champignons et d'algues, d'abord cultivés séparément, puis remis en culture conjointe. Aujourd'hui, le "nom du lichen" est en fait celui du champignon. L'algue en a un autre, même s'il est souvent peu ou pas connu car nous avons hérité du passé l'habitude de penser le lichen au travers d'un nom unique, même si celui-ci n'est maintenant plus que celui du champignon. Cette controverse historique sur la nature des lichens, à présent conclue à l'avantage de Schwendener, montre que, contre toute idée établie alors, des organismes microscopiques peuvent réaliser ensemble une structure visible à l'œil nu, dotée de sa forme propre, où ils vivent ensemble, jamais seuls.

Cet ouvrage décrit comment très souvent, comme dans le cas des lichens, des microbes se cachent derrière ce que nous voyons comme des organismes "autonomes".

LA SYMBIOSE, AU SENS LARGE :
VIVRE ENSEMBLE

Cette controverse sur les lichens a fait émerger le concept de la vie conjointe d'espèces distinctes. Le premier à le formaliser est un biologiste allemand, Albert Frank (1839-1900), qui propose le terme de *Symbiotismus* dans un article de 1877 pour désigner l'association de l'algue et du champignon dans le lichen. En 1879, le mot prend son envol sous sa forme actuelle de "symbiose" grâce à Anton de Bary (qui ne cite d'ailleurs pas son compatriote Frank... alors qu'il n'y a sans doute pas qu'une coïncidence entre ces deux mots!). De Bary (1831-1888) est un très grand microbiologiste allemand, un peu injustement ignoré des Français : c'est sans doute une séquelle lointaine de la haine franco-allemande qui régna jusqu'à la fin de la Seconde Guerre mondiale, chacun ignorant ou niant vainement la valeur du voisin. De Bary est auréolé du prestige de ses précédentes découvertes, comme la démonstration que le mildiou de la pomme de terre est une maladie due à un champignon. Lors d'une conférence à la réunion de 1878 des naturalistes allemands (à Strasbourg, alors allemande et où de Bary enseigne), il prononce une conférence sur *Le Phénomène de la symbiose (Die Erscheinung der Symbiose)*. Il en publie le texte en 1879, en allemand puis en français dans la *Revue internationale des sciences*, reprenant plusieurs exemples dont celui des lichens. Il y définit la symbiose comme "la vie ensemble d'organismes de noms [donc d'espèces] différent[e]s", conformément à l'étymologie, du grec *sun*, avec, et *bios*, vie. Les partenaires de ce vivre-ensemble sont appelés des "symbiontes".

Cette définition désigne une coexistence durable entre espèces, durant tout ou partie de la vie des symbiontes, quels que soient les échanges entre eux. De Bary et Schwendener considéraient d'ailleurs que les algues étaient probablement parasitées par le champignon au sein des lichens ; de Bary écrit que "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". En ce premier sens, qui ne sera pas celui retenu dans cet ouvrage, la symbiose est une coexistence, quel qu'en soit l'effet, positif ou négatif, sur les partenaires.

Cet ouvrage décrit comment très souvent les organismes vivent en symbiose.

LE MUTUALISME : VIVRE EN BONS TERMES

Pourtant, il n'y a pas que du parasitisme dans la coexistence, en particulier chez les lichens ! Allons sur une côte rocheuse bretonne, et observons-y un petit lichen qui vit dans la zone de balancement des marées : le lichen pygmée (*Lichina pygmaea*). Il forme des tapis ras, de 1 centimètre d'épaisseur, sur les rochers soumis à la rage des vagues. Ici, ce sont des bactéries photosynthétiques, des *Calothrix* du groupe des Cyanobactéries, qui sont associées au champignon. D'ailleurs, ces *Calothrix* vivent aussi à l'état libre aux alentours, formant de petits groupes retenus dans un gel commun, en pustules sombres de 0,5 à 2 centimètres de diamètre. Mais elles se trouvent dans des endroits plus abrités du courant et souvent moins élevés que le lichen, car elles exigent moins de courant et plus d'immersion à marée haute. De plus, on ne les voit pas en hiver : *Calothrix* survit alors sous forme de petites cellules d'attente, bourrées de réserves, qui résistent au froid et aux tempêtes hivernales au fond de l'eau, attendant des conditions meilleures, tandis que les lichens, pérennes, sont, eux... toujours là. Protégée par le champignon, la cyanobactérie colonise activement d'autres milieux et d'autres saisons : le bénéfique ne fait aucun doute.

On considère aujourd'hui que, dans la majorité des cas, l'algue des lichens profite de la présence du champignon, qui la protège et lui apporte l'eau (en milieu terrestre), des sels minéraux et des gaz. Réciproquement, le champignon y gagne aussi, en se nourrissant d'une portion de la photosynthèse de l'algue. Il y a donc bien entraide (et nous reparlerons de l'entraide lichénique au chapitre III). Une famille d'algues vertes très fréquente dans les lichens, les Trébouxiacées, n'a même jamais été trouvée seule dans le milieu, à l'état libre : pour elle qui ne vit que dans les lichens, le bénéfique ne fait aucun doute !

Certaines interactions peuvent donc être réciproquement bénéfiques. Dans un ouvrage paru en 1875, *Les Commensaux et les parasites dans le règne animal*, le zoologue belge Pierre-Joseph Van Beneden (1809-1894) s'intéresse aux conséquences des interactions

entre espèces animales. Comme le titre l'indique, il décrit les cas de parasitisme (où une espèce en exploite une autre) et de commensalisme (où une espèce en utilise une autre, à laquelle cela ne fait ni chaud, ni froid). Mais il souligne qu'il y a d'autres façons de coexister : "On voit des animaux qui se rendent mutuellement des services. Il serait peu flatteur de les qualifier tous de parasites ou de commensaux. Nous croyons être plus juste à leur égard en les appelant mutualistes." De Bary avait, lui, pris ses exemples de symbioses dans le monde végétal au sens large, et il renvoyait d'ailleurs au livre de Van Beneden pour les exemples animaux.

Ce concept de mutualisme connaît un succès rapide, car les exemples ne manquent pas. Ainsi, les insectes pollinisateurs qui butinent les fleurs : leur va-et-vient de fleur en fleur déplace le pollen, permet la fécondation et annonce les fruits ; cependant ils se nourrissent de nectar ou d'une partie du pollen. On le voit, certains mutualismes, comme la pollinisation, impliquent des partenaires qui n'interagissent que transitoirement ; mais d'autres, comme les lichens, sont réellement symbiotiques. De là, mutualisme et symbiose vont, dans les textes français, bientôt tisser des liens étroits... jusqu'à fusionner en une seconde définition de la symbiose. Alors qu'en anglais, *symbiosis* désigne souvent encore toute coexistence, quel qu'en soit l'effet sur les partenaires, comme au sens initial de de Bary, "symbiose" a pris en français un second sens, plus restrictif aux cas de mutualisme (un sens d'ailleurs de plus en plus souvent utilisé en anglais). Ce sera le nôtre, dans cet ouvrage où nous restreindrons la symbiose aux cas où la coexistence a des effets réciproquement bénéfiques, autrement dit aux cas de mutualisme où les deux partenaires vivent ensemble.

Cet ouvrage décrit comment très souvent les organismes vivent en symbiose au sens francophone, c'est-à-dire en mutualisme.

PRÉLUDE TARDIF, ET CHANTIER OUVERT CHEZ LES MICROBES

Symbiose et mutualisme, qui forment le prélude de cet ouvrage, apparaissent donc tardivement dans l'histoire des sciences, à la fin du XIX^e siècle. Tardivement, car les interactions réciproquement

nuisibles sont, *a contrario*, déjà connues depuis longtemps à cause de leurs effets souvent déplorables : on connaît le parasitisme, qui implique des microbes comme des champignons ou les bactéries pathogènes de l'homme ; la prédation en représente un cas extrême où l'un des protagonistes est rapidement tué ; la compétition est partout, cette interaction où des individus utilisant les mêmes ressources se nuisent réciproquement, simplement en essayant chacun de survivre. D'ailleurs, ces interactions nuisibles sont à la base de la sélection naturelle, proposée par Charles Darwin (1809-1882) dans son ouvrage *On the Origin of Species (L'Origine des espèces)* de 1859 : "Chaque espèce, même là où elle abonde, souffre constamment d'énormes destructions, à certains moments, de ses ennemis ou de ses compétiteurs pour la nourriture ou l'espace", et "la sélection naturelle agit par compétition". Survivent et se reproduisent ceux qui se tirent le mieux de ces interactions-là.

L'apparition tardive des notions de symbiose et de mutualisme est tout particulièrement vraie dans le monde microbien. Au cours du XIX^e siècle, les microbes avaient surtout été envisagés au travers de leurs effets négatifs. De Bary a montré en 1861 que les champignons peuvent causer des maladies comme le mildiou de la pomme de terre ; Louis Pasteur (1822-1895), son *alter ego* français, travaille sur les microbes comme agents de la décomposition (il démontre la nature microbienne de la fermentation alcoolique, et de ses accidents comme le virage au vinaigre) ou de la maladie. Pasteur rivalise sur ce second terrain avec le médecin allemand Robert Koch (1843-1910) qui démontre l'origine bactérienne de la maladie du charbon, puis de la tuberculose. Tous ces travaux jettent des lueurs détestables sur le monde microscopique, et valent au mot de "microbe" d'être injustement connoté d'une nuance exclusivement négative que cet ouvrage rejette, bien sûr.

Arrêtons-nous un instant sur le mot de "microbe" lui-même, créé par le médecin militaire Charles-Emmanuel Sédillot (1804-1883) en 1878, à partir de *micro* (petit) et de *bios* (vie) : petit organisme vivant... quoi de plus neutre et descriptif? Rien de négatif en soi! Sauf que le mot s'est très vite connoté... Peut-être le lecteur se demande-t-il pourquoi, dès lors, j'utilise ce terme aux connotations négatives, alors que je souhaite redorer le blason microbien? Oh, j'aurais bien pu utiliser "microorganisme", en effet, un peu plus long, plus technique et donc moins connoté – un mot d'ailleurs

forgé deux ans avant “microbe”, avec une étymologie voisine, par le journaliste et rédacteur du *Journal officiel* Henri de Parville (1838-1909). Mais ce que faisant, je me cacherais derrière un mot aux allures techniques, sans affronter le cœur du problème : les connotations négatives du mot “microbe” portent moins sur le terme que sur ces organismes eux-mêmes. Et ce livre n’est pas écrit pour se cacher derrière les mots, mais bel et bien pour renouveler et neutraliser une vision archaïque des microbes. J’utiliserai “microbes” au cours de cet ouvrage, avec l’espoir qu’arrivé à la conclusion, le lecteur les verra autrement, même sous ce nom.

Le rôle mutualiste des microbes reste donc peu envisagé à la fin du XIX^e siècle, à quelques exceptions près, comme les lichens (et encore, pas aux yeux de tous les chercheurs). Pourtant, c’est à leurs côtés qu’il faut chercher des symbioses. En effet, la plupart des espèces vivantes sont microbiennes : la réelle diversité, à la fois des espèces et des modes de vie, est microscopique. Nos salles de travaux pratiques annoncent tacitement ce programme, où la première chose qu’on voit sont des loupes et des microscopes. Le monde est fait de plus petits que nous et comme ils dominent partout, si l’on veut évaluer le statut et l’importance exacte de la symbiose, c’est chez les microbes qu’il faut l’évaluer.

Cependant, l’idée que les plantes et les animaux reposent (et pas seulement anecdotiquement) sur des symbioses avec des microbes n’émergera que lentement... Plus tardivement encore, donc, que les notions de symbiose et de mutualisme ! Au-delà des travaux de fondateurs peu écoutés, c’est dans la seconde moitié du XX^e siècle, ces vingt dernières années surtout, que notre vision des microbes évolue : alors seulement leur rôle symbiotique apparaît pleinement à tous, révélant que les organismes qui nous entourent ne sont, en fait, jamais seuls, mais peuplés de microbes.

Cet ouvrage décrit comment très souvent les organismes vivent en symbiose, c’est-à-dire en mutualisme, et que ceci implique la plupart du temps des microbes.

DANS LES PAGES QUI SUIVENT...

... nous allons donc étudier l'omniprésence des microbes favorables aux plantes et aux animaux, qui ne vivent jamais seuls. Si ces symbioses microbiennes ont émergé tardivement dans la biologie moderne, comme nous le reverrons par des dates plus précises, elles envahissent aujourd'hui notre vision du vivant. Par "microbes", nous entendons ici plusieurs groupes d'organismes, divers par leurs origines, leurs biologies et leurs formes, mais tous semblables par leur petite taille qui, en les rendant invisibles, nous mène trop souvent encore à négliger leur présence.

Qui sont plus exactement les microbes? Les champignons, d'abord : bien sûr, ils fabriquent parfois leurs spores dans de grosses structures visibles à l'œil nu, celles que nous ramassons en forêt, particulièrement à l'automne. Mais ce sont des microbes quand même! D'abord, même les champignons qui édifient de telles structures vivent, la majorité du temps, à l'état de fins filaments invisibles à l'œil nu, les hyphes, d'un diamètre d'un centième de millimètre. Ensuite, la plupart des espèces forment leurs spores plus discrètement, de façon invisible (entre autres, les moisissures qui couvrent les fromages, ou les levures, qui sont des champignons unicellulaires). Il y a aussi, plus petites et plus nombreuses que les champignons, avec leur millième de millimètre, les bactéries, aux cellules isolées ou parfois réunies en petits chapelets. Il en existe deux grands groupes : les Archées et les Eubactéries – celles que nous aborderons ici appartiendront toutes aux Eubactéries, et nous les appellerons plus simplement "bactéries". Il y a aussi tous ces microbes non bactériens qui appartiennent au grand groupe des Eucaryotes (cet ensemble qui comporte aussi les champignons, les animaux et les plantes, et dont nous reparlerons au chapitre ix), et qui sont quant à eux constitués d'une seule cellule, 10 à 100 fois plus grosse que celle des bactéries. Certains se nourrissent de matière organique ou d'autres cellules : ce sont les protozoaires, qui appartiennent à des groupes très divers, comme les paramécies, les flagellés ou les amibes. D'autres sont photosynthétiques : ce sont les algues unicellulaires qui peuplent les eaux douces et marines, mais qui vivent aussi sur terre, où certaines prennent par exemple part aux lichens.

Enfin, il nous arrivera de parler de plus petits encore : les virus, qui n'ont pas de cellule mais empruntent celles des autres pour se multiplier. On les classe parfois hors des microbes, parce qu'ils ne possèdent pas de cellule justement, mais ils sont petits et contribuent invisiblement à diverses symbioses, aussi les mentionnerons-nous chaque fois que nécessaire. Nous aborderons même, ici ou là, des symbioses avec de très petits animaux, peu ou à peine visibles à l'œil nu : de petits vers appelés nématodes, ou encore certains petits acariens. En effet, bien que ce ne soient pas non plus des microbes, ils forment aussi des symbioses et des interactions invisibles au premier abord, mais très importantes pour leurs partenaires – nous les élèverons au rang de “microbes honoraires” pour la cause de ce livre.

Dans cet ouvrage, nous montrerons successivement les trames microbiennes des plantes, puis des animaux, dont l'homme, avant d'aborder les manifestations des symbioses microbiennes à de plus grandes échelles, évolutives, écologiques et culturelles.

Les trois premiers chapitres envisageront, en décrivant la base microbienne des plantes, comment une symbiose se définit et se construit. Nous verrons successivement les échanges nutritifs, les protections contre les agressions du milieu, le rôle développemental, et enfin les propriétés nouvelles émergeant dans l'association, qui modifient le fonctionnement des organismes et parfois aussi celui des écosystèmes.

Puis trois chapitres approcheront l'angle animal des symbioses microbiennes : d'abord au travers de la digestion de l'herbe par les vertébrés comme la vache, puis grâce à d'extraordinaires adaptations symbiotiques à des milieux marins eux aussi peu ordinaires, et enfin dans les adaptations des insectes à leurs niches écologiques si variées.

Et l'homme ne fait pas exception ! Il nous faudra deux chapitres, et le recours à quelques expériences sur des rongeurs, pour décrire nos compagnons microbiens et leurs rôles, omniprésents et parfois inattendus.

Une fois arrivés à ce stade, un chapitre abordera une découverte majeure de la biologie moderne qui met encore plus de microbes dans l'animal et la plante : leurs cellules (dont les nôtres) sont elles-mêmes intimement faites de microbes qui en sont devenus des composants vitaux, pour la respiration ou la photosynthèse ! La symbiose microbienne atteindra alors le cœur même de la plante et de l'animal.

Deux chapitres successifs envisageront alors deux questions écologiques et évolutives liées aux symbioses microbiennes. D'abord, quels mécanismes assurent la permanence, de génération en génération, des symbioses microbiennes? Ensuite, nous montrerons cette passerelle étonnante où les maladies des uns... se retrouvent amies des autres, et façonnent les populations, les écosystèmes, et même certains groupes humains!

Nous terminerons notre périple en revenant à l'honnête homme du *xxi*^e siècle, pour découvrir en deux chapitres finaux ces symbioses microbiennes qui peuplent notre quotidien d'une façon trop souvent ignorée, autour de notre alimentation surtout – une présence microbienne qui, nous le verrons, est héritée d'un passé où elle a permis de construire nos civilisations agricoles.

Le contenu de chaque chapitre est annoncé sous son titre en un style libre, et son objectif plus précis est libellé à la fin de sa première section. À l'issue de chaque chapitre, nous essaierons de dégager les idées majeures acquises dans une section "Pour conclure...". Le lecteur qui, dans un chapitre, s'ennuierait d'exemples ou d'organismes qu'il n'aime pas est invité à consulter simplement ces conclusions, afin de pouvoir poursuivre directement au chapitre suivant. En effet, même s'ils contribuent à une progression vers les conclusions finales, chacun des chapitres est conçu d'une façon largement indépendante des autres. L'ouvrage évite enfin, autant que possible, les termes jargonneux et il n'exige pas de connaissances biologiques fines du lecteur : mais comme les biologistes n'échappent guère au jargon, un glossaire en fin d'ouvrage aide celui qui hésiterait sur certains mots.

L'ouvrage est également un périple dans le monde vivant, visible ou non, connu ou pas ; c'est aussi un cheminement dans l'histoire des sciences... À son issue, l'invisible aura pris le pouvoir et les organismes, les habitudes quotidiennes et les processus écologiques qui nous entourent seront en grande partie devenus des constructions microbiennes. On aura donné, du moins l'espère-t-on, un sens biologique à bien des observations ou des faits connus de chacun, un sens bien sûr microbien. Et l'on espère que ces interactions entre espèces, tout comme les fonctions des microbes, auront étonné le lecteur par leur diversité et leur subtilité, autant qu'elles fascinent l'auteur lui-même.

Car cet ouvrage veut avant tout s'émerveiller des richesses du monde microbien et des interactions entre les êtres vivants. Laissez-vous à présent conter ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations, et leur offrent de n'être jamais seuls...

