



Professeur du Muséum national d'Histoire naturelle, **Marc-André Selosse** enseigne dans plusieurs 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 et d'**Espèces**, une revue de vulgarisation dédiée aux sciences naturelles. Il est aussi très actif dans ce domaine par des conférences, vidéos, documentaires et articles.

Nous savons aujourd'hui que les microbes ne doivent plus seulement être associés aux maladies ou à la décomposition.

Au contraire, ils jouent un rôle en tous points 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.

Au fil d'un récit foisonnant d'exemples et plein d'esprit, Marc-André Selosse nous conte cette véritable révolution scientifique.

Détaillant d'abord de nombreuses symbioses qui associent microbes et plantes, il explore les propriétés nouvelles qui en 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, 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** écrit de façon précise, dense, sans mot inutile, refusant le jargon, dans un style élégant et plein d'humour (...). Cet ouvrage a un mérite supplémentaire, assez rare pour qu'il importe de le signaler : il ne contient jamais rien d'ennuyeux. » **Francis Hallé**, extrait de la postface

**Quelques citations pour donner envie de lire...**

Page 170: Retrouver et rasséréner notre lien aux microbes est un enjeu pour les générations à venir, surtout pour nous Occidentaux, car c'est là que gisent les espoirs d'amélioration de notre santé.

Page 192: On est encore loin de provoquer le bonheur, ou de comprendre les mécanismes de ces observations, mais, tout comme nos hormones, notre microbiote influence nos performances, notre état d'esprit et notre perception du monde.

Page 195: La plupart de nos fonctions sont influencées par nos microbes: nutrition, immunité bien sûr, mais aussi développement, comportements, voire sociabilité...

Page 196: Nous sommes donc en grande partie construits par un écosystème microbien.

Notre physiologie résulte de mécanismes écologiques qui se déroulent en son sein : successions de colonisation chez l'enfant, compétitions en tous moments et notamment lors de diarrhée, perturbations écologiques après une antibiothérapie ou un changement d'alimentation, par exemple en voyage....

### **Et plus...**

Page 52 : La plante ajoute donc à ses propres défenses (épines, revêtements épais, toxines...) celles de ses symbiotes.

Page 66 : Il y a comme un paradoxe à découvrir que les microbes, autrefois chargés de pouvoirs pathogènes, et de tous les maux, sont vitalement actifs au cœur de la santé et du bon développement végétal.

Page 71 : Les microbes ajoutent leurs propriétés à celles des plantes pour leur permettre un fonctionnement normal : nous avons surtout envisagé un monde de symbiose "à l'auberge espagnole" où chacun apporte des capacités préexistantes...

Les symbioses font émerger de nouvelles propriétés, d'abord aux niveaux physiologique et morphologique, au travers de l'exemple de la fixation de l'azote. Ceci débouchera sur une vision intégrée de l'organisme comme le produit non seulement de son génome, mais aussi de ses symbioses et de leur émergence.

Page 78 : Phénotype étendu et holobionte actent la fin de la croyance illusoire que les organismes existent de façon autonome.

Page 88 : Pour conclure notre parcours végétal nous avons vu qu'un organisme "peut" et "est" plus de choses que son seul génome ne le permet (ou ne le promet). Ses symbioses lui confèrent un phénotype étendu ; il faut parfois considérer plus l'holobionte, l'organisme adjoint de ses partenaires microbiens, que l'organisme seul, qui est une abstraction sans réalité écologique ni physiologique. Une plante n'est jamais seule, et cette présence microbienne s'inscrit dans sa forme, son fonctionnement et ses effets écologiques.

Page 92 : Le même processus se produit dans notre organisme, dont la plupart des cellules (de peau, du sang, etc.) meurent sans descendance tandis que nos cellules sexuelles produisent les descendants de tous le groupe de cellules génétiquement identiques que nous représentons.

Page 94 : La rumination, c'est donc l'art d'élever les microbes, et de préparer ce qui sera le vrai repas de l'animal.

Page 97 : Le cheptel bovin est responsable du tiers des émissions de méthane liées aux activités humaines, et contribue à 5 % de l'effet de serre induit par l'homme. De plus, ce méthane est également une perte pour le métabolisme de la vache : aussi cherche-t-on actuellement à en limiter la production par une alimentation adaptée, par exemple plus riche en céréales et en protéagineux.

Page 105 : L'herbivore est rarement seul. Le microbiote digestif a un rôle majeur chez les vertébrés herbivores en leur permettant de digérer les molécules complexes des plantes, et en complétant leur alimentation, notamment en azote et en vitamines variées.

Page 105 : L'évolution convergente ne se manifeste pas que dans la symbiose (on sait par exemple que les plantes grasses adaptées à la sécheresse appartiennent à des groupes très différents), mais les symbioses sont nettement sujettes à l'évolution convergente...

Page 106 : Les symbioses restent parce qu'elles sont adaptées grâce à la sélection qui trie, avec une forme de déterminisme, dans le fatras des possibles que le hasard des mutations propose... Ce que nous observons ne doit secondairement plus rien au hasard, il est retouché par la sélection qui n'est, elle, pas aléatoire. L'existence d'un nombre limité de stratégies adaptées entraîne l'évolution de façon récurrente, convergente en un mot, de mécanismes et de structures semblables - comme par exemple, les types de symbioses qui nous intéressent.

Page 112 : La symbiose corallienne construit donc vraiment l'écosystème corallien, non seulement en lui apportant de la nourriture mais aussi en constituant sa structure physique ! Ce qui n'est pas sans rappeler le rôle de l'arbre en forêt... On qualifie "d'*architectes*" de telles espèces qui structurent le milieu d'une façon que d'autres espèces utilisent ensuite comme habitat.

Page 147 : Les insectes ne sont jamais seuls : ils sont accompagnés individuellement, du tube digestif jusque dans l'intérieur de leurs cellules, voire en groupe, dans le cas où une société d'insectes cultive des champignons ou échange des caecotrophes. Cette compagnie microbienne augmente leurs possibilités à la façon dont un plugin étend celles d'un logiciel.

Page 147 : Je ne serais pas étonné que le microbiote spécifique à chaque insecte, entre endosymbioses, tégument et tube digestif, nous prédise 3 à 4 fois plus d'espèces de bactéries symbiontes d'insectes que d'insectes !

Bien plus, on pense que ces symbiontes peuvent aider directement à la diversification des espèces. Insectes et microbes s'adaptent en effet les uns aux autres ; or, cette coévolution peut suivre des trajets et des modalités différents dans des populations distinctes d'une même espèce d'insecte. Tant et si bien que, finalement, les individus de deux populations peuvent devenir incapables de se croiser, car les hybrides, qui ne possèdent pas tous les gènes de chacun de leurs parents, ne sont bien adaptés à aucun des symbiontes que ceux-ci leur ont transmis !

Page 154 : Le microbiote de la main (jusqu'à 10 millions de cellules bactériennes par centimètre carré et plus de 150 espèces par main) est très variable, comme le révèle une étude réalisée sur des étudiants américains : la main dominante a une diversité microbienne différente de l'autre, ce qui reflète des contacts différents avec l'environnement.

Page 159 : Mais le gros du microbiote, dont nous ne sommes au fond que l'enveloppe protectrice, est contenu dans l'intestin : avec plus de 4000 espèces connues au total (près d'un demi-millier dans chaque individu), c'est 1 à 1,5 kg de bactéries et de levures par personne qui sont logées, chauffées et nourries par nous. Plus le bol alimentaire progresse dans l'intestin, plus il est colonisé, tant et si bien qu'à la fin, les microbes représentent 60 % du volume des selles (soit 100 milliards de bactéries par gramme).

Page 160 : Premièrement, les espèces proches évolutivement ont souvent des microbiotes voisins, et nous-mêmes sommes “microbiotement” proches des chimpanzés, des bonobos et des gorilles. Mais, alors qu’entre ces espèces, les différences de microbiote sont proportionnelles au temps écoulé depuis leurs ancêtres communs, témoignant d'un rythme d'évolution semblable entre elles, les différences se sont accumulées beaucoup plus vite chez l'homme.

Page 160 : Les Yanomani, des chasseurs-cueilleurs vénézuéliens non exposés à la civilisation globalisée, sans contact avec d'autres groupes depuis 11 000 ans, ont un microbiote intestinal d'une diversité sans égal connu ; seuls leurs cavités buccales présentent une diversité semblable à celle des Européens.

Page 161 : Une comparaison entre 20 personnes à révélé que chacune possède 80 % des espèces bactériennes en propre. La composition du microbiote intestinal est finalement une partie de l'identité, et elle est plutôt stable, ne variant que lentement.

Page 168 : ...Un individu de taille moyenne possède de l'ordre de 10 000 milliards de bactéries dans son intestin, et 1 000 milliards sur la peau ; l'ensemble des bactéries des autres cavités du corps avoisinerait plutôt 100 milliards. On ne compte pas ici les levures, en nombre moindre. Cet individu possède lui-même 10 000 milliards de cellules en comptant les globules rouges (qui sont des cellules particulières, car plus petites que les autres et dépourvues d'ADN très nombreuses et qui représente 85 % de nos cellules).

Page 169 : On connaît plus de 10 000 espèces de microbes capables d'habiter notre corps. Cette diversité a été fortement touchée par les habitudes culturelles occidentales qui font de chacun de nous une île très isolée de son voisinage et du milieu. Notre hygiénisme nous a protégés des maladies en nous éloignant des mécanismes naturels de colonisation et de développement du microbiote.

Page 169 : On voit émerger la possibilité de cultiver notre microbiote comme un jardin : on y sème les graines des espèces souhaitées (ce sont les probiotiques) et on y apporte amendements et engrais qui favorisent le développement de ces espèces (ce sont les prébiotiques).

Page 170 : Retrouver et rasséréner notre lien aux microbes est un enjeu pour les générations à venir, surtout pour nous Occidentaux, car c'est là que gisent les espoirs d'amélioration de notre santé. Si vous avez éprouvé un dégoût excessif à lire les lignes qui précèdent, interrogez-vous sur la négation ou le rejet d'une partie de vous-même : c'est très culturel. ...Chez l'homme, le paroxysme, le microbiote qui structure le plus fortement la physiologie, est sans doute celui de l'intestin.

Page 179 : Environnement et terrain génétique modifie le microbiote, et de fait leurs transplantations ont souvent un effet limité dans le temps. En d'autres termes, nous ne sommes pas totalement pilotés, mais il y a interaction réciproque et “notre” physiologie se construit comme une émergence symbiotique.

Page 191 : L'abondante communication du microbiote intestinal avec le système nerveux central, que l'on appelle axe cérébro-intestinal, passe donc à la fois par voie chimique et par voie nerveuse chez les souris...

Page 192 : On est encore loin de provoquer le bonheur, ou de comprendre les mécanismes de ces observations, mais, tout comme nos hormones, notre microbiote influence nos performances, notre état d'esprit et notre perception du monde.

Page 195 : Le degré exact de manipulation de l'homme par son microbiote reste à évaluer, mais des indices sont déjà là.

Page 195 : La plupart de nos fonctions sont influencées par nos microbes : nutrition, immunité bien sûr, mais aussi développement, comportements, voire sociabilité...

Page 195 : Pouvons-nous, d'ailleurs, encore écrire « nous et nos microbes », quand ils sont tellement... nous-mêmes ? Et qui parle, quand "je" dis « je » ?

Page 196 : De là, influençant à distance tout l'organisme, les microbiotes en modifient jusqu'au développement et à la reproduction. Tous les grands organismes, plantes et animaux, cachent une forêt de microbes au pouvoir desquels ils ne sont que des marionnettes...

Le microbiote non plus ne l'est pas (autonome), qui serait bien en peine de se nourrir et de se protéger seul... L'influence est réciproque, car nous choisissons et ne trions nos microbes, chacun selon nos spécificités génétiques, nos comportements (alimentaires notamment) et notre culture ; nous les abritons et nous les nourrissons... Il faut envisager l'interaction symétriquement, comme une symbiose dont chacun dépend et que chacun construit. Pour l'homme, le microbiote représente une formidable boîte à outils pour s'adapter à son milieu : les invités de notre microbiote totalisent 100 fois plus de gènes que notre propre génome. Ils peuvent donc considérablement modifier notre fonctionnement et les propriétés du *consortium* que nous formons avec eux..

Page 196 : Nous sommes donc en grande partie construits par un écosystème microbien. Notre physiologie résulte de mécanismes écologiques qui se déroulent en son sein : successions de colonisation chez l'enfant, compétitions en tous moments et notamment lors de diarrhée, perturbations écologiques après une antibiothérapie ou un changement d'alimentation, par exemple en voyage....

Page 197 : L'écologie n'est désormais plus subordonnée à la biologie des organismes, et, comme la poule et l'œuf, ces disciplines se sous-tendent réciproquement. Il est donc grand d'initier les plus jeunes à l'écologie aussi !

Des bactéries soigneront peut-être demain non seulement les problèmes digestifs, inflammatoires, microbiens ou allergiques, mais aussi nos humeurs, voire notre sociabilité.

Page 197 : Tolérer une saleté propre fait écho à cet arbitrage délicat de nos entrailles qui tous les jours trient, en matière de microbes, le bon grain de l'ivraie, à coups d'acidité stomacale, de mucus intestinal, de sels biliaires, de conflits inter-microbiens...

Parmi les gestes quotidiens qui trient, figurent le choix des aliments (dont les fibres et un degré de stérilisation modéré), une certaine liberté laissée à l'enfant de flirter avec la saleté, l'utilisation raisonnée du nettoyage et de l'antibiothérapie.

Page 207 : La théorie de l'origine endosymbiotique des *Eucaryotes* ajoute un point d'orgue à l'importance de la symbiose dans la constitution des organismes et dans l'évolution. La présence de bactéries au tréfonds de nous-mêmes a de quoi fasciner.

Page 211 : Beaucoup de gènes nécessaires à la vie libre ne sont plus requis dans la cellule.

Page 212 : Ces saccules, comme les mitochondries et les plastes dont ils dérivent, ne se forment jamais *de novo* : ils se divisent pour former des descendants. Donc ces saccules sont une forme de vie extrêmement régressée. Ce que ces zombies génétiques nous rappellent, c'est que nous n'héritons pas que de l'ADN des générations précédentes : la membrane qui limite les cellules fait aussi partie de cet héritage. Chaque génération cellulaire augmente la surface de cette membrane en y ajoutant des constituants, jusqu'à ce qu'il y en ait assez pour que la cellule puisse se diviser en deux.

Page 215 : Aujourd'hui, on peut voir la cellule eucaryote comme une chimère, non seulement parce qu'elle contient des bactéries endosymbiotiques, mais aussi plus intimement : la symbiose a fait du génome du noyau lui-même un mélange génétique, et elle mélange partout des protéines d'origines diverses.

Page 220 : Les *Eucaryotes*, dont nous sommes, ne sont jamais seuls : ils ont acquis leurs principaux métabolismes énergétiques de bactéries qu'ils ont emballées dans leurs cellules et qui sont devenues héréditaires...

La respiration des *Eucaryotes* leur a été insufflée par les mitochondries, très précocement (sans doute dans leurs ancêtres communs) ; puis certains groupes ont secondairement appris la photosynthèse avec un plaste. Un ami à moi dit joliment que les plantes sont « des aquariums à cyanobactéries », en pensant aux plastes ; quant à nous, nous sommes des lotissements aménagés pour nos mitochondries.

Page 221 : Ceci nous rappelle qu'en évolution, rien n'est irréversible ; aucune loi n'exige que la complexité aille en croissant : des régressions existent aussi, il n'y a pas de sens unique en évolution.

...Nous sommes, les plantes sont, les animaux sont des symbioses, par essence cellulaires !

...Un jour, mes ancêtres ont été une bactérie et un proto-eucaryote indépendants, puis un jour suivant il furent en symbiose, et maintenant celle-ci est devenue si étroite que je ne discerne plus, raisonnablement, qu'une seule espèce : l'homme.

...Ensuite, par le mécanisme : on transcende la compétition et la prédation qui structurent la vision darwinienne ; ici les espèces coopèrent, et le mutualisme est l'acteur de l'évolution.

Page 231 : Changer de partenaire, en symbiose est en effet une opportunité de s'adapter à de nouvelles conditions.

Page 232 : Une littérature du début du XXe siècle porte l'idée, explicitement opposée au *darwinisme*, que la coopération vaut mieux que la compétition ou la spoliation, et peut s'instaurer spontanément.

Page 243 : Au total, ni optimum ni équilibre dans la symbiose en dépit des apparences : la symbiose est une des façons de bricoler la survie dans un monde où rien n'est parfait.

Chaque partenaire influence donc l'évolution de l'autre, quelque soit la direction prise, que la transmission se fasse par héritage ou par réacquisition : la coévolution fait rage dans la symbiose.

Page 246 : Le trop-plein de ressources joue à l'inverse : la faim rassemble, tandis que l'abondance disloque la symbiose.

Page 247 : Bien des variétés de céréales sélectionnées récemment ne répondent plus positivement à la présence de glomérormycètes mycorhiziens, même en sols peu riches.

...Ainsi, le milieu de vie riche pour lequel les variétés agricoles modernes ont été sélectionnées les a conduites à la perte du savoir-faire ancestral en matière de marché biologique et de choix du partenaire.

...En conséquence, les plantes dépendent encore plus des engrais apportés par l'homme... Qui abolissent encore davantage l'interaction mycorhizienne... C'est une spirale de dépendance aux pesticides et aux interventions agricoles que nous avons engagée.

Page 248 : Il va sans dire qu'on peut néanmoins espérer limiter un jour l'utilisation et les effets indésirables des intrants industriels en recréant des systèmes symbiotiques basés sur l'exploitation de sols pauvres, renouant en cela avec 400 millions d'années d'histoire végétale. Mais il faudra encore quelques années de recherche, et sans doute re-sélectionner, à partir de variétés anciennes ou sauvages, quelques nouvelles variétés cultivées !

Page 248 : Notre étude du "*comment n'être jamais seul*" révèle deux modalités extrêmes de permanence de la symbiose au cours des générations successives : la fidélité continue ou des ré-acquisitions répétées. Hériter les symbioses des parents est le plus sûr. L'autre modalité est la ré-acquisition par la génération suivante de symbiotes nouveaux à partir du milieu environnant où ceux-ci vivent libres ou portés par d'autres adultes que les parents.

Page 249 : Ces mécanismes portent la marque d'une dynamique évolutive où chaque partenaire influence la sélection naturelle de l'autre : la coévolution. C'est elle qui fait que les partenaires tricheurs sont exclus dans les mécanismes d'héritage...

...Ainsi, les interactions biologiques forcent donc à évoluer, même lorsque l'environnement physique ne change pas. Or, l'évolution des organismes qui nous entourent est plus continue et rapide que celle de notre environnement physique : les interactions biologiques sont donc des accélérateurs de l'évolution. On le comprend souvent à propos des parasites, auxquels il faut s'adapter en permanence, mais les mutualistes sont aussi une source de pression de sélection (ne fût-ce que par ce qu'ils peuvent en permanence évoluer en parasites par tricherie).

Page 250 : Ainsi toutes les espèces évoluent-elles à cause des autres ; la coévolution n'est pas seulement un mécanisme impliqué dans l'optimisation des symbioses, c'est aussi leur voie permanente vers la survie.

Page 254 : Et lorsqu'on ajoute les quatre souches simultanément, le résultat est encore différent, imprédictible à partir des inoculations séparées ! Bref, la balance compétitive n'est pas identique selon les champignons du sol ; ceux-ci contribuent à définir qui réussit et à quel niveau, et donc à quoi ressemble la communauté végétale.

Page 255 : Ensuite, un effet en miroir existe aussi : les plantes présentes renforcent ou défavorisent certains champignons. Finalement, une communauté végétale établie à un endroit reflète une communauté microbienne, et vice versa.

Page 261 : Dominée par des mutualistes (parfois) ou des pathogènes (souvent), la rétroaction microbienne du sol façonne donc partout les communautés végétales.

Ainsi, le cerisier noir, connu pour une forte rétroaction négative dans son ère américaine d'origine, où les individus sont distants de plus de 30 m, est devenu une plante envahissante qui pousse très serré chez nous...

Page 262 : A l'échelle de l'écosystème, l'effet Janzen-Connell et les microbes qui le constituent, bâtissent la mosaïque spatiale des communautés de plantes et contribue à définir l'abondance des espèces et la biodiversité résultante.

Page 264 : Chaque espèce tend donc à accumuler des pathogènes dans le sol, qui lui sont propres et qui lui survivent (sous forme d'attente, spores ou kystes par exemple), annihilant pour elle l'effet d'une fertilité pourtant accrue.

Page 273 : Dans le fonctionnement des écosystèmes, interactions négatives et favorables se côtoient donc étroitement. Les symbioses ont part là encore des conséquences écologiques, que ce soit directement par le mutualisme, ou en contribuant indirectement à des interactions négatives, en auxiliaires de la compétition, du parasitisme ou de la prédation.

Page 274 : De ces exemples, ressort la contribution des microbes à des processus écologiques qui, à l'œil nu, ne semble pourtant impliquer que des organismes macroscopiques : derrière ce que nous voyons de la nature travaille en fait des microbes (et des animaux minuscules), en une conspiration minime qui organise le visible sans en faire partie.

Page 291 : Certains microbes se sont adaptés à cette niche fromagère qui n'existait pas avant l'homme : ceux qui sont inoculés perdent souvent la capacité à se propager seuls, nous l'avons vu pour les pénicilliums, et tous, inoculés ou spontanés, s'adaptent aux conditions particulières du fromage.

Page 292 : Les préparations d'aliments fermentés, que nous venons de détailler, ne vont jamais seules. Elles sont accompagnées, dans l'ombre, de microbiotes plus ou moins variées selon les cas, choisis plutôt que je subis, grâce aux gestes du préparateur.

...Cela démontre l'immanence du monde microbien, que nos ancêtres avait déjà croisé en pratique. Car nous avons bel et bien domestiqué des microbes avant de les avoir même nommés !

Page 293 : Des microbes ont bel et bien été domestiqués : bactéries du yaourt, pénicilliums inoculés sur les fromages, levures inoculées à la bière ou au vin...

À côté de ceux qui ont été domestiqués, d'autres microbes sont simplement invités le temps d'une fermentation, avant de s'en repartir, pour quelques temps ou à jamais, vivre sauvages dans l'environnement : c'est le cas des ferments des *Gueuses* et des *Lambics* bruxellois, ou des vins d'autrefois...

...Les symbioses de l'homme avec les microbes alimentaires vont de rencontres opportunistes à des alliances étroites et durables, domestiquées celles-là. Il s'ensuit alors une dépendance complète de ces microbes à l'homme, à la façon dont autres microbes deviennent dépendants d'insectes.

Page 294 : En particulier, ces traditions fermentaires nous montrent que nos cultures (nos savoirs transmissibles) retrouvent souvent des chemins déjà parcourus par le monde strictement biologique... Ce sont des points par lesquels notre évolution culturelle elle-même avoue qu'elle est une forme de l'évolution biologique au sens large. Il est intéressant de noter l'ambivalence des liens entre microbes fermentaires et culture.

Page 295 : Notre interaction avec les microbes fermentaires est un mutualisme, réciproquement bénéfique car nous nourrissons, voire protégeons, ces microbes qui préparent notre nourriture. Bien sûr, quelques-uns sont dévorés au passage, comme cela se produit aussi, par exemple, dans le rumen.

Page 298 : De plus, la sédentarité qui accompagne le passage à l'état agricole augmente les risques de contaminations fécales, car l'homme vit alors en permanence aux abords de ses déchets. En témoignent les épidémies de dysenterie dans l'histoire ancienne, voire récente dans certains pays.

Page 305 : Ainsi, diversification de l'alimentation, sélection sur les plantes domestiquées, voire même évolution humaine : tout conspire à nous faire oublier qu'autrefois, les grands produits (céréale, chou, olive, lait...) qui ont formé la base de nos civilisations agricoles nous été accessibles... non pas seuls, mais grâce à des microbes !



Page 313 : On n'évite pas les microbes délétères en évitant tous les microbes (stérilisation), on les évite les affaiblissant sous le joug d'un microbiote complexe où, même présents, il se développent peu. L'agroalimentaire commence à peine la ré-exploration de cette piste, parcourue déjà par nos ancêtres. ... Le lien culturel de l'homme aux microbes ne s'est pas distendu. Mais, nous l'ignorons trop souvent à présent, à la hauteur de notre ignorance croissante des procédés de fabrication des matériaux et des aliments qui nous entourent.

Page 315 : Premièrement, tous les grands organismes que nos yeux voient, mais aussi les populations, les communautés et même les civilisations, sont habités de multiples microbes qui contribuent à leur fonctionnement. Nous avons fait mentir l'idée reçue que la plante ou l'animal, dont l'homme, sont des entités autonomes. Deuxièmement, cette présence microbienne n'est pas une mauvaise nouvelle : les exemples qui précèdent nuancent l'image d'un monde d'interactions négatives, où domineraient compétition, parasitisme et prédation, en particulier quand il s'agit de microbes.

Page 317 : Bien plus, aujourd'hui, on reconstitue l'arbre évolutif des plantes en comparant les gènes de leur plastes et celui des animaux en comparant les gènes de leurs mitochondries : liés depuis des lustres aux organismes qui les abritent, plastes et mitochondries révèlent l'histoire de l'entité commune.

Page 318 : Un seul gramme de sol héberge plus de 1 milliard de cellules bactériennes, issues de plus de 1 million d'espèces différentes ; on n'y compte aussi pas moins de un à cent milliers d'espèces de champignons...

Une eau océanique de surface compte dans chaque millilitre (un cinquième de cuillère à café) de 10 000 à 1 million de bactéries et les algues unicellulaires (moins nombreuses, mais souvent plus grosses) y dépassent couramment le millier. Ainsi, les eaux qui nous entourent sont-elles plus plutôt un brouet clair de microbes... qui représentent 90 % de la biomasse marine totale !

Page 319 : Avec un ancêtre commun deux à trois fois plus ancien que celui des *Eucaryotes*, les bactéries ont eu plus de temps pour explorer l'espace des possibles biologiques, et pour produire des descendants bien plus diversifiés...

Page 320 : La symbiose est l'un des moyens d'acquérir de nouvelles propriétés, même si ce n'est pas le seul, mais il assure souvent l'acquisition des propriétés les plus complexes. En matière d'évolution culturelle aussi, l'innovation se fait avec ou sans microbes, mais le plus souvent avec eux quand les fonctions acquises sont complexes.

Page 320 : Adopter un symbiote microbien est donc un mécanisme évolutif rendu possible par la petite taille, la multiplicité, et la diversité fonctionnelle des microbes.

Page 321 : Le monde est une foire aux microbes, et dans cette offre surabondante, facilement embarquée et qualitativement variée, des rencontres ont très souvent permis aux animaux ou aux plantes d'acquérir leurs propriétés auprès de petits partenaires, surtout les propriétés très complexes.

Page 324 : Vivre ensemble ouvre la porte à la perte de l'autonomie, et les symbiotes se rendent bientôt de nouveaux services de leurs ancêtres n'eussent pas exigés. Ces liens scellent davantage encore l'interaction, et l'interdépendance croissante est un autre aspect de la coévolution entre symbiote.

Page 325 : Les liens étroits unissant les microbes à leurs hôtes s'expliquent donc de façon double : à la fois par l'acquisition de fonctions microbiennes au cours de l'évolution, et par une coévolution régressive créant progressivement une dépendance accrue.

Page 326 : En sciences, nous ne pouvons pas discuter de l'essence des choses, mais nous en proposons des représentations qui nous permettent de manipuler le monde, de donner des explications, de faire des prédictions ou de préconiser des actions.

...Nos représentations ne sont ni vraies ni fausses ; elles sont juste plus ou moins pratiques, plus ou moins génératrices de compréhensions nouvelles – en un mot, plus ou moins heuristiques. J'ai moi-même utilisé le mot "*organisme*" lorsque cela me permettait de désigner certains aspects du réel. Néanmoins, je pense qu'on doit à présent *aussi* voir au-delà des organismes.

... Aujourd'hui, c'est une approche désuète que de se borner à conserver, en l'élargissant, la notion d'organismes.

En voici d'autres visions: celle du microbiologiste « *un océan de microbes* ».

...Cette première vision d'un monde essentiellement microbien renvoie la notion d'organisme animal ou végétal à notre impuissance à nous affranchir du monde macroscopique où nous vivons.

(Page 327) La seconde vision est celle de l'écologue « *un océan d'interactions* ». Chaque "*organisme*" (c'est vrai aussi de chaque microbe) est un nœud dans un colossal réseau d'interactions. ... Croire que le monde est fait d'organismes, c'est croire qu'une toile d'araignée est faite de points où se croisent les fils : c'est négliger... les fils eux-mêmes !

Page 328 : Où s'arrête le phénotype étendu d'une plante donnée, dès lors qu'elle échange parfois avec ses voisines, par le réseau mycorhizien, des nutriments et parfois des signaux ; et que celles-ci en font, à leur tour, autant avec leur propres voisines ?

... Et d'ailleurs, insectes pollinisateurs et champignons mycorhiziens sont reliés en un réseau unique par les plantes qu'ils partagent !

Page 329 : Plutôt que des organismes dans le monde, nous avons vu un monde de microbes tout en interactions... Où nos vies sont un complot du minime, et où le visible est l'écume des interactions microbiennes.

...Or, ces dernières années ont révélé que l'écologie du monde microbien bricole les fonctions de la peau, de la bouche, du tube digestif, de la feuille, de la fleur, de la racine... Et que, sans compréhension des mécanismes écologiques structurant les interactions, il n'est pas de biologie des organismes moderne. Nos pères ont fait erreur : écologie et physiologie sont interdépendantes : il est grand temps d'initier les plus jeunes à l'écologie aussi !

Page 330 ...Montrer les microbes au cœur de la santé et des fonctions biologiques, alors que le XIXe siècle les avait découverts dans la maladie et comme agents de décomposition...

Cette longue tendance qui nous prive de plus en plus d'une place privilégiée dans le monde se poursuit avec l'émergence actuelle de notre contexture microbienne ! Elle fait de nous (et des organismes que nous voyons) l'écume visible d'un monde microbien structurant et omniprésent.

Page 331 : Mais il nous faut renverser l'image trop exclusivement négative des microbes : nos usages alimentaires quotidiens des microbes en constituent une preuve patente, actée antérieurement à la notion même de microbe !

... Toutes les lignes de cet ouvrage nous crient que la gestion des écosystèmes et des ressources naturelles, alimentaires surtout, passent par les microbes aussi.

Page 332 : Il nous faut donc retrouver notre lien et notre coexistence avec les microbes, que nous avons perdus. Ils faisaient partie de notre animalité, et nous en avons historiquement construit nos civilisations et nos cultures.

... Bien sûr, l'asepsie a été mère de la médecine moderne ; bien sûr nous avons gagné en éliminant les pathogènes, nul doute à cela ! Mais, n'en avons-nous pas trop fait ? Nous avons permis le développement de maladies annexes, comme l'allergie ou l'obésité...

... Aujourd'hui, notre espoir de progrès se trouve dans la réintroduction d'un juste équilibre, d'une juste portion de microbes qui, dans nos corps, dans notre alimentation et dans notre environnement, rendra encore plus sûr le monde microbien.

... Demain, il nous faudra savoir quels microbes souhaiter (la saleté), dont la présence vaut mieux que l'absence, et qui sont donc plus "propres" à nous aider. Aujourd'hui, probiotiques et prébiotiques esquissent les premiers pas sur une piste qu'hier (et avant-hier) de nombreuses fermentations alimentaires avaient parcourue.

Page 334 : Finalement, je suis *un écosystème microbien*, riche de la diversité qui l'habite, et numériquement bactérien.

La maladie et le pourrissement sont bien microbiens, mais ils ne sont qu'un état exceptionnel : le chef-d'œuvre quotidien de la vie animale et de la vie végétale est cousu de microbes symbiotiques en chaque instant, en chaque organe, en chaque fonction. Ainsi, moi-même et tous ceux qui m'entourent sommes-nous construits comme des émanations de l'invisible qui est en nous, toujours et partout, en vertu de quoi "*nous ne sommes jamais seuls*".

*Page 340: «Pour ne pas être seul, il faut avoir un compagnon appartenant à la même espèce zoologique que soi, et cela est vrai pour les animaux comme pour les humains.» Francis Hallé*