

« Un océan de microbes et d'interactions »

Jamais seul,

Marc-André Selosse, professeur au Muséum national d'Histoire naturelle de Paris, raconte «**ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations**»...

Il nous propose un nouveau récit de la Vie.

Une vie où les microbes occupent tous les espaces, tous les écosystèmes...

Une vie où les relations, les coopérations, les confrontations, les complémentarités, les associations, les symbioses... dessinent de nouveaux paysages, de nouveaux messages qui placent l'Homme et notre humanité dans un contexte, des environnements, des dynamiques invitant à une nouvelle pensée de l'écologie...

A repenser notre "être"... "Soi" dans ses environnements...

Cet éditorial très spécial - long mais le sujet est primordial - est construit avec des mots, des phrases entières de MA. Selosse.

*Il a pour but de souligner **un ouvrage majeur** qui ouvre de nouvelles perspectives, et appelle de nouvelles responsabilités...*

« 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.

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

Nous sommes, en grande partie, construits par un écosystème microbien.

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...

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.

> **Les microbes ajoutent leurs propriétés** à celles des plantes pour leur permettre un fonctionnement normal : 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 débouche sur une vision intégrée de l'organisme comme le produit non seulement de son génome, mais aussi de ses symbioses et de leur émergence.

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.

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.

La symbiose corallienne construit 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.

> **Les insectes ne sont jamais seuls** : ils sont accompagnés individuellement, du tube digestif jusques à 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.

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 !

> **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.

> **Nous sommes** 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....

Le gros du microbiote, dont nous ne sommes au fond que l'enveloppe protectrice, est contenu dans l'intestin : avec plus de 4 000 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).

Une comparaison entre 20 personnes a 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.

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.

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).

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.

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).

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

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...

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 n'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..

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

> **Les Eucaryotes**, dont nous sommes, **ne sont jamais seuls** : ils ont acquis leurs principaux métabolismes énergétiques de bactéries qu'ils ont emballés 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.

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.

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.

> **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.

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.

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 ré-acquisition : la coévolution fait rage dans la symbiose.

> **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.

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

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.

Vivre ensemble ouvre la porte à la perte de l'autonomie, et les symbiotes se rendent bientôt de nouveaux services que 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.

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.

> **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.

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 !

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).

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.

> **Dans le fonctionnement des écosystèmes**, interactions négatives et favorables se côtoient donc étroitement. Les symbioses ont 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.

Derrière ce que nous voyons de la nature travaillent en fait des microbes (et des animaux minuscules), en une conspiration minime qui organise le visible sans en faire partie.

> **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.

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.

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.

> **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. 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.

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 !

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...

> **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.

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 !

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 !

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 modernes. Nos pères ont fait erreur : écologie et physiologie sont interdépendantes : il est grand temps d'initier les plus jeunes à l'écologie aussi !

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.

> **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.

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, 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.

Finalement, **je suis un écosystème microbien**, riche de la diversité qui l'habite...

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**". »

"Jamais seul", MA. Selosse : une œuvre à lire absolument... écrite de façon précise, dense, dans un style élégant et plein d'humour...