Entretien avec le biologiste Marc-André Selosse[1]
réalisé par Bernard Paillard et Monique Peyrière

Sous terre : bactéries et champignons en action

Bernard Paillard et Monique Peyrière. Lors d'une récente conférence, vous avez souligné que, pendant longtemps, les sciences ont négligé d'étudier les organismes vivant dans le sol, notamment les microbes. Pourquoi un tel désintérêt ?

Marc-André Selosse. Il a fallu du temps pour lever certains obstacles à la compréhension de ce qui se passe dans le sol. D'abord, parce que, celui-ci n'étant pas translucide, on ne voit pas ce qu'il y a dedans. Ensuite, si on prend de la terre dans la main, on ne voit pas les populations qui l'habitent, car il est surtout peuplé de microbes. Par ailleurs des raisons plus culturelles font qu'on s'en détourne, parce qu'il est sale, et peut-être aussi parce que c'est là qu'on enterre les morts, d'où une espèce de répulsion culturelle par rapport au sol. Ces trois obstacles épistémologiques nous empêchent de voir un point majeur : le sol est l'écosystème terrestre. Il y a dans le sol plus d'espèces, parfois plus de biomasse et toujours plus de métabolismes, qu'il n'y en a en surface, où nos yeux voient animaux et végétaux. Ce qu'on oublie trop facilement. Un exemple de cette ignorance, c'est l'arbre tel qu'il est communément représenté dans des dessins : d'abord une espèce de base avec des amorces de racines, puis un tronc, enfin des branches et des feuilles. Ce dessin un peu enfantin nie le fait qu'un tiers de sa biomasse, comme celle des plantes d'ailleurs, est souterraine. La raison de cette occultation est simple : lorsqu'on arrache une plante ou lorsque le vent abat un arbre, seules les grosses racines viennent, en partie cassées. Les autres, les racines fines, qui forment l'essentiel de la biomasse souterraine, restent en place. Finalement le sol est épistémologiquement maudit, son étude et celle des microbes qu'il contient commencent donc très mal. Pour la science un très long chemin fut nécessaire pour arriver à comprendre ce qu'est vraiment le sol, un programme en plein développement.

325812RXK_COMMUNICATIONS_NO_105_CS6_PC.indd 199 29/05/2019 08:23:44

Bernard Paillard et Monique Peyrière. Pourtant la présence de micro-organismes dans le sol fut mise en évidence dès le XIX^e^ siècle, tandis que la microbiologie du sol se développait dès le tournant du siècle.

Marc-André Selosse. En effet, les travaux de Louis Pasteur sur la maladie du charbon ont mis en évidence l'existence de microbes dans la terre. Présents dans les cadavres enterrés d'animaux atteints par cette pathologie, ces germes, remontés vers la surface par les vers de terre, contaminaient de nouveaux bestiaux. Cependant, il ne suffit pas d'avoir repéré quelque chose pour que cela devienne un paradigme dominant. Un problème similaire s'est posé lorsque Lorenz Hiltner[2] a introduit en 1904 le terme de rhizosphère[3], avec l'idée qu'il y avait des microbes particuliers et singulièrement abondants autour de la racine des plantes. Cette vision, bien que connue, n'est alors prise en réelle considération que par quelques initiés. De même, l'idée que deux organismes vivent ensemble en une association réciproquement bénéfique, en symbiose[4] donc, émerge dans les années 1880. Mais, là encore, malgré des travaux continus dans les décennies suivantes, ce n'est qu'un siècle plus tard que ces associations deviennent un fait majeur. On est confronté à un problème épistémologique similaire à celui qui conduit à négliger le sol et ses microbes, car tout autant que la symbiose, ce sont des facteurs du fonctionnement ordinaire auquel tout le monde est habitué. Et cela se remarque moins que le parasitisme, la compétition ou la prédation, dont on voit immédiatement les effets. Les premiers travaux démontrant que des microbes vivent dans le sol, qu'ils façonnent le fonctionnement de la racine comme les communautés microbiennes elles-mêmes, sont sans doute arrivés trop en avance pour les mentalités de l'époque. Quoi qu'il en soit, c'est devenu, aujourd'hui, une idée structurante, une idée paradigmatique : les végétaux[5] entretiennent avec les microbes, notamment du sol, des relations autres que pathologiques, et c'est là l'important, la nouveauté.

Bernard Paillard et Monique Peyrière. L'exploration de ces domaines n'est-elle pas redevable de découvertes scientifiques plus générales qui ont, en retour, transformé l'approche du sol par les biologistes ?

Marc-André Selosse. Cela est juste dans le domaine de la symbiose, comme dans celui de la microbiologie du sol, car les chercheurs ont bénéficié de la mise au point et de l'essor des méthodes moléculaires, dont celles relatives à l'ADN. Un renouvellement majeur qui, par exemple, permet de détecter les micro-organismes par leur ADN. On s'est aperçu que la méthode traditionnelle de mise en culture n'avait décelé qu'au grand maximum 5 % des microbes du sol, et en particulier ceux entrant en relation symbiotique avec les plantes. Les sols ont révélé une diversité de microbes à laquelle on ne

325812RXK_COMMUNICATIONS_NO_105_CS6_PC.indd 200 29/05/2019 08:23:44

s'attendait pas. Comme on arrive désormais à identifier certains de leurs gènes, on peut aussi, indirectement, deviner leur métabolisme, la façon dont ils vivent. Donc, si, au départ il y a eu un certain « retard à l'allumage », l'arrivée de ces nouvelles méthodes nous autorise, aujourd'hui, à revisiter des anciens concepts, en leur donnant des bases plus convaincantes et en comprenant mieux le rôle des microbes dans le fonctionnement des sols et des plantes.

Bernard Paillard et Monique Peyrière. Qu'en est-il alors de cet univers microbien souterrain ?

Marc-André Selosse. Nous avons à penser un sol envahi par des microbes. Et, ce qui s'y passe dépasse l'entendement car, de fait, les microbes dépassent l'entendement. Très petits, c'est par milliards, si ce n'est par dizaines de milliards de cellules que se chiffre leur présence dans un simple gramme de sol standard. Une démesure en quantité d'individus donc, mais pas uniquement : cela concerne également le nombre des espèces (26 % des espèces connues vivent dans le sol, contre 13 % dans l'océan par exemple !). Mais, c'est surtout la multitude de modes de vie différents qui frappe. C'est pourquoi on peut dire que l'écosystème terrestre, c'est le sol : il y a dans ces fonctionnements microbiens souterrains beaucoup plus de diversité que dans ceux que nous observons à la surface.

Au-dessus du sol, que voyons-nous ? Des organismes qui respirent ou qui font de la photosynthèse. Mais, on ne fait pas tourner les cycles de la matière avec ça ! S'ils tournent, c'est grâce à la diversité des microbes du sol et c'est là que les champignons et les bactéries interviennent. Ces dernières jouent sans doute un rôle prépondérant en raison de la grande diversité de leur métabolisme. Ainsi certaines oxydent le soufre (recyclant les formes utilisables par les plantes), d'autres, au contraire, le réduisent. Certaines oxydent l'azote, d'autres, au contraire, le réduisent ; la transformation de l'azote atmosphérique en azote minéral soluble est une affaire de bactéries qui, à partir de l'atmosphère, mettent en place un réservoir d'azote soluble utilisable par les plantes. Certaines jouent avec le fer, l'utilisent pour respirer et, du coup, l'oxydent. D'autres, au contraire, l'utilisent comme accepteur d'électrons, et le réduisent ce qui le rend accessible aux plantes. Bref, une telle démesure dans les modes de fonctionnement est étonnante et implique des métabolismes dont vous et moi n'avons pas idée, nous qui restons à la surface. La vraie diversité métabolique est donc souterraine : ce qui se produit dans le sol structure les cycles de la matière et les plantes (et, de là, les animaux) vivent des produits de ces transformations souterraines.

325812RXK_COMMUNICATIONS_NO_105_CS6_PC.indd 201 29/05/2019 08:23:44

Bernard Paillard et Monique Peyrière. Et que se passe-t-il dans les couches profondes ?

Marc-André Selosse. Comme les microbes sont très petits, ils s'installent partout, même dans les couches géologiques situées sous le sol. Pendant longtemps on a pensé qu'elles étaient, en gros, exemptes de microbes. On savait qu'il y en avait dans quelques roches un peu organiques, tels certains charbons ou certains pétroles, parce qu'ils avaient, là, de la matière organique « à manger ». Aujourd'hui, grâce à des forages particuliers, lors desquels on évite des contaminations de surface, on découvre des microbes qui vivent dans les roches jusqu'à cinq kilomètres de profondeur, parfois plus. Sans doute ces microbes ne sont-ils pas nombreux. Car, quand vous êtes au milieu d'un granit ou d'un basalte, il n'y a pas grand-chose pour se nourrir : leur croissance est très lente. Ce sont donc des populations peu denses, environ une à dix tonnes de microbes par kilomètre cube de roches. Mais des kilomètres cubes de roches sous nos pieds, il y a en beaucoup. Ainsi le volume des roches peuplées par ces microbes représente deux fois le volume de l'océan ! C'est donc un volume colossal. Et, même si la biomasse y est diluée, elle finit par être importante. On compte qu'il y a l'équivalent de deux à trois cents fois la masse humaine sous forme de microbes dans ce sous-sol.

Cette biomasse profonde est arrivée de la surface par des craquelures, par des événements de colonisation, par des circulations de fluides. Ici aussi, on observe une diversité d'espèces, de formes, de modes de vie qui renvoie à cette incroyable multiplicité des métabolismes microbiens évoquée plus haut. Car pour vivre dans ces profondeurs il faut mettre en œuvre des réactions adaptées aux conditions locales. C'est ainsi que, dans le sous-sol, on trouve un tas de combinaisons d'oxydants et de réducteurs qui permettent aux microbes de se développer. Par exemple, il existe des bactéries méthanogènes qui conduisent à la production de méthane à partir d'un mélange de gaz carbonique (CO_2) et d'hydrogène (H_2), celui-ci étant le résultat de la réaction du fer des pyroxènes[6] avec l'eau. Cette fonctionnalité nourrit un métabolisme autotrophe, c'est-à-dire capable de fabriquer sa matière organique, avec pour sous-produit, comme déchet, du méthane (CH_4). Autre exemple, cette bactérie trouvée dans les très grandes profondeurs d'une mine d'or d'Afrique du Sud, bien au-delà de deux kilomètres, et qui, pour nourrir son métabolisme méthanogène, utilise la dissociation de l'eau par le rayonnement radioactif, qui libère de l'hydrogène. La vie des bactéries dans ces milieux extrêmes est ainsi rendue possible. Évidemment, elles vont vivre lentement. On peut penser que leur temps de division est plutôt de l'ordre de l'année ou du siècle, alors que celui des bactéries vivant dans les milieux les plus riches, par exemple celles de notre tube digestif, n'excède pas vingt minutes.

325812RXK_COMMUNICATIONS_NO_105_CS6_PC.indd 202 29/05/2019 08:23:44

Bernard Paillard et Monique Peyrière. Comment ces microbes entrent-ils en relation avec les plantes ?

Marc-André Selosse. Nous revenons là aux microbes des sols. On a d'abord perçu ceux qui entraînaient des maladies chez les plantes, comme les fusarioses[7] ou les mildious[8]. Mais, de nos jours, on s'intéresse de préférence à ceux qui interfèrent avec les plantes de façon bénéfique. En particulier, les microbes sont nombreux dans la rhizosphère, car ils y trouvent beaucoup à manger ! Il y a des exsudats racinaires qui suintent, des cellules mortes, sans oublier des sécrétions actives. Certaines attirent les microbes, d'autres peuvent les repousser. Ainsi, sur certaines plantes, les acides hydroxycinnamiques[9] (en fait des phénols[10], ou tanins) ou les acides salicyliques (d'autres tanins) sécrétés filtrent l'entrée des microbes dans la rhizosphère, avec un criblage plus strict pour ceux susceptibles de pénétrer dans les racines elles-mêmes. Parmi tous ces organismes qui gravitent autour d'elles, on peut en trouver certains qui produisent des toxines pour lutter contre des pathogènes de la plante, ou d'autres qui mobilisent des éléments comme le phosphore ou bien le fer dont la plante a besoin. Finalement, tout cet ensemble joue un rôle, et les gains pour la plante sont bien plus nombreux et quotidiens que les dommages d'origine bactérienne, qui sont des accidents. En réalité, les maladies sont l'exception.

Par ailleurs, certains champignons entretiennent avec la plupart des plantes des relations dont chaque partie tire bénéfice. Ces interactions entre des champignons du sol et les racines, appelées mycorhizes, jouent une multiplicité de rôles. D'abord elles nourrissent la plante, car les champignons collectent pour elle dans le sol des sels minéraux et de l'eau, cela bien au-delà de la racine. Et pour un coût moindre : ce filament de champignon, très petit, facile à fabriquer, revient moins cher à mettre en place qu'une racine. En échange, si les champignons nourrissent la plante, eux-mêmes s'en nourrissent. Car ils y trouvent les sucres permettant leur développement. La mycorhize est donc, d'abord, un échange réciproque de nutriments. Mais, elle n'est pas que cela : pour le champignon, la plante est en quelque sorte son garde-manger. Il a donc tout intérêt à mettre en place des mécanismes pour la protéger.

Bernard Paillard et Monique Peyrière. D'ailleurs, dans l'une de vos conférences filmées accessible sur Internet, vous présentez les microbes comme des stimulateurs du système immunitaire des plantes.

Marc-André Selosse. Effectivement, ce n'est qu'après avoir croisé une première fois des microbes *via* les racines que les plantes acquièrent une immunité pleinement opérationnelle. Des champignons mycorhiziens ou des bactéries rhizosphériques, qui ne sont donc pas directement pathogènes, modifient le système immunitaire et ceci de façon diffuse dans toute la plante.

325812RXK_COMMUNICATIONS_NO_105_CS6_PC.indd 203 29/05/2019 08:23:44

Cela rend celle-ci plus apte à répondre intensément et vite aux agressions. C'est ce qu'on appelle le *priming*, terme anglo-saxon pouvant se traduire par stimulation. On l'a vérifié en infectant par des microbes pathogènes des plantes que l'ont fait pousser en laboratoire dans des sols complètement stériles, c'est-à-dire en l'absence totale de microbes ou de champignons. On remarque alors qu'elles sont moins résistantes, qu'elles attrapent, parfois, des maladies qui, d'ordinaire, ne sont pas celles de leur espèce. Cela s'explique tout simplement parce que leur système immunitaire fonctionne moins bien, et la rencontre de micro-organismes inoffensifs est vitale pour la maturation du système immunitaire. On s'était un peu interrogé là-dessus avec des collègues, car la même chose arrive aux animaux : leur système immunitaire, leur système nerveux ne se développent pleinement qu'après avoir été colonisés par des microbes au moment de la naissance. Pourquoi ? Nous avons proposé une réponse très simple : au moment où s'établit le premier contact avec le monde microbien, certains microbes sont recrutés pour signaler que doit se mettre en place l'immunité d'un organisme, dans un milieu où il ne sera plus protégé dans la graine ou dans le corps maternel. Ce déclenchement du système immunitaire est donc lié à des présences microbiennes non délétères, pas à un signal endogène ni à un processus codé par le génome interne, comme le sont beaucoup de processus embryonnaires. Cette mobilisation d'une sorte de « béquille microbienne » a été utilisée à différents moments de l'évolution des plantes et des animaux.

Bernard Paillard et Monique Peyrière. Vous insistez aussi sur l'importance des relations qui s'établissent grâce aux réseaux de champignons.

Marc-André Selosse. Comme on l'a noté plus haut, les champignons mycorhiziens, sous terre, nourrissent la plante autant qu'elles s'en nourrissent. Ils la connectent à des ensembles de filaments présents dans les sols qui constituent leur organisme, le mycélium. Les mycéliums liés à une plante peuvent très bien contacter d'autres racines, celles d'un même arbre ou d'une même plante, mais aussi de plusieurs individus de la même espèce ou d'espèces différentes, car la plupart de ces champignons ne sont pas spécifiques. Il devient alors possible d'étudier le rôle des mycorhizes dans les interactions entre végétaux (un des thèmes sur lesquels travaillent mon laboratoire du Muséum national d'histoire naturelle de Paris et celui de l'université de Gdansk en Pologne).

Ainsi, du carbone circule de plante en plante par ce réseau. Bien plus, ce réseau, pourvoyeur de flux alimentaires, semble, de surcroît, favoriser le partage de signaux d'alertes immunitaires. C'est du moins ce que paraissent montrer des expériences en pot, donc en système simplifié : il faut noter que nous n'en sommes pas encore à des expériences dans des écosystèmes réalistes. Lorsqu'une plante est attaquée, par exemple par un puceron, elle

325812RXK_COMMUNICATIONS_NO_105_CS6_PC.indd 204 29/05/2019 08:23:44

déclenche des réactions à l'aide de signaux d'alerte qui se diffusent partout en elle, allumant ses défenses pour éviter la propagation de l'attaque. Mais il y a plus : si un même champignon mycorhizien connecte la plante attaquée à d'autres plantes, ces dernières commencent aussi à mettre en place, préventivement, leurs propres défenses. Il apparaît qu'une fois les signaux arrivés aux racines de la plante attaquée, quelque chose passe par le champignon. Quoi ? On ne sait pas encore…

Citons un autre phénomène qui n'est pas souvent bien compris, alors qu'il doit être fréquent : des travaux expérimentaux montrent que, parmi ces échanges entre champignons et plantes, certains sont parfois inégalitaires. Il y a des cas où, si deux plantes vivent dans le même pot, l'une peut donner beaucoup plus au champignon que l'autre, tout en recevant moins de lui. Et, dans ces conditions, le champignon donne à une plante ce qu'il a collecté dans le sol grâce aux ressources nutritives qu'il aura prélevé sur une autre plante. Comme si l'une aidait indirectement l'autre, en l'absence de tout échange direct.

Bernard Paillard et Monique Peyrière. Comment expliquer cela ?

Marc-André Selosse. Pourquoi ce mécanisme a-t-il été sélectionné par l'évolution ? Certains le présenteraient comme de l'entraide entre plantes, d'autres comme une sorte de parasitisme d'une plante sur l'autre. En tant qu'évolutionniste et microbiologiste j'aurais tendance à envisager les choses différemment, le phénomène étant plus complexe que l'alternative supposée par cette opposition conceptuelle : peut-être faut-il chercher du côté du champignon. Cet organisme, qu'on prend souvent pour un tuyau inerte (encore une façon de ne pas reconnaître leur statut aux micro-organismes du sol), a quand même eu à défendre sa place dans l'histoire de l'évolution. Aussi, pour limiter le risque de disette en sucre au cas où une plante viendrait à lui faire défaut, il a intérêt à entretenir plusieurs sources d'approvisionnement en s'adressant à plusieurs plantes. Ainsi le champignon préserve son propre intérêt évolutif tout en forçant l'entraide entre des plantes, pourtant en compétition entre elles pour la lumière, pour les ressources du sol et pour l'espace. J'interpréterais volontiers les échanges et entraides entre plantes comme une sorte de manipulation du champignon.

Mais tout n'est pas si simple : on connaît des cas dans la nature où des plantes de sous-bois tirent un bénéfice net de ce mécanisme d'échange de carbone par le réseau mycorhizien ; c'est sur quoi nous travaillons dans mon équipe parisienne. Il s'agit de petites plantes, des orchidées ou des éricacées de la famille de la bruyère, qui partagent des champignons mycorhiziens avec des arbres forestiers de nos régions. Par ce biais, elles importent du carbone. Tant et si bien que certaines espèces sont devenues complètement non chlorophylliennes, totalement nourries par le champignon, ne vivant

325812RXK_COMMUNICATIONS_NO_105_CS6_PC.indd 205 29/05/2019 08:23:44

plus que comme cela. D'autres sont restées chlorophylliennes : mais, situées à l'ombre des arbres où leur photosynthèse n'est pas optimale, elles complètent leur alimentation en carbone par le biais du réseau. Les unes et les autres vivent donc en parasite des arbres. Ce qui prouve bien qu'un réseau actif de mycélium de champignons existe, puisque certaines plantes évoluent en s'y adaptant.

Bernard Paillard et Monique Peyrière. Ces mécanismes d'interaction entre les microbes et les plantes sont-ils anciens, voire très anciens ?

Marc-André Selosse. On le sait aujourd'hui : si les premières plantes sont sorties des eaux en se hissant sur terre, c'est grâce à des formes ancestrales de mycorhizes. En effet, apparus à partir d'algues, les organismes qui deviendront des plantes n'avaient pas de racine. Il leur a pourtant fallu exploiter les sels minéraux du substrat : ce furent des auxiliaires fongiques qui dès cette époque permirent cela. Sans eux, les plantes n'auraient pas pu sortir des eaux. Depuis lors, tout au long des millions d'années ultérieures, les plantes ont construit leur physiologie évolutive avec les mycorhizes comme avec les bactéries. Un exemple pour ces dernières : les légumineuses (comme le trèfle ou les haricots) ont acquis la capacité d'utiliser l'azote atmosphérique en s'appuyant, non sur pas des champignons, mais sur des bactéries, des *rhizobium*. Celles-ci, abritées dans des nodosités racinaires, fixent l'azote atmosphérique qui diffuse dans le sol, rendant ainsi la plante indépendante de l'azote minéral soluble. Ayant ainsi saisi une opportunité microbienne, les légumineuses ont généré une innovation évolutive, la symbiose fixatrice d'azote. Devenues autotrophes pour l'azote, autonomes en quelque sorte, elles ont connu un grand succès évolutif : c'est une famille extrêmement diversifiée sur toutes les latitudes.

On pourrait également parler de ces plantes qui vivent dans des sols très anoxiques, sans oxygène, comme ceux des vasières ou des rivages de certains lacs. L'absence d'oxygène pourrait leur poser des problèmes de respiration. Mais elles l'amènent à leurs racines à partir de la surface, grâce à des réseaux de lacunes entre les cellules de la tige. Toutefois ces sols engendrent d'autres problèmes liés à la présence d'hydrogène sulfuré (H_2S), à un excès de fer réduit, ou encore à la présence de substances qui peuvent mettre en péril la survie de la racine. Mais celle-ci a un moyen de se défendre : des bactéries, profitant de cet oxygène, se développent dans la rhizosphère en oxydant l'hydrogène sulfuré pour vivre, et neutralisent donc ces molécules toxiques. Les plantes construisent leur capacité à vivre sur les sols anoxiques, non seulement en oxygénant leurs racines, mais, de surcroît, en s'appuyant sur des microbes qui détoxifient les substances réductrices présentes dans le sol.

325812RXK_COMMUNICATIONS_NO_105_CS6_PC.indd 206 29/05/2019 08:23:44

Bernard Paillard et Monique Peyrière. Il y a donc les bactéries, les champignons, les plantes et les multiples réseaux d'interconnexions. Comment penser ensemble tout cela ?

Marc-André Selosse. Ces réseaux ont une autre conséquence importante, conceptuelle celle-là. Aujourd'hui, tout le monde s'accorde à penser que les plantes, les animaux, sont bourrés de microbes qui sont essentiels à leur fonctionnement. Dont acte, c'est vrai. On a créé le concept d'holobionte[11] pour dire qu'on ne regarde plus l'individu seul, ni la plante seule, ni l'animal seul, mais que désormais on considère l'organisme comme un tout avec tous ses habitants. Je trouve pourtant cela assez maladroit. C'est pourquoi j'utilise très peu ce mot d'holobionte. Car cela revient à sauver la notion d'organisme ou d'individu en l'élargissant à son contenu microbien, en une nouvelle entité. Selon moi, en sauvant, *via* la notion d'holobionte, une approche basée sur l'individu, c'est-à-dire par des entités opérationnelles, autonomes, closes, on s'empêche de penser l'interaction biologique et l'interdépendance comme étant des faits majeurs du vivant. On continue à chercher l'entité autonome, la clôture opérationnelle, là où il n'y en a pas. C'est ce que nous rappellent les réseaux mycorhiziens qui, en forçant des plantes à interagir, *via* leurs champignons, avec d'autres plantes, font le fonctionnement et la réussite écologique et évolutive des plantes. La réalité est ici le réseau et l'interaction, où se dilue la notion d'individu.

En fait, il faudrait prendre en bloc la communauté végétale, parce qu'il y a des réseaux partagés qui rattachent toutes les plantes : la plante dépend de champignons qui dépendent d'autres plantes qui dépendent d'autres champignons qui dépendent d'autres plantes… De même pour les insectes pollinisateurs qui courent de fleur en fleur. Or l'holobionte ne prend en compte que la première couche du réseau, sans doute la couche la plus importante mais pas la seule, et cache le poids de l'interaction biologique et des réseaux d'interactions qui, à présent, devient le fait majeur à étudier. C'est pourquoi je dis souvent qu'il n'y a pas d'organisme, qu'il n'y a que des interactions. Évidemment c'est faux, car il y a les deux. Il y a des nœuds et des liens, bien sûr. Mais je pense qu'aujourd'hui il est heuristique de dire que ce qui compte ce sont les liens, peu importent les nœuds. Cela rééquilibre un peu l'histoire, qui sort de deux cents ans de biologie des organismes et de physiologie des organismes. On a donc eu une approche des organismes qui, en fait, ne sont que les nœuds du réseau, comme, dans une toile d'araignée, les points où se croisent les fils.

Bernard Paillard et Monique Peyrière. Quelles conséquences pour l'approche du sol ?

Marc-André Selosse. Dire que tout est en relation avec tout peut paraître trivial à certains qui finiront par dire que l'interaction n'est pas un concept

325812RXK_COMMUNICATIONS_NO_105_CS6_PC.indd 207 29/05/2019 08:23:44

intéressant. Pourtant les sciences se développent autour d'approximations. Et si je ne dis pas qu'il faut cesser de faire de la physiologie des organismes, je dis que nous sommes à un moment où il faut avoir des approches de réseaux ; ce que met en œuvre, par exemple, Florent Martos dans mon équipe parisienne, dans ses recherches sur les symbioses mycorhiziennes. Dans un écosystème donné, il regarde tous les champignons et toutes les plantes en présence, puis analyse qui est relié à qui. On obtient ainsi un graphe des interactions dont on étudie les propriétés mathématiques, l'existence de sous-réseaux et leur nature, les degrés de connexions… On voit s'il y a des espèces qui sont plus connectées que d'autres ou dont la survie est cruciale pour la majeure partie du réseau. On obtient alors des analyses qui ne regardent plus les organismes comme des points dans des graphes d'interactions, mais qui produisent des patrons d'interactions. Ceci permettra, à terme, l'analyse de l'ensemble de l'écosystème et des organismes en interaction. Cette approche par les réseaux est surtout valable pour le sol, où il y a tellement de monde ! Cela reste encore largement à étudier ; mais cela commence.

Bernard Paillard et Monique Peyrière. Les interactions intéressent toutes les sciences qui entendent prendre en compte la complexité…

Marc-André Selosse. On peut retracer comment cette idée s'est petit à petit imposée grâce aux travaux de plusieurs auteurs. Dans le domaine des sciences de l'évolution, on peut citer, par exemple, Pierre Kropotkine et son livre *L'Entraide, un facteur de l'évolution*[12], William Donald Hamilton, biologiste évolutionniste britannique qui, en 1964, a proposé l'idée de « sélection de parentèle », ce qui a permis d'expliquer les comportements « altruistes »[13], ou bien, Lynn Margulis, microbiologiste américaine, qui, dans les années 1960, a remis à l'honneur la théorie endosymbiotique[14]. Mais il y en a d'autres…

Bernard Paillard et Monique Peyrière. Rappeler ces auteurs, n'est-ce pas signifier que les concepts et leur acceptabilité par la communauté scientifique ont une histoire ?

Marc-André Selosse. Je trouve en effet qu'il est important de savoir mettre en perspective historique les concepts avec lesquels on travaille. Sans doute parce que j'ai fait partie des étudiants qui ont beaucoup bénéficié d'un enseignement en philosophie, notamment en épistémologie. J'ai découvert que ce que je savais m'était parfois imposé par des outils, par des relations avec d'autres scientifiques, et donc par une sorte de réseau social. D'une façon générale, je fais partie des gens qui ont eu la chance d'avoir été nourris par des études équilibrées entre les lettres et les sciences. Et, selon moi, on aurait intérêt à former les scientifiques à la littérature et à la philosophie. On aurait aussi intérêt

325812RXK_COMMUNICATIONS_NO_105_CS6_PC.indd 208 29/05/2019 08:23:44

à former les chercheurs en sciences humaines aux sciences de la nature. Cela leur permettrait de revisiter leurs objets avec des visions nouvelles, par exemple en prenant en compte le concept d'évolution. Ce que fait un Jared Diamond[15] lorsqu'il propose une vision de l'histoire des civilisations et des conflits civilisationnels en les reliant à l'histoire biologique et à des logiques évolutives.

En science, il y a différents niveaux pertinents d'analyse. Malheureusement on constate que, souvent, on a tendance à ignorer celui qui est juste en dessous du sien, comme celui juste au-dessus, pour développer son efficacité d'analyse dans sa seule spécialité. Et, s'il y a de la place pour toutes les disciplines, aujourd'hui il me paraît temps de rompre les barrières trop étanches entre celles-ci.

Ce qui est vrai d'une façon générale est aussi vrai pour le sol. Il est clair qu'il n'est pas un objet appartenant seulement aux biologistes et aux géologues. Il appartient aussi aux gens qui étudient les cultures, les représentations du monde, et bien d'autres choses encore. Le sol appartient à tout le monde, d'abord et avant tout en tant qu'objet de recherche.

Marc-André Selosse, professeur
marc-andre.selosse@mnhn.fr
Muséum national d'histoire naturelle, Institut de systématique,
Évolution, Biodiversité (Paris)
Responsable de l'équipe Interactions et Évolution végétale et fongique.
http://isyeb.mnhn.fr/fr/annuaire/marc-andre-selosse-404

NOTES

1. *Bibliographie*

Marc-André Selosse, *La Symbiose. Structures et fonctions, rôle écologique et évolutif*, Paris, Vuibert, 2000.

Marc-André Selosse, « Au-delà de l'organisme, l'holobionte », *Pour La science*, 469, 2016, p. 80-84.

Marc-André Selosse, *Jamais seul. Ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations*, Arles, Actes Sud, 2017.

Plusieurs vidéos en ligne, dont :

La mycorhization, une symbiose au service des cultures, la comprendre pour la favoriser : www.youtube.com/watch?time_continue=1&v = pmjWysrPyJI.

Le fonctionnement biologique des sols : www.youtube.com/watch?v=DAOdifyrfp4.

2. Lorenz Hiltner (1862-1923), agronome et biologiste allemand spécialiste de la microbiologie du sol.

3. Rhizosphère, du grec *rhiza*, signifiant « racine », et du latin *sphaera*, signifiant « sphère ».

4. Symbiose, du grec *syn*, signifiant « ensemble », et de *bios*, signifiant « vie ».

5. Il en est de même pour les animaux, donc pour les hommes.

6. Les pyroxènes sont des minéraux abondants dans le manteau terrestre. Ils sont fréquents dans certaines roches volcaniques, comme le basalte.

325812RXK_COMMUNICATIONS_NO_105_CS6_PC.indd 209 29/05/2019 08:23:44

7. Les fusarioses sont des maladies causées par des champignons pathogènes qui se trouvent dans le sol. Y développant un mycélium, ils contaminent la plante par les racines. Principales cultures touchées : les céréales, des légumes, mais aussi certains arbres fruitiers.

8. Maladies causées par des organismes microscopiques (dont les *phytophthora*) autrefois classés parmi les champignons, car présentant un aspect morphologique assez semblable, mais à la physiologie différente. Ils peuvent infecter des plantes comme les pommes de terre, la vigne, les pommiers, les châtaigniers.

9. Acides hydroxycinnamiques, molécules appartenant à la famille des polyphénols naturellement présentes dans la plante, notamment dans certains fruits comme le raisin et sécrétés par les racines.

10. Les phénols sont des composés chimiques organiques d'origine végétale, dont les tanins bien connus pour leur astringence.

11. Holobionte, du grec *holo*, signifiant « tout », et de *bios*, « vie ».

12. Pierre Alexeïevitch Kropotkine (1842-1921), *L'Entraide, un facteur de l'évolution* (1902), trad. Louise Guieysse-Bréal Paris, Hachette, 1906. Plusieurs rééditions. Ouvrage en huit chapitres. S'inspirant des observations qu'il avait faites durant ses séjours dans les régions sibériennes et s'appuyant sur ses nombreuses lectures en éthologie, en anthropologie, en sociologie et en histoire, l'auteur entend montrer que, à côté de la lutte pour l'existence introduite par Darwin et Wallace, existait un principe de coopération expliquant, lui aussi, l'évolution.

13. William Donald Hamilton (1936-2000), biologiste anglais. En 1963 et 1964, il publie deux articles reçus dans une indifférence assez générale mais qui, par la suite, allaient profondément marquer les sciences de l'évolution. S'intéressant au phénomène de l'altruisme dans ses rapports avec la génétique, il propose une équation permettant de rendre compte de ce qu'on appelle désormais la « sélection de parentèle », et qui explique qu'on peut se sacrifier pour assurer le succès reproductif d'organismes génétiquement apparentés.

14. Lynn Margulis (1938-2011), microbiologiste américaine, connue dans les années 1960 pour avoir proposé une origine endosymbiotique aux cellules eukaryotes. Cette théorie, déjà émise au tournant des XIX^e^ et XX^e^ siècles, stipule que la cellule des organismes avec noyaux (Eucaryotes) est une chimère ayant incorporé, au cours de l'évolution, des organismes sans noyaux (procaryotes), les uns, les chloroplastes, assurant la photosynthèse, les autres, les mitochondries, assurant la respiration. Il a fallu l'apport de nouvelles méthodes d'étude de la cellule utilisant la microscopie électronique, la biochimie et la biologie moléculaire pour que cette théorie soit finalement adoptée vers 1970. Par la suite, elle insista sur l'importance évolutive des interactions symbiotiques entre des organismes d'origine phylogénétique différente. Par ailleurs, elle formula avec James Lovelock « l'hypothèse Gaïa ». Nombreux articles et plusieurs livres parus en anglais, dont l'un traduit en français : Lynn Margulis, Dorion Sagan, *L'Univers bactériel. Les nouveaux rapports de l'homme et de la nature*, trad. de l'anglais Gérard Blanc, Anne de Beer, préf. Lewis Thomas, Paris, Seuil, coll. « Points Sciences », 2002.

15. Jared Diamond, (1937-), biologiste évolutionniste, géographe et anthropologue américain, est surtout connu pour ses grandes fresques de vulgarisation scientifique. Dans *De l'inégalité parmi les sociétés* (1998), il développe l'idée selon laquelle la situation internationale contemporaine serait le résultat d'un long processus civilisationnel vieux de treize mille ans. Et il explique pourquoi le développement technologique s'est inscrit d'abord dans l'Eurasie, puis essentiellement en Europe, en raison de facteurs géographiques et biogéographiques. Dans *Effondrement. Comment les sociétés décident de leur disparition ou de leur survie* (2006), revenant sur l'histoire de civilisations disparues, celles de l'île de Pâques, des Mayas, des Vikings, il explique que la cause de leur perte est à mettre en rapport avec la destruction de leur propre environnement. Mais, *a contrario*, il montre que d'autres sociétés ont réussi à se maintenir et à se développer malgré de grosses difficultés environnementales.

RÉSUMÉ

Sous terre : bactéries et champignons en action
Entretien avec le biologiste Marc-André Selosse réalisé par Bernard Paillard et Monique Peyrière

325812RXK_COMMUNICATIONS_NO_105_CS6_PC.indd 210 29/05/2019 08:23:44

Sous terre : bactéries et champignons en action

Le sol, ce matériau situé sous terre entre les couches géologiques et l'atmosphère, est peuplé d'un nombre considérable de micro-organismes dont on ne soupçonne pas l'existence. Pourtant ces organismes invisibles jouent un rôle incontournable pour toutes les espèces vivant au-dessus du sol, plantes et animaux. C'est ce que les méthodes de biologie moléculaire contemporaines aident à découvrir. Les bactéries font « tourner » les cycles des éléments de la matière dont se nourrissent les plantes, et peuvent entrer directement en associations à bénéfice réciproque (symbiose) avec les racines de certaines d'entre elles. Les champignons mycorhiziens construisent des réseaux avec et entre les racines, formant des symbioses (ou mycorhizes) par où s'échangent eau et sels minéraux vers la plante contre sucres vers le champignon. Un univers microbien du sol à étudier, en s'attachant à comprendre le fonctionnement de ses interactions.

Mots-clés : biologie du sol, plantes, champignons, bactéries, symbiose, mycorhize, interaction

SUMMARY

Underground: Bacteria and mushrooms in action

The soil, this material located underground, in-between the geological layers and the atmosphere, is filled with host of unsuspected micro-organisms. Yet these invisible organisms play a vital role for all species living above the soil, plants and animals alike. This is what contemporary molecular biology methods help to reveal. Bacteria "rotate" the cycles of the elements of matter on which plants feed, and they can directly enter into associations of mutual benefit (symbiosis) with the roots of some of them. Mycorrhizal mushrooms build networks with and between roots, forming symbioses (or mycorrhizae) through which water and mineral salts are transmitted to the plant in exchange for sugars to the mushroom. This microbial universe of the soil ought to be studied, by focusing on understanding how its interactions work.

Keywords: biology of soil, plants, mushrooms, bacteria, symbiosis, mycorrhizae, interaction

RESUMEN

Subterráneo: Bacterias y hongos en acción

El suelo, este material situado bajo tierra entre las capas geológicas y la atmósfera, está poblado por un número considerable de microorganismos cuya existencia se desconoce. Sin embargo, esos organismos invisibles desempeñan un papel esencial para todas las especies que viven en la superficie, plantas y animales. Esto es lo que los métodos actuales de biología molecular ayudan a descubrir. Las bacterias movilizan los ciclos de los elementos de materia que alimentan a las plantas y pueden entrar directamente en asociaciones de beneficio mutuo (simbiosis) con las raíces de algunas de ellas. Los hongos micrórrícicos construyen redes con y entre las raíces, formando simbiosis (o micorrizas) a través de las cuales el agua y las sales minerales se intercambian hacia la planta y los azúcares hacia el hongo. Un universo microbiano del suelo a estudiar, tratando de entender el funcionamiento de sus interacciones.

Palabras claves: biología del suelo, plantas, hongos, bacterias, simbiosis, micorriza, interacción

325812RXK_COMMUNICATIONS_NO_105_CS6_PC.indd 211 29/05/2019 08:23:44