

Un pour tous, tous pour un : microbes, plantes, animaux et hommes associés pour la Vie

Communications à l'Académie de Savoie le 21 mars 2018

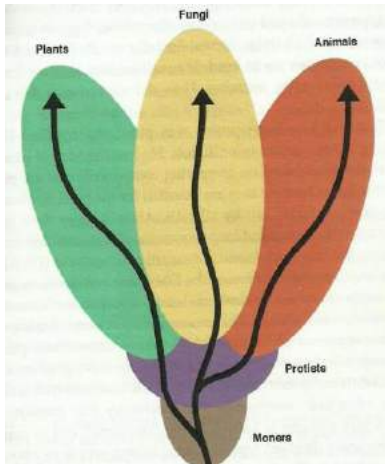
Professeur Gérard Blake et Docteur Robert Deloince

Chacun dans notre spécialité, médecin ou biologiste des plantes- nous allons vous présenter les relations étroites qu'ont tissées au fil du temps les êtres visibles et invisibles qui occupent la biosphère.



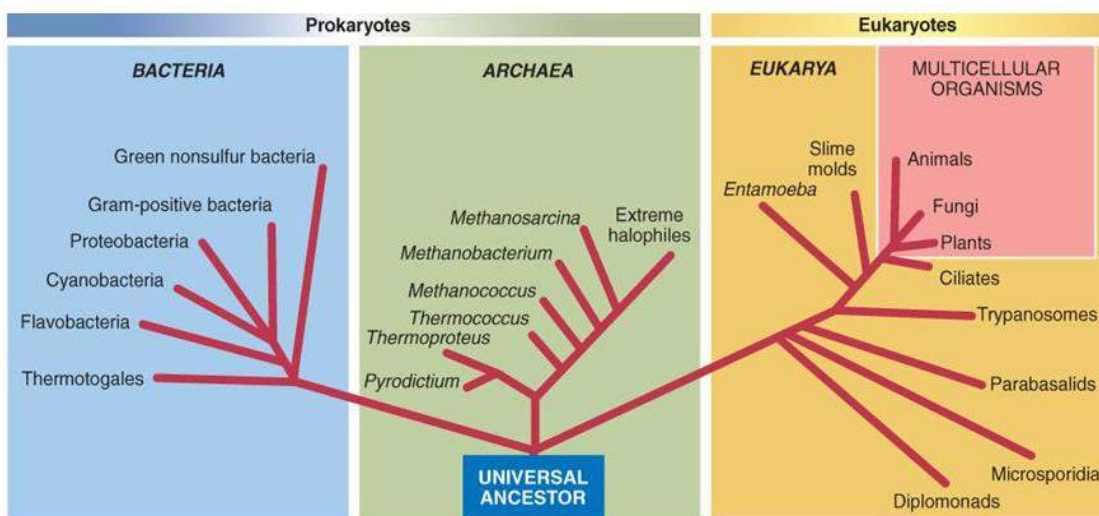
Evolution de la classification des êtres vivants.

Dans le chapitre 2 de la Genèse, il est demandé à l'homme de nommer les animaux, comme l'illustre le tapis de la création, exposé dans la cathédrale de Gérone. L'observation et le classement des animaux ont été poursuivis durant l'Antiquité, mais il faudra attendre la découverte du microscope au XVII^{ème} pour décrire les animaux microscopiques. Saluons le travail extraordinaire des naturalistes du XVIII^{ème} siècle.



L'arbre de vie proposé par Darwin révèle un monde vivant dominé par les 3 règnes observables (animal, végétal et fongique) issu d'un monde microscopique peu connu et très minoritaire.

Les biologistes vont ensuite établir que l'unité de base de tous les êtres vivants est la cellule et qu'elle ne peut descendre que d'une autre cellule car la génération spontanée d'êtres vivants n'existe pas - Pasteur l'a bien démontré. Une cellule a la capacité de prendre dans l'environnement les molécules et l'énergie dont elle a besoin pour croître et se multiplier. La découverte et l'analyse depuis les années 60 du XX^{ème} siècle de la molécule porteuse de l'information génétique (**ADN**) va totalement inverser la vision proposée par Darwin. La biologiste américain Carl Woese (1970) démontre qu'au moins sur le plan qualitatif, les êtres microscopiques deviennent largement dominants et relèguent les êtres vivants visibles à l'œil nu dans une petite zone de l'arbre. Cette diversité cache pourtant une grande unité de fonctionnement que le décryptage du message contenu dans l'ADN va éclairer



L'arbre de vie établi par Woese est radicalement inversé au profit des êtres vivants microscopiques, généralement formés d'une seule cellule.

Comment se construit un être vivant ?

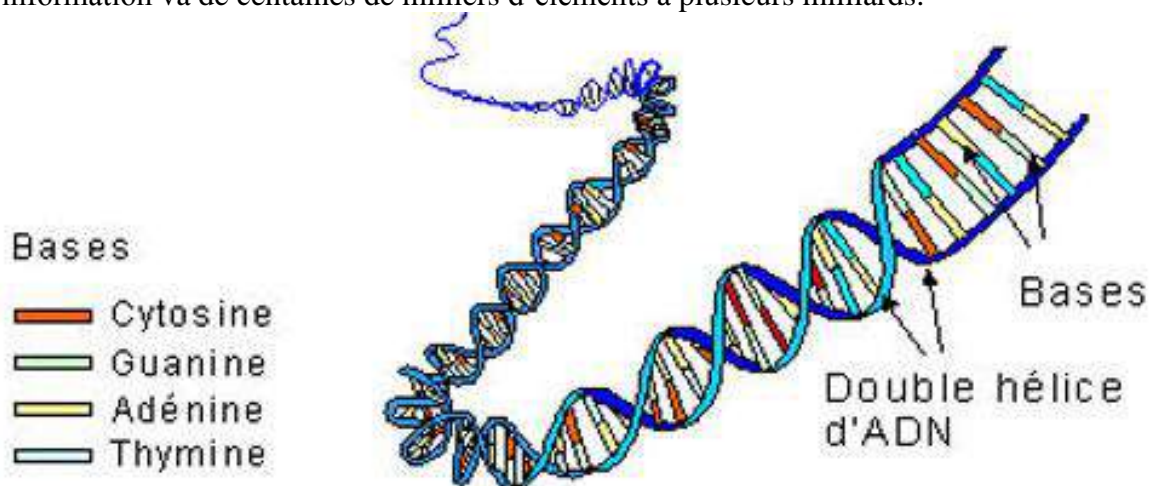
On dit malicieusement, tellement le phénomène est presque incongru, que la vie construit des formes éphémères improbables à l'aide de molécules improbables qu'elle fabrique à partir d'une information portée par l'ADN.

Seule une cellule a la capacité de multiplier l'information génétique et de la traduire en molécules organiques qu'elle répartira ensuite entre 2 cellules identiques en se divisant ("croissez et multipliez"). De ce fait, les virus ne sont pas classés comme êtres vivants car ils sont incapables de réaliser ces deux fonctions. Ils ne sont que des transporteurs d'acides nucléiques (ADN ou ARN) qui utiliseront obligatoirement une cellule pour se multiplier et fabriquer la structure qui les transportera.

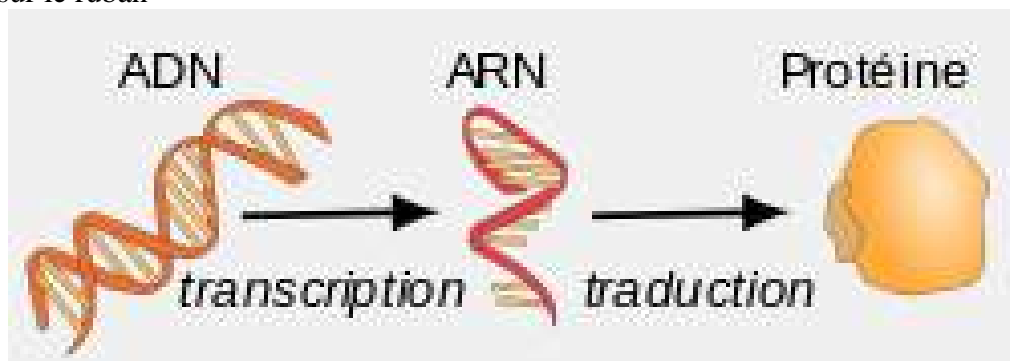
Se posent deux questions : Comment dupliquer l'information génétique et comment cette information génétique est elle " exprimée " ?

Comment l'ADN se duplique ?

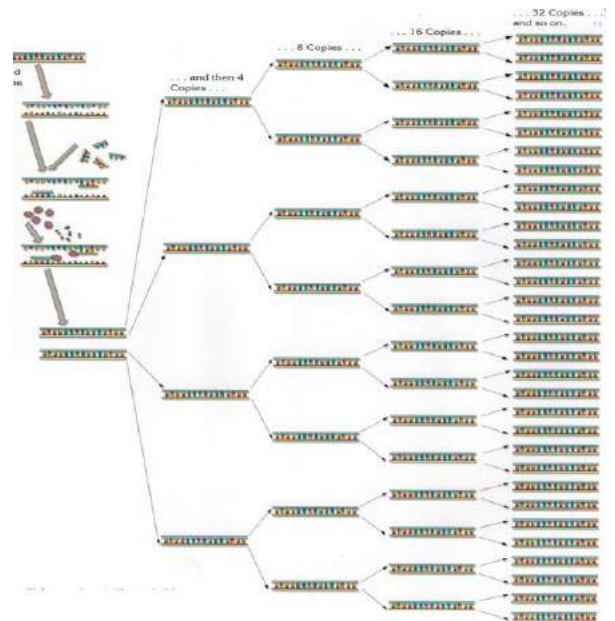
L'ADN est une molécule qui porte une succession de 4 éléments ou bases (A,T,G,C) qui s'apparient 2 à 2 pour former 2 brins qui s'enroulent en prenant la forme de la fameuse double hélice. La complémentarité des bases fait qu'on reproduit facilement cette molécule en écartant les 2 brins qui se complètent automatiquement au sein de la cellule. La taille de l'information va de centaines de milliers d'éléments à plusieurs milliards.



Comment l'information portée par l'ADN est traduite en protéines ? L'information est recopiée par fragments de quelques milliers d'éléments appelées gènes, puis traduite en protéine au niveau d'une micro-usine d'assemblage appelées ribosome. La cellule "incarne" l'information génétique comme un magnétophone restitue en musique l'information placée sur le ruban



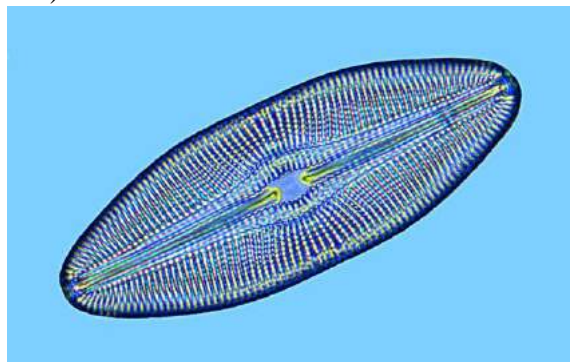
Les microbes sont étudiés habituellement en les multipliant sur un milieu de culture approprié, mais plus de la moitié ne sont pas cultivables aussi une multiplication d'un fragment d'ADN est obtenue par une technique appelée amplification génomique ou **Polymérase Chain Réaction**, suivie de la détermination de la séquence des bases. Depuis 30 ans, les techniques d'études des molécules biologiques dans l'environnement (séquençages à haut débit associés à une analyse informatique), regroupées sous le nom de **méta génomique**, ont d'établir l'immense diversité des êtres vivants, que l'on classe habituellement par rapport au nombre cellule qu'ils présentent, mais également en fonction de la situation et de la quantité d'ADN que leurs cellules contiennent



Un être vivant peut être **unicellulaire** (une cellule) et vit librement dans son environnement

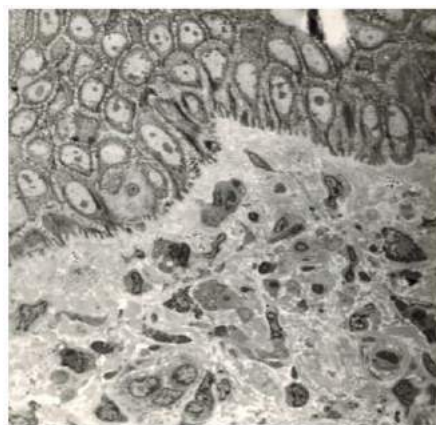


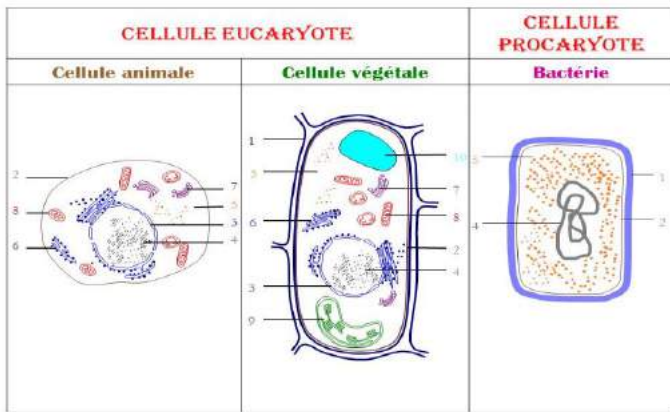
E.
Coli
1µm



Diatomée
30µm

ou **pluricellulaire** (multitude de cellules). Chaque cellule participe à la vie de l'organisme entier.





Les êtres dont l'information génétique est 1 simple molécule d'ADN, mêlée aux autres constituants de la cellule, sont nommés **procaryotes (cellule sans noyau apparent)** et ceux dont l'information génétique est constituée de 2 molécules d'ADN, placées dans une structure visible, le noyau, sont appelés **eucaryotes (cellules avec noyau)**.

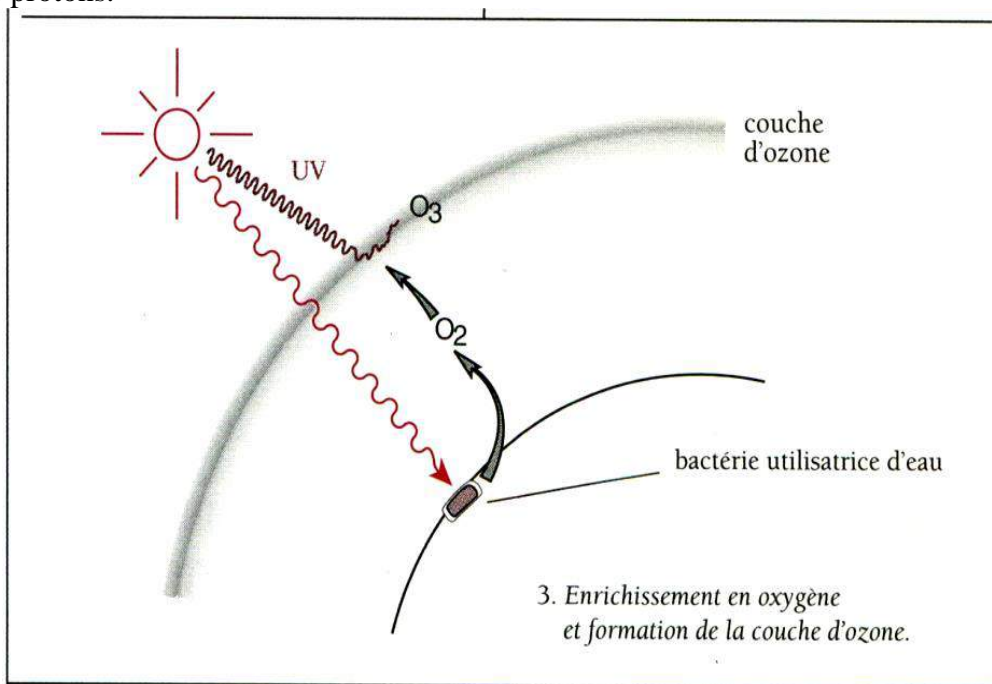
| | | |
|---------------|---------------------------------------|-----------------|
| 10 microns | 20 microns 2 molécules d'ADN | 1 micro n |
|---------------|---------------------------------------|-----------------|

Comment les êtres vivants se sont-ils développés sur la Terre ?

Les êtres vivants apparaissent sous forme microscopique, il y a au moins

3 milliards d'années, et se développent uniquement dans l'eau. La biosphère est la couche de 30 km d'épaisseur située à la surface de la planète où l'eau est sous forme liquide. Les premiers microfossiles sont des procaryotes qui descendent d'un ancêtre hypothétique appelé LUCA.

Croître nécessite la synthèse de molécules organiques complexes à partir de 4 atomes principaux (C, H, N et O) ce qui nécessite de l'énergie tirée du mouvement des électrons et des protons.

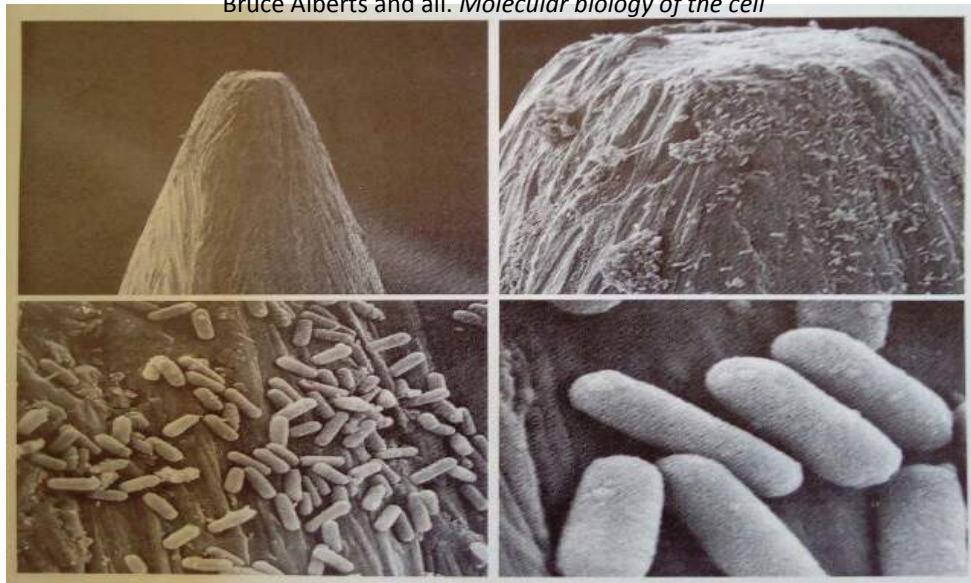


Les premières photosynthèses, libérant de l'oxygène, apparaissent il y a près de 3 milliards d'années

Les procaryotes sont donc à l'origine de la plupart des moyens d'exploitation des sources rencontrées : fermentation, photosynthèse, nitrification, respiration avec ou sans oxygène, etc... d'où leur grande diversité qui s'explique par les mutations spontanées et aléatoires subies par l'ADN. Elles créent des multitudes d'ADN qui engendre chacun une nouvelle cellule qui donne naissance à un clone (population de cellules-filles identiques). Des millions

de clones ont été produits et les mieux adaptées à la source alimentaire rencontrée survivent et poursuivent leur évolution.

Bactéries sur une tête d'épingle (Science photo Library)
Bruce Alberts and all. *Molecular biology of the cell*



Après plus de 3 milliards d'années d'évolution, les bactéries et les archées qui ont suivi une voie un peu différente qui les rapprochent des eucaryotes sont extrêmement diverses et partout. Elles ont envahi toute la biosphère, même nos objets familiers et les océans où elles sont très nombreuses : près d'un million de bactéries et autant d'archées dans 1 ml d'eau de mer, et mille fois plus dans les sols. C'est le départ de la chaîne alimentaire marine. Elles sont présentes dans les sources thermales chaudes et froides, les marais salants, les cavernes, les milieux acides ou basiques, et même dans les fosses océaniques en absence de lumière ou dans les lacs alpins. Les procaryotes fournissent actuellement 50% de l'oxygène et poursuivent toujours leur course à l'énergie sur les nouveaux substrats (polystyrène et plastiques)

1,5 milliard d'années après leur émergence, les procaryotes vont donner naissance à des cellules plus complexes, après avoir totalement façonné la biosphère par la production de substances organiques et d'oxygène. Si dans le monde vivant, l'obtention de molécules organiques, coûteuses à fabriquer énergétiquement, fait que "tout le monde mange tout le monde, mort ou vif", des associations pacifiques entre 2 organismes différents, appelées symbioses, sont habituelles. Elles permettent l'addition des capacités de chaque partenaire. et donc bénéfiques.

1. Tout commence avec deux organismes indépendants



2. Un des organismes englutit l'autre



3. Un organisme vit maintenant à l'intérieur de l'autre

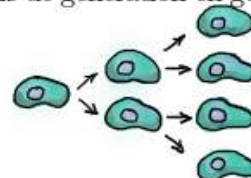


4. Les deux organismes bénéficient de cette incorporation

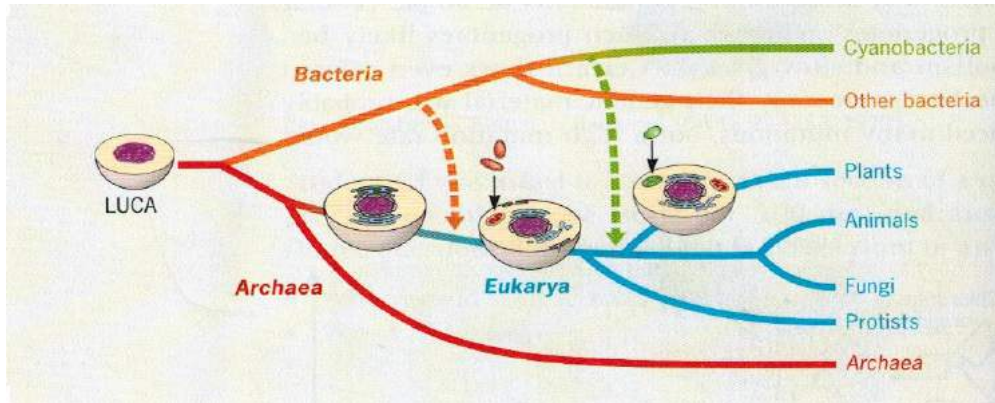


lesmaterialistes.com

5. L'organisme ingéré est alors transmis de génération en génération



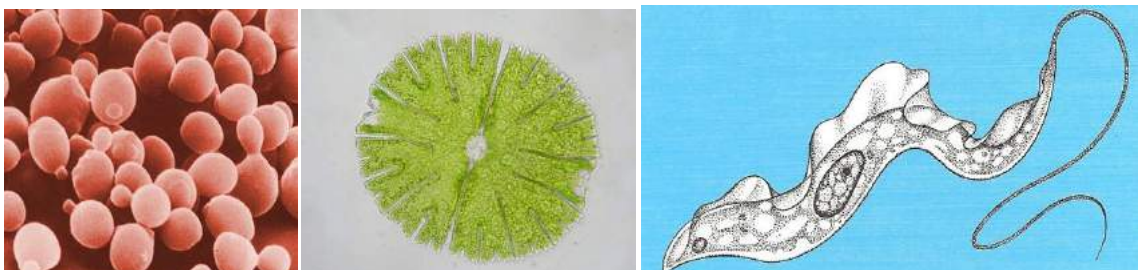
C'est dans cet environnement, qu'une archée, n'utilisant pas l'oxygène qui serait toxique pour elle, et une bactérie utilisant l'oxygène, ont mis en commun leur qualité respective. Cette symbiose est à l'origine des eucaryotes qui, utiliseront désormais l'oxygène pour produire leur énergie (respiration aérobie). C'est ainsi qu'un nouveau schéma évolutif des êtres vivants a été proposé. Une autre symbiose entre un eucaryote et une bactérie photosynthétique va mettre en place le monde végétal producteur d'oxygène et de matière organique.



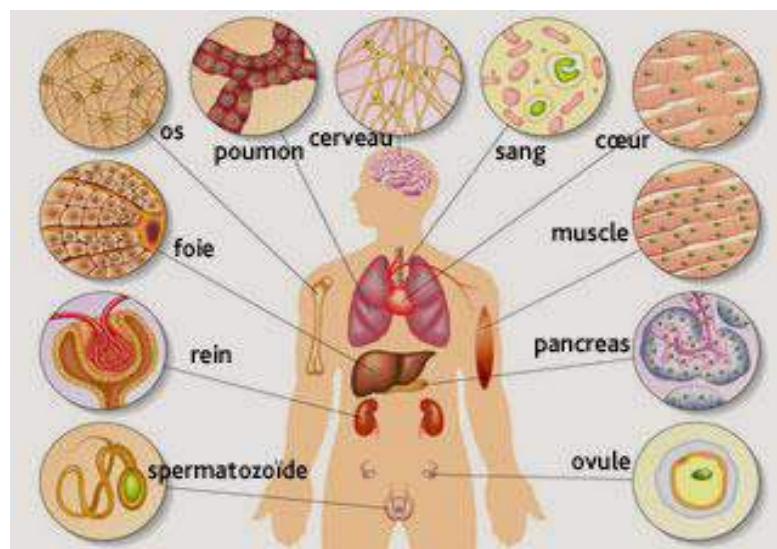
Microbes, seconde édition,
ASM, 2016

Ces eucaryotes, 30 fois plus grands que les procaryotes, ont une information génétique, constituée de deux molécules d'ADN qui s'accroît et se scinde en chromosomes. La bactérie symbiotique deviendra la centrale énergétique de tous les eucaryotes sous le nom de mitochondrie. La cellule eucaryote peut désormais exécuter plusieurs tâches à la fois (sécrétion, excrétion, contraction, perception... etc.) grâce à l'apparition d'une régulation du fonctionnement de chaque gène. Elle fait ainsi le travail de plusieurs cellules procaryotes grâce à l'émergence du cycle sexuel qui inclut les mutations des gènes (allèle) au sein de l'espèce (ensemble d'individus interféconds)

Les eucaryotes vont reprendre certaines fonctions essentielles des procaryotes nécessaires à leur développement. **Les champignons** complètent ainsi le recyclage de toute matière organique non vivante, **les algues** assurent une production d'oxygène et participeront à l'émergence du monde végétal, **les protozoaires** perfectionnent la mobilité et seront à l'origine du monde animal.



Il y a 1 milliard d'années, certains eucaryotes s'associent en colonies temporaires puis permanentes. Ils généreront des êtres pluricellulaires de plus en plus complexes. L'association de cellules de structure et de fonctions très différentes offrent de nouvelles possibilités évolutives à la vie en cumulant de nombreuses fonctions (se déplacer, se reproduire, se protéger, se nourrir, etc...) pour construire des êtres vivants multicellulaires de plus en plus complexes. Cellules nerveuses, musculaires, osseuses ou sanguines, etc. possèdent pourtant la même information génétique. Ce n'est donc plus un changement de nature du gène comme chez les procaryotes et leurs clones, mais un changement d'expression des gènes qui est mis en place. Or l'environnement agit désormais sur l'information génétique que l'on croyait souveraine. Cette régulation, appelée épigénèse, est d'une grande actualité et on estime que plus de 90% de l'information génétique lui est consacrée chez les pluricellulaires. (les 22.000 gènes qui codent pour la construction d'un être humain ne représente que 2% de l'information génétique)



Même si le lien entre un unicellaire microscopique et un pluricellaire macroscopique évolué semble ténu, des relations mutualistes intimes ont été établies. Ces symbioses sont nécessaires à l'évolution de tous les êtres vivants qui vont poursuivre ensemble l'ordre de vie inscrit dans leur génome : "croître, se multiplier".

Le microbiote humain

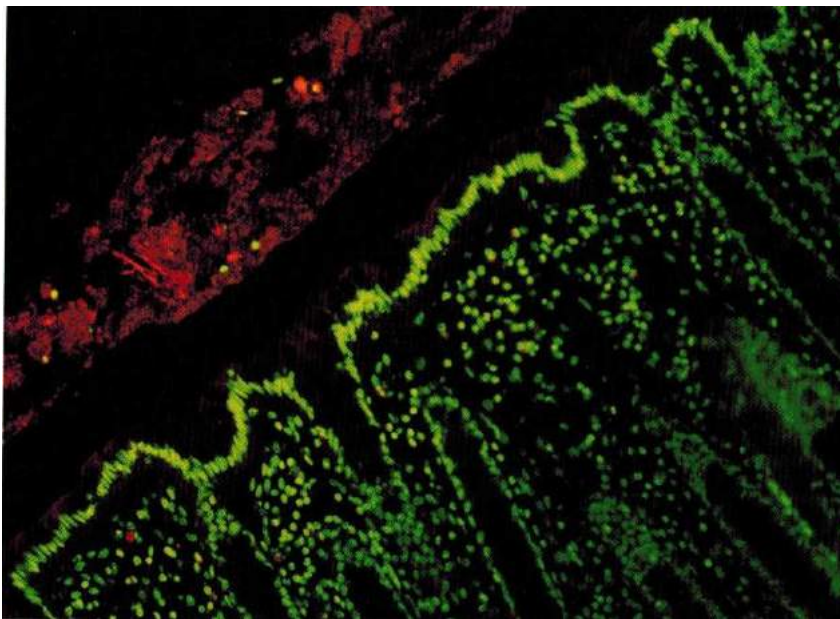
Notre espèce n'échappe pas à cette réalité, Partout où le corps humain est exposé à l'environnement, une communauté microbienne différente est installée. (nez, œil, bouche, peau, voies aériennes supérieures, voies uro-génitales, intestin, etc...). 5000 espèces bactériennes ont été détectées chez *Homo sapiens*. Pour 1 cellule humaine il y a au moins 2 cellules bactériennes, sans compter les virus (10 fois plus) et les champignons (10 fois moins). Ce microbiote nous apporte un important patrimoine génétique, (300 gènes bactériens pour un gène humain) et augmente considérablement nos possibilités métaboliques. Aussi l'ensemble homme + microbes peut être considéré comme un "super-organisme".

Près de 60 tonnes de nourriture transitent dans le tube digestif au cours de notre vie et plusieurs milliards de microbes les accompagnent. L'ensemble, circule sur une surface de plus de 150 m², où sont absorbés les aliments nécessaires à nos cellules.

L'intestin forme une barrière physique qui sépare l'espace public alimentaire et microbien (non moi) de l'espace privé (moi). Cette barrière nous protège contre les toxines et les agents infectieux car elle dispose de 80% de notre système immunitaire. L'intestin communique aussi avec tout l'organisme. : d'une part, 200.000 millions de cellules nerveuses (Système nerveux entérique) permettent des échanges rapides entre divers organes et surtout le cerveau, et d'autres part des cellules intestinales sécrètent plus de 30 molécules à action hormonale ou anti bactérienne qui diffusent dans tout l'organisme (peptides opoïdes, vaso actifs, tackykiniques, calcitoniniques, à action pancréatique)..

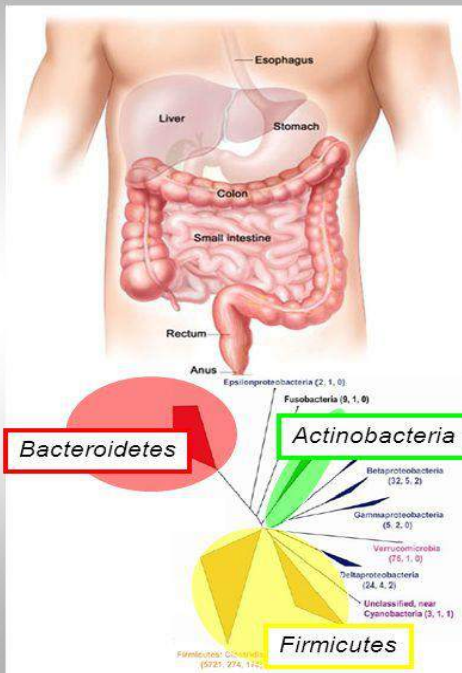
Le microbiote (rouge) et l'intestin (en

Catherine Jéssis - Etonnant vivant –Edition du CNRS mars 2017



Le microbiote intestinal, autrefois appelé flore intestinale, compte 2000 espèces bactériennes en majorité aérobies. La bouche, l'estomac, l'iléon et le colon ont des microbiotes très différents. Le colon, possède l'une des densités bactériennes, la plus élevée du monde animal, mais elle n'est pas très variée, puisque 4 grands groupes le composent à 95% (firmicutes, protéobactéries, actinobactéries et bactéroïdètes). Il comporte de très nombreuses "espèces". Le microbiote (procaryote) a co-évolué avec l'homme, (eucaryote pluricellulaire), depuis des centaines de milliers d'années, aussi sa constitution n'est pas le fruit du hasard. Ces bactéries ont été sélectionnées par le gîte écologique qui leur est offert, et les services qu'elles rendent. Elles protègent l'intestin contre les agents infectieux ou récupèrent une énergie inaccessible à nos cellules, par la digestion de molécules complexes grâce à l'apport d'enzymes que nos cellules n'ont pas. Le microbiote renforce la barrière intestinale et son mucus. Il contrôle le système immunitaire en régulant les lymphocytes à action anti-inflammatoire ou en favorisant la sécrétion d'immunoglobulines A(IgA), et en bloquant la sécrétion d'IgE impliqués dans de nombreux processus allergiques. Le microbiote colique sécrète des vitamines et il a la capacité de détruire des toxines, (fermenteur et épurateur). Ce rôle n'est d'ailleurs pas sans conséquence lors de la prise de médicaments par voie orale.

Le microbiote intestinal humain



Complexe

Abondance : 10^{14} bactéries

Diversité : ~ 1000 espèces

'Niches' écologiques (iléon /côlon)

Trois phyla (divisions) majeurs

Métagénome (ADN bactériens): $\sim 10^8$ gènes

Fonctions bénéfiques pour l'hôte

→ 'Organe' symbiotique

Le microbiote apparaît à la naissance et peut-être avant (microbiote placentaire). Les premiers microbes détectés viennent de la mère et du lait maternel qui apporte plusieurs dizaines d'espèces microbiennes ainsi que des sucres complexes que seuls ces microbes peuvent utiliser (le lait maternel nourrit l'enfant et son microbiote). (césarienne et allaitement artificiel ne doivent pas devenir systématiques en l'état de nos connaissances). L'enfant va peu à peu compléter ce microbiote par les microbes de son environnement humain (parents, frères et sœurs, nounou, crèche) et animal (chien, chat, etc..), pour disposer d'un microbiote proche de celui de l'adulte vers l'âge de 4 ans. Le microbiote restera stable et robuste jusque vers 70 ans, mais les variations au niveau des espèces sont considérables, si bien que chaque individu possède un microbiote unique, un peu comme les empreintes digitales. Quelles que soient les variations régionales ou alimentaires du microbiote individuel, ce qui importe c'est avant tout sa capacité à accomplir les tâches qui lui sont demandées, décrites précédemment.

Le tube digestif, le microbiote et l'ensemble de l'organisme dialoguent constamment. Aussi toute modification d'un élément de cet ensemble peut avoir des conséquences sur les autres et vis versa. Le microbiote est robuste, mais des perturbations appelées dysbioses sont associées à des maladies inflammatoires ou métaboliques redoutables. On peut prouver expérimentalement que le microbiote de souris maigres normales est différent de celui de souris grasses et que la transplantation d'un microbiote de souris grasses à des souris maigres rend ces dernières obèses (et inversement). L'extrapolation à l'homme est délicate, cependant la majorité des études cliniques ont souligné qu'un microbiote perturbé (diminution de la diversité, modification du fonctionnement microbien) n'accomplit plus les fonctions attendues. Il peut donc favoriser l'implantation de bactéries pathogènes ou sécréter des substances dangereuses, et même altérer la perméabilité de l'intestin. Il autorise la pénétration dans l'organisme de produits bactériens ou de bactéries qui génèrent des inflammations ou des modifications de certaines fonctions comme le stockage des graisses ou des sucres.

Par contre, il est plus compliqué de prouver le rôle possible du microbiote dans les troubles psychiatriques. Le dialogue permanent entre les bactéries intestinales et l'organisme ne permet pas de dire si une variation du microbiote est la cause ou la conséquence de la maladie observée. On sait que les bactéries intestinales sécrètent de nombreuses molécules qui ont une

action sur les récepteurs des cellules nerveuses (neuropeptides) qui pourraient modifier certains comportements. Expérimentalement, il a été prouvé qu'un microorganisme pouvait modifier le comportement (toxoplasme) de la souris. On propose aussi d'envisager une action de ces produits sur la régulation des gènes de cellules nerveuses (épigénèse), sans démonstration encore indiscutable.

Inversement, le stress ou la dépression accompagnent souvent l'histoire naturelle des maladies intestinales inflammatoires, probablement à travers l'axe cerveau-intestin. Notre organisme agit sur la motricité intestinale, sur la sécrétion de produits qui passent dans le tube digestif (sels biliaires), sur la circulation d'eau et de sels minéraux, ce qui modifie l'écologie du tube digestif et donc le fonctionnement des consortiums bactériens. Des relations très étroites existent aussi entre terminaisons nerveuses et les cellules immunitaires, en particulier celles bourrées d'histamine, ou celles fabriquant les anticorps. Leur stimulation excessive pourrait accentuer des réactions inflammatoires locales initiées par des infections virales ou un microbiote désorganisé.

Peut-on corriger un microbiote altéré ? Des produits, appelés **pré-biotiques**, essentiellement digérés par les bactéries intestinales comme ceux du lait maternel ont été identifiés. Ce sont des sucres complexes comme l'inuline ou des galactooligosaccharides ; et des arabinoxylyanes.

Chez l'homme des bactéries bienfaisantes, appelées probiotiques, ont été identifiées. Elles pourraient recoloniser un microbiote perturbé et des recherches très actives sont en cours. Les enjeux économiques de ces produits sont énormes, mais pour l'instant l'espoir de guérir une maladie psychiatrique avec un pré ou pro biotique n'est pas fondé.

La transplantation fécale, par contre, semble bénéfique pour le traitement d'infections intestinales graves à *Clostridium difficile*. Rappelons qu'un médecin chinois, Ge Hong, a décrit l'ingestion de matériel fécal humain pour traiter ses patients atteints de diarrhée sévère, il y a plusieurs siècles.

Procaryotes et eucaryotes collaborent étroitement pour faire face aux modifications inévitables de l'environnement et de notre alimentation. Cette collaboration est beaucoup plus étroite qu'on ne le pensait et l'ensemble formé par l'homme et ses microbiotes, apparaît indispensable à notre adaptation et à notre évolution au sein d'une biosphère toujours changeante. Les philosophes et les anthropologues se sont emparés de ces découvertes pour poser de nouvelles questions quant à notre identité (moi) puisque que le microbiote paraît agir sur notre cerveau, notre immunité et notre génome.

Pour conclure, respectons ces microbes qui nous accompagnent depuis notre apparition sur cette planète, ils ont autant besoin de nous que nous d'eux pour conduire l'inévitable et continuelle évolution du monde vivant qui depuis plus de 3 milliards d'années a conduit à ce que nous sommes aujourd'hui.

Références :

M. Swanson, G. Regea, M. Schaechter, F. Neidhart. Microbe ; 833 p.; American Society for Microbiology 2016 ; Washington, DC

C. Needham, M. Hoagland, K. McPherson, B. Dodson ; Intimate stranger-Unseel Life on Earth . American Society for Microbiology ; Washington DC

Ann Reid, Shannon Greene : Human microbiome FAQ : a report of the American Academy of Microbiology : 2013 ; Washington DC

Elizabeth Thursby and Nathalie Juge : Introduction to the human gut microbiota ; [Biochem J](#). 2017 Jun 1; 474(11): 1823–1836. Published online 2017 May 16. doi: [10.1042/BCJ20160510](https://doi.org/10.1042/BCJ20160510)

Plantes et bactéries :

Les relations étroites entre plantes et bactéries sont connues depuis de longue date en particulier en raison des maladies que peuvent engendrer ces dernières. La phytopathologie a été à l'origine de l'utilisation de produits biocides et phytosanitaires depuis des décennies. Mais les relations bénéfiques entre plantes et bactéries comme les associations symbiotiques entre Légumineuses et bactéries fixatrices d'azote permettent de voir ces liaisons sous un autre angle. Plus récemment, la présence en grand nombre de bactéries au contact des racines des plantes a attiré l'attention des chercheurs dans cet espace appelé la rhizosphère. Enfin nous traiterons rapidement d'une approche novatrice qui est celle des « endophytes », c'est-à-dire des bactéries présentes à l'intérieur même du matériel végétal.

Les Symbioses bactéries/plantes:

Les légumineuses ont toujours accompagné les civilisations, comme le soja pour les Chinois et les haricots pour les populations d'Amérique du Sud. Les symbioses des plantes des prairies comme le trèfle, la luzerne permettent d'enrichir comme engrais verts les graminées de ces peuplements prairiaux (Columelle , signalait déjà cela au premier siècle, à Rome et en Savoie, par Alexis Costa de Beauregard, à la fin du XVIII siècle, en Savoie).

C'est Martinus Willem Beijerinck, qui, en 1888, a isolé des bactéries à partir de nodules de racines de plantes de Leguminosae et a montré que ces isolats correspondaient aux bactéries appelées *Rhizobium leguminosarum* .

Cette symbiose est maintenant bien connue, chez les légumineuses, par la présence de ces nodosités fixées sur leur racine. Les bactéries (*Rhizobium*) contenues au centre de ces nodosités profitent de 20 à 30% des produits synthétisés par la photosynthèse de la plante et fournissent à celle-ci, sous forme de mutualisme, de l'azote ammoniacal provenant de la transformation de l'azote atmosphérique grâce à une enzyme, la nitrogénase, qui est protégée d'une oxydation excessive par la légghémoglobine. Cette enzyme colore en rose les nodosités des racines. Cette symbiose est présente chez les légumineuses depuis plus de 100 millions d'années et a forcément favorisé le développement de cette famille botanique sur terre. De même, l'azote enrichie les sols des zones humides grâce à la symbiose des aulnes ; dans le midi, les argousiers enrichissent également les sols par le même processus bactérien.

Les symbioses champignons/végétaux se sont produites pendant la colonisation précoce des terres par des plantes terrestres . Les plus anciens fossiles connus représentant des champignons terrestres avec des propriétés semblables à ceux de ces symbioses ont été recueillis à partir de roches de dolomie au Wisconsin et sont estimés à 460 millions d'années, en provenance de la période ordovicienne. Les origines des symbioses plantes/bactéries sont moins bien connues mais semblent être apparues plus tard au cours de l'évolution. Les symptômes typiques dans les racines des légumineuses infectées par le rhizobia (terme regroupant les différents genres bactériens) sont successivement :le « curling » des cheveux radiculaires et l'apparence des fils d'infection et, finalement, dans les nodules les transformations des bactéries dans les couches internes de la racine: tous ces processus sont gérées par l'échange de signaux entre les plantes et les rhizobia . Dans les cellules végétales, les bactéries sont finalement entourées par la membrane de la plante, et ensemble, la structure bactérienne et végétale forme la véritable symbiose.

La rhizosphère :

La rhizosphère correspond au volume de substrat (sol ou sédiments) influencé par la présence des racines du végétal.

Depuis plus d'un siècle, la compréhension des interactions plantes/microorganismes dans la rhizosphère a suscité l'intérêt de nombreux chercheurs. Ainsi, Hiltner (1904) fut le premier à définir la rhizosphère comme étant la zone de sol entourant la racine qui est directement ou indirectement influencée par cette dernière et qui présente une forte activité microbienne. La rhizosphère est le siège de nombreuses interactions entre les plantes et les divers microorganismes associés comme les protozoaires, vers et insectes.

Le volume de la rhizosphère correspond au développement maximal des racines, qui peut représenter plusieurs mètres carrés de surface racinaire pour un pied de roseau, sur une épaisseur de quelques millimètres de substrat. On conçoit facilement que pour un arbre, la rhizosphère représente ainsi des mètres cubes de sol forestier.

On peut détecter une densité de 100 à 1000 millions de bactéries par gramme de sol rhizosphérique . Ces bactéries, représentées par plusieurs centaines d'espèces différentes ont des métabolismes interactifs et possèdent des liens étroits avec les plantes qui les entourent.

En premier lieu, beaucoup d'entre elles dépendent des exsudats racinaires (environ 30% des sucres produits par la photosynthèse des végétaux leur sont fournis). Parmi les composés organiques rejetés par les racines, il y a également des hormones, des composés biocides, des substances organiques variées qui sélectionnent les bactéries ou les champignons dans l'environnement des plantes.

Les racines des plantes excrètent différents composés appelés rhizodépôts. Ces substances constituent un élément majeur de perturbation de la microflore tellurique qui en retour, influence la croissance et la santé des plantes . La microflore rhizosphérique est naturellement constituée d'un assemblage complexe de microorganismes procaryotes et eucaryotes . Les rhizodépôts jouent ainsi un rôle actif dans la régulation des interactions mutualistes et parasites/pathogènes, entre les plantes et les microbes du sol .

Les interactions bénéfiques entre les plantes et les microorganismes dans la rhizosphère sont déterminantes pour la santé des plantes et la fertilité des sols . Il est reconnu que ces interactions sont dépendantes des racines vivantes ou du matériel végétal mort disponible, mais également de l'agronomie et de l'écologie . En fait, les microorganismes du sol sont d'une grande importance dans le cycle des nutriments et dans l'entretien de la santé et de la qualité du sol . Ils sont impliqués dans les activités fondamentales qui assurent la stabilité et la productivité du système agricole et de l'écosystème naturel . Les microorganismes provenant de cette rhizosphère peuvent, lorsqu'ajoutés aux graines et à la surface des végétaux ou au sol, coloniser la plante et favoriser sa croissance en augmentant la disponibilité des nutriments. Ainsi, ils agissent comme fertilisants biologiques ; on parle alors de bio-fertilisants.

Parmi ces microorganismes, certains sont présents dans la rhizosphère sans que leur influence sur le développement des végétaux ne soit connue (il s'agit de microorganismes commensaux), certains sont favorables aux plantes (on parle alors de mutualisme) alors que d'autres ont des effets délétères sur les plantes (parasites et phytopathogènes). Ainsi, la croissance, la santé des plantes et leur diversité sont donc influencées par la diversité des populations microbiennes présentes dans la rhizosphère. On a suggéré que les racines des plantes sont analogues à l'intestin humain, puisqu'elles sont les organes principaux

qui interagissent avec l'environnement et qui font la médiation de l'échange de signaux et de la communication entre les plantes et les microorganismes.

L'utilisation de l'effet rhizosphère en épuration des eaux et des sols :

Dans nos travaux de recherche, nous avons montré que la symbiose plantes/bactéries dans les systèmes d'épuration des eaux usées domestiques, mis au point, il y a 25 ans en Europe, sous le nom de lagunage plantés permettait de développer des capacités remarquables pour l'épuration des composés organiques présents dans les eaux domestiques ou industrielles.

Le fonctionnement de ces systèmes d'épuration est basé sur la complémentarité entre plante et bactéries rhizosphériques :

Les plantes (essentiellement le roseau : *Phragmites australis*) rejette de l'oxygène par ses racelles et crée ainsi un microcosme favorable aux bactéries aérobies. Ces conditions d'oxydation du milieu rhizosphérique sont visibles sur la photographie suivante par la couleur rouille des composés du fer en surface des racines, alors que le fer situé en dehors de la zone d'influence des racines est chimiquement sous forme réduite donc de couleur sombre (sulfures de fer). On notera d'ailleurs que par ce processus, la plante évite de s'intoxiquer par les métaux traces.

Dans cet environnement rhizosphérique, les communautés bactéries « jouent » la complémentarité des métabolismes aérobies/anaérobies en décomposant des substances qui sont souvent très difficilement biodégradables. Ainsi, nous avons démontré, par des travaux effectués en laboratoire, que la complémentarité plante/bactéries permettait d'accélérer par un facteur six la vitesse de dégradation du pyrène (marqué au ^{14}C)_ substance toxique du groupe des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), provenant de la combustion de carburant ou autre combustible_ . Des travaux récents nous ont permis de déterminer les différentes souches bactériennes (notamment les Betaproteobactéries) responsables de la dégradation du phénanthrene dans la rhizosphère des roseaux dans un sol contaminé.

Nous avons là un bel exemple des effets bénéfiques de la symbiose plante/bactéries dans la dégradation de polluants de l'environnement. L'application de ces procédés est visible dans notre région, puisque des dispositifs à lagunage plantés ont été installés, suivant notre principe, sur la rive Est du Lac du Bourget ; ces dispositifs recueillent, traitent les eaux de ruissellement de chaussée, chargées en métaux et hydrocarbures, protégeant ainsi le plus grand lac français d'une contamination certaine. Ces systèmes favorisent l'activité microbienne rhizosphérique par une circulation privilégiée au contact des racines des phragmites

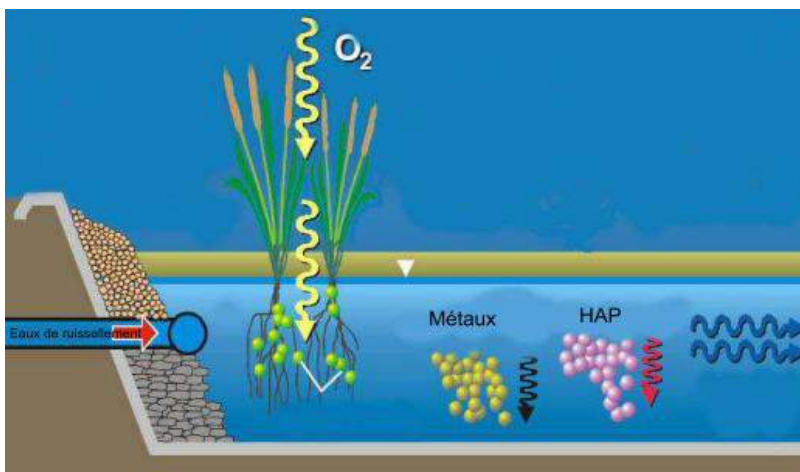


Schéma 1 illustrant la circulation des effluents d'origine routière au contact de la rhizosphère des lagunages plantés. Les métaux sont fixés et les HAP dégradés activement par les communautés microbiennes aérobies et anaérobies.



Figure 1

montrant le rôle des racines de roseau (*Phragmites australis*) sur l'oxygénation des sédiments (le fer précipite sous formes d'hydroxides au contact de la racine).

On notera également la limite nette entre la zone oxydée et la zone réduite. Les bactéries, en zone réduite tirent leur énergie des sulfures d'une part ou de l'oxygène et des exudats racinaires en zone oxydée.

Figure 2 :

La station de lagunage planté de Curiennne(Savoie) . Elle fut la seconde station créée en France, il y en a plus de 4000 actuellement. Elle est basée sur l'utilisation de la rhizosphère pour l'épuration des eaux usées domestiques.

En Savoie, les stations d'épuration utilisant ce procédé sont nombreuses tant pour des communes rurales que pour des eaux de ruissellement de chaussée.



Les bactéries présentes dans le végétal : les endophytes

C'est en 1965 qu'un chercheur français, Bernard Montuelle, a travaillé, le premier, sur les bactéries endophytes. Il s'agissait donc d'un travail tout à fait précurseur sur ce domaine qui a passé dans l'oubli jusqu'à ces deux dernières décennies où le développement de nouveaux outils de caractérisation moléculaire des bactéries a permis alors d'avoir une approche plus fructueuse de ces microorganismes.

La définition la plus commune des endophytes est dérivée de la description pratique donnée en 1997 par Hallmann, qui a déclaré que les endophytes sont "... ceux (bactéries) qui peuvent être isolés à partir de tissus végétaux désinfectés en surface ou extraits à l'intérieur de la plante, et cela ne nuisent pas visiblement à la plante. Cette définition a été valable pour les espèces cultivables dans la plupart des laboratoires du monde au cours des deux dernières décennies. Les aspects conceptuels liés à la nature des endophytes sont controversés. Par exemple, les bactéries pathogènes doivent-elles être considérées comme des endophytes ou non, même si elles ont perdu leur virulence ? Cela indique que les bactéries endophytes peuvent éventuellement devenir nuisibles pour leurs hôtes. Les endophytes ne devraient pas nuire à l'hôte de la plante, mais qu'en est-il de la nocivité pour d'autres espèces, par exemple, lorsque des bactéries particulières qui colonisent les compartiments internes des plantes nuisent aux humains ?

Les endophytes sont des microorganismes qui passent au moins une partie de leur cycle de vie à l'intérieur des plantes. Les définitions de l'endophyte ont changé au cours des dernières années et devraient évoluer davantage au cours des prochaines années. Le terme «endophyte» a été plus couramment utilisé pour les champignons qui vivent à l'intérieur des plantes, et on a constaté, plus tard, que les parties intérieures des plantes pouvaient également être colonisées par des bactéries. Les plantes ne vivent pas seules en tant qu'entités uniques mais sont étroitement associées aux microorganismes présents dans leur environnement. L'émergence du concept de «microbiome végétal», c'est-à-dire les génomes collectifs des microorganismes vivant en association avec les plantes, a conduit à de nouvelles idées sur l'évolution des plantes où les forces sélectives n'agissent pas seulement sur le génome de la plante lui-même mais plutôt sur l'ensemble de la plante, y compris sa communauté microbienne associée. Les concepts lamarckiens de traits héréditaires acquis peuvent s'expliquer alors par le concept d'hologénome correspondant à la transmission verticale de fonctions importantes fournies par les endophytes aux plantes.

En règle générale, les endophytes les plus courants sont finalement typés comme commensaux, avec des fonctions inconnues ou encore inconnues actuellement dans les plantes. Cependant, les propriétés sont souvent testées dans une seule espèce végétale ou dans des groupes de génotypes végétatifs étroitement liés, mais rarement sur un spectre taxonomique élevé d'espèces végétales. En outre, les conditions environnementales dans lesquelles les interactions plantes/endophytes sont étudiées en conditions plutôt étroites (en culture). Les études sur les interactions plante/endophytes sont donc généralement basées en conditions contrôlées et optimisées pour la croissance des plantes hôtes et sont rarement basées en conditions variables et réalistes correspondant au terrain. Ainsi, les effets attribués aux endophytes dans les plantes saines peuvent changer lorsque les plantes hôtes sont cultivées dans des conditions moins favorables ou même stressantes de l'environnement.

En conséquence, notre compréhension actuelle des endophytes repose sur un assez petit ensemble de conditions expérimentales; des paramètres expérimentaux plus variés seraient donc nécessaires pour une meilleure compréhension du fonctionnement de l'endophyte.

Fonctions des endophytes :

Production de métabolites secondaires antibiotiques :

Les endophytes jouent un rôle significatif dans les systèmes de défense des arbres : Par exemple, dans les sapins Douglas, les endophytes peuvent induire des réactions de défense végétale, ce qu'on appelle la résistance systémique induite (**RSI**), conduisant à une plus grande tolérance aux agents pathogènes . Les souches bactériennes des genres *Pseudomonas* et *Bacillus* peuvent être considérées comme les groupes les plus courants induisant cette RSI .

Production de métabolites secondaires supplémentaires :

Les métabolites secondaires sont des composés biologiquement actifs qui constituent une source importante d'agents anticancéreux, antioxydants, antidiabétiques, immunosuppresseurs, antifongiques, anti-oomycètes, antibactériens, insecticides, nématicides et antiviraux .

Rôle vis-à-vis du fer :

Certains endophytes bactériens sont des producteurs de sidérophores . Les sidérophores, rappelons-le, sont des composés essentiels pour l'acquisition du fer par les microorganismes du sol .

Stimulation de la croissance des plantes :

Certains endophytes sont impliqués dans la promotion de la croissance des plantes, bien qu'ils favorisent la croissance au détriment de l'obtention de nutriments précieux fournis par la plante hôte. La production de phytohormones par les endophytes est probablement le mécanisme de promotion de la croissance des plantes, le mieux étudié, entraînant des changements morphologiques et architecturaux chez les hôtes de plantes . La capacité de production des auxines (hormone de croissance végétale) et des gibbérellines est un trait typique des endophytes associés aux racines. Outre la production d'hormones de croissance végétales, des mécanismes supplémentaires pour la promotion de la croissance des plantes existent.

Fixation de l'azote :

L'acquisition de nutriments pour les plantes via la fixation de l'azote est un autre mécanisme classé derrière la promotion de la croissance des plantes. Ce trait est bien étudié dans les symbioses de plantes rhizobiales et actinorhizales, comme nous l'avons décrit, mais il intervient chez les bactéries endophytes également .

De nos jours, nous avons une meilleure capacité à analyser les impacts des microorganismes envahissants sur l'ensemble de la composition et du fonctionnement de la communauté endophile et *vice versa* . Nous pouvons également mieux expliquer la résilience des plantes lors de l'invasion par des microorganismes potentiellement délétères par le fonctionnement et la complexité des communautés endophytes. Nous devons cependant en apprendre davantage sur les rôles encore inconnus des endophytes, en particulier les endophytes dits commensaux. Ce groupe, qui n'entraîne aucun effet apparent sur le rendement de la plante, mais qui vit sur les métabolites produits par l'hôte, est vraisemblablement le groupe fonctionnel le plus dominant, en quantité, parmi les endophytes. Nous nous attendons à trouver dans l'avenir, des fonctions cachées dans ce groupe et à en apprendre davantage sur la complexité des interactions microbiennes au sein des plantes, y compris les conséquences pour la plante hôte.

Classification et origines des endophytes bactériens :

La plupart des endophytes procaryotes (26%) peuvent être affectés aux *Gammaproteobacteria* dont certains genres sont pathogènes. On retiendra quelques exemples, dont les noms sont bien connus: *Pseudomonas*, *Enterobacter*, *Acinetobacter* et *Serratia*.

De même, les *Alphaproteobactéries* englobent un grand nombre (18%) de séquences endophytiques, La plupart des séquences peuvent être attribuées aux genres *Rhizobium* connus pour leurs symbioses de fixation N₂ avec des légumineuses. Les séquences de *Betaproteobacteria* (10%) comprennent 53 genres reconnus et 10 genres non identifiés d'endophytes.

Parmi les endophytes gram-positifs, la classe des *Actinobacteria* (20%) comprend divers endophytes. Dans le genre *Bacillus*, l'espèce *Bacillus thuringiensis* est bien connue pour la production de protéines cristallines à propriétés insecticides (utilisation en lutte biologique). Dans l'ensemble, la plupart des endophytes bactériennes appartiennent principalement à quatre phylas, mais elles englobent de nombreux genres et espèces. Leurs fonctions ne peuvent pas être attribuées clairement à la taxonomie et semblent dépendre de l'hôte et des paramètres environnementaux.

Il est intéressant de noter que les endophytes, qui sont transmises verticalement (via des graines), sont souvent récupérées comme des épiphytes, ce qui suggère que divers endophytes pourraient aussi coloniser les environnements immédiats des plantes hôtes.

En fait, de nombreux endophytes bactériens proviennent de l'environnement de la **rhizosphère**, qui attire les microorganismes en raison de la présence d'exsudats radiculaires et de rhizo-dépôts.

Conclusion générale

Nous avons voulu présenter succinctement, par un bref tour d'horizon et quelques exemples, la place essentielle que jouent les bactéries dans la vie. L'évolution de cette vie et le développement des organismes vivants, sur la Terre, dépend des échanges énergétiques qui ont été contrôlés dans un premier temps par des bactéries présentes dans des milieux physicochimiques très différents de ceux que nous connaissons actuellement. Au cours de plus de trois milliards d'années, les bactéries ont ainsi développé des fonctions essentielles à la vie que nous observons chez des plantes et les animaux et plus particulièrement en s'associant à ces organismes sous forme de symbioses plus ou moins étroites, dont certaines se perpétuent à travers la reproduction de ces organismes. Les microbiotes des plantes et des hommes ont été décrits. Ces symbioses mettent en relief la réalité et la complexité des échanges existant entre les cellules des organismes pluricellulaires et ces organismes unicellulaires.

N'oublions pas que sur terre, il y a plus de 10 000 milliards de milliards de milliards de bactéries!

Si nous associons le plus souvent dans notre esprit les bactéries aux maladies qu'elles engendrent, cette présentation met en évidence tous les rôles indispensables aux équilibres de notre santé et des fonctions écologiques de notre planète.

« *La maladie et le pourrissement sont biens microbiens, mais ils ne sont qu'un état exceptionnel : le chef-d'œuvre quotidien de la vie animale et végétale est cousu de microbes symbiotiques en chaque instant, en chaque organe, en chaque fonction ... Il nous faut renverser l'image trop exclusivement négative des microbes* » a écrit Marc-André Selosse dans son ouvrage récent : « Jamais Seul ».

Cette prise de conscience du rôle réel des bactéries dans le monde vivant et en particulier dans l'évolution des espèces et des écosystèmes est sans doute comme le souligne plus particulièrement ce scientifique, du même niveau de certaines grandes idées qui ont marqué la Biologie depuis un siècle !

Références :

Académie des Sciences (Douce, R. et Postaire, E.). 2016. Les origines du vivant : Une équation à plusieurs inconnues. 309pp. Gallimard.

GRAIE. Blake, G. Efficacité des filtres plantés de roseaux pour le traitement des métaux et hydrocarbures : cas des eaux pluviales. Journées de l'Eau de l'Assemblée des Pays de Savoie. 24-25 avril 2007. 155pp.

Margulis, L. 1981. Origin of Eukaryotic Cells. New-York, Yale University Press.

Martin, F., Torelli S., Le Paslier D., Barbance A., Martin-Laurence F., Bru D., Geremia R., Blake G., Jouanneau Y. . 2012. Betaproteobacteria dominance and diversity shifts in the bacterial community of a PAH-contaminated soil exposed to phenanthrene. *Envir. Pollut.* 162 (2012) 345-353.

Selosse, M-A. 2017. Jamais Seul : Ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations. 357pp ; Edit Actes Sud.

Tortora, G., Funke, B., Case, C. 2003 Introduction à la microbiologie. 947 pp. ERPI Press St Laurent (Québec).