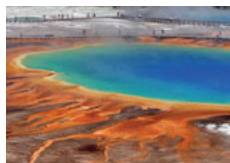


Des biofilms partout !

Ça y est, j'y suis ! Enfin ! Depuis le temps que j'en rêvais... et je ne regrette rien. Ces couleurs, elles sont encore plus belles, plus éclatantes que dans les livres. Je n'ai jamais vu un bleu turquoise aussi lumineux, limpide... Et ce contraste avec les ocres, les rouges et les oranges. Monet, et autres Van Gogh en auraient rêvé. Je n'ose même pas prendre de photos. La réalité en serait sûrement ternie. Il faut absolument que Jean voie ça un jour !

Extrait du journal de Louise – Yellowstone – Grand Prismatic Spring – Été 2010

Ces ocres, ces oranges, ces rouges, ce sont des biofilms bactériens. Louise le savait-elle ?



■ Page précédente

Le Grand Prismatic Spring (Parc de Yellowstone) tel qu'aurait pu le voir Louise. Des couleurs spectaculaires, mélange de matières minérales et de biofilms.



Biofilms en vue !

Les micro-organismes constituent la majorité de la biomasse vivante sur Terre. Bactéries, virus, champignons microscopiques, micro-algues, protozoaires... Tous sont invisibles à l'œil nu et pourtant ils sont plus nombreux que les organismes macroscopiques. La plupart, très utiles à l'équilibre de notre planète, sont peu connus du public. Quelques-uns font néanmoins parler d'eux. En bien : les bactéries lactiques des laits fermentés sont vantées pour prendre soin de nous et de notre confort intestinal. Ou en mal : *Salmonelle*, *Listeria*, et récemment des bactéries au « presque nom de grande école », les *Escherichia coli* EHEC... ont toutes fait la une des médias. Ces bactéries sont dangereuses, ce sont des acteurs des crises sanitaires. Mais sait-on que pour tous ces micro-organismes, bénéfiques ou nuisibles, le mode de vie privilégié est la vie en communauté, une vie en société si possible associée à une surface ou au moins une interface ? Alors la surface se modifie. Elle devient collante, gluante, glissante, colorée, tout dépendra de la communauté microbienne impliquée et du mucus – dit encore matrice – qu'elle sécrètera. Et sait-on que cette vie fixée les rend plus forts, plus résistants, presque indestructibles ?

Plus de 90 % des micro-organismes vivent ainsi fixés la plus grande partie de leur vie, dans leur environnement naturel. C'est ce qu'on appelle un biofilm. Dès qu'il y a de l'humidité, des nutriments et une surface, des biofilms sont susceptibles de se former. Quelle humidité ? N'importe laquelle. De la moindre flaque d'eau aux plus grands océans, de l'eau chaude des fosses hydrothermales à celle gelée des glaciers...

Quels nutriments ? Tout leur est bon. Des résidus alimentaires, un festin pour les biofilms. Du sérum humain, que demander de plus. Du pétrole, de l'essence, *Pseudomonas oleovorans* s'en délecte... Quelle surface ? De la planche à découper de notre cuisine aux rochers des déserts américains en passant par l'épithélium intestinal, peu importe. L'important, c'est de se fixer. Ça, le génie de Pasteur ne l'avait pas perçu. Quoique... Il avait démontré que les particules de poussière véhiculaient les germes. Mais savait-il qu'on en trouvait jusque dans les nuages ?

Une telle prédominance a forcément des impacts bénéfiques ou non sur notre vie passée, présente et à venir.

Si nous luttons contre le biofilm qui se forme dans ce vase en changeant l'eau, nous profiterions pendant beaucoup plus longtemps du bouquet.





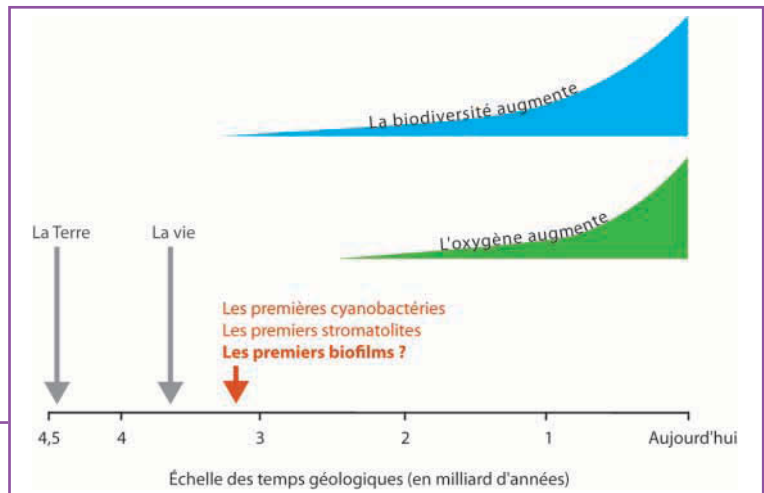
■ Que serait notre environnement sans biofilm ?

Que serait la Terre sans biofilm ? Sans bactéries, ni autres microbes ? Sûrement pas ce qu'elle est aujourd'hui. Remontons le temps.

Il était une fois... la Terre

Il y a 4,5 milliards d'années, pas d'oxygène dans l'atmosphère terrestre mais, selon certaines hypothèses, de l'azote, de l'hydrogène et du dioxyde de carbone. C'est dans cette atmosphère que les premiers composés organiques se sont formés. Ils se sont alors accumulés dans les océans. Et dans cette soupe primitive, des organismes extrêmement simples sont apparus... Ces premiers êtres vivants étaient hétérotrophes, autrement dit capables de se nourrir de cette matière organique, et bien entendu anaérobies, se développant sans oxygène. Ils ont épuisé la matière organique. La vie s'est alors adaptée, diversifiée. Où trouver le carbone nécessaire à la synthèse de biomasse ? Dans le CO_2 . Où trouver de l'énergie ? Pour certains, dans la lumière. Des bactéries pourpres auraient alors fait de la photosynthèse anoxygénique. Grâce à la lumière, elles auraient oxydé l' H_2S (ou sulfure d'hydrogène) en soufre. Mais toujours pas d'oxygène. Puis c'est la révolution. Les cyanobactéries, autres micro-organismes photosynthétiques, apparaissent et se développent. Elles produisent de l'oxygène à partir d'eau. Au début, cet oxygène réagissait avec le fer ferreux des océans et précipitait. Mais une fois le fer épuisé, c'est la grande oxydation, une catastrophe écologique... pour les micro-organismes anaérobies de l'époque. L'oxygène s'accumule dans l'atmosphère. C'est le début d'un air « respirable ».

Il était une fois la vie ! Au précambrien, l'oxygène s'est accumulé, la biodiversité a augmenté. Certaines cyanobactéries étaient organisées en colonies fixées, en tapis, en biofilms, qui se retrouvent dans les stromatolithes fossiles.





Si aujourd'hui, la plupart des bactéries vivent dans leur environnement naturel sous forme fixée, pourquoi en aurait-il été autrement autrefois ? Les cyanobactéries du précambrien se sont d'ailleurs organisées en colonies fixées, donnant les premiers stromatolithes, des roches biogéniques calcaires. Les stromatolithes fossiles, ces structures que l'on présume avoir été élaborées par des tapis – des biofilms – de bactéries et d'algues, constituent le premier indice d'importance de l'apparition de la vie sur Terre, il y a environ 3,5 milliards d'années. Ils peuvent culminer jusqu'à 3 km dans la chaîne marocaine de l'Anti-Atlas et continuent à se former aux Bahamas et en Australie.

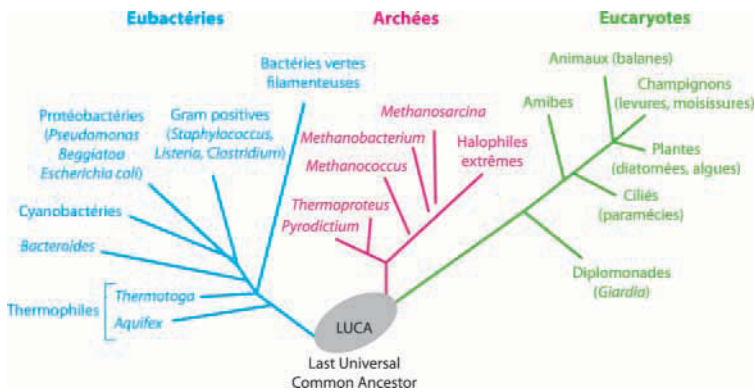
Ces dômes stromatolithiques d'Afrique du Sud ont plus de 2 milliards d'années. Ce sont des roches construites par l'activité photosynthétique des cyanobactéries.

Une majorité invisible

Cyanobactéries, archéobactéries, eubactéries ou bactéries vraies, tous des organismes unicellulaires sans noyau, des procaryotes. Ils constituent la majorité invisible. Majorité, ces quelques chiffres le montrent bien. Il y aurait $4 \text{ à } 6 \times 10^{30}$ cellules procaryotes sur Terre (10^{30} ou 1 000 milliards de milliards de milliards !), $1,2 \times 10^{29}$ dans les habitats aquatiques, $2,6 \times 10^{29}$ dans les sols et $3,8 \times 10^{30}$ dans les sédiments. 90 à 95 % des procaryotes vivent dans les sédiments, sous forme de biofilms. Les procaryotes représenteraient $3,5 \text{ à } 5,5 \times 10^{15}$ g de carbone, soit

Les domaines du vivant

Jusqu'à récemment, les scientifiques divisaient le monde vivant en deux types cellulaires : les eucaryotes et les procaryotes. Les eucaryotes se distinguent principalement des procaryotes par la présence au sein de leurs cellules d'un noyau contenant l'information génétique de l'organisme. Le terme eucaryote provient d'ailleurs du grec *eu*, vrai, et *karyo*, noyau. Les eucaryotes sont les plantes, les animaux, les végétaux, les champignons, et certains organismes unicellulaires comme les amibes. Depuis la fin des années 70, les progrès de la biologie moléculaire ont permis de distinguer deux types de cellules procaryotes : les eubactéries ou bactéries vraies (qui correspondent aux bactéries classiques) et les archéobactéries (dites encore archées). Comme les eubactéries, les archées ne possèdent pas de noyau cellulaire. Cependant, elles diffèrent de leurs consœurs par plusieurs caractéristiques cellulaires dont la composition lipidique de leurs membranes. Certaines caractéristiques génétiques et métaboliques tendent d'ailleurs plutôt à rapprocher les archées des eucaryotes. Elles sont ainsi aussi différentes des eubactéries que celles-ci sont différentes des eucaryotes.



L'arbre phylogénétique du vivant nous le montre bien : l'Homme serait plus proche d'un chêne ou d'un roseau qu'une archée ne le serait d'une *Listeria* ou d'un *Pseudomonas*.

pratiquement autant de carbone que les plantes. Et il y aurait 10 fois plus d'azote et de phosphore dans les procaryotes que dans les plantes. Invisibles, souvent mais pas toujours. Surtout lorsqu'ils se fixent (les stromatolithes en sont un signe extérieur), lorsqu'ils s'organisent en biofilm, ces structures souvent tridimensionnelles, associées à une surface, parfois engluées dans une matrice d'exopolymères. On va le découvrir.

Les champions du recyclage, les maîtres de la matière

Les biofilms sont impliqués dans les cycles biogéochimiques de la plupart des éléments. Ils oxydent, réduisent, incorporent, dégradent, minéralisent et participent au recyclage des éléments, au grand nettoyage, celui grâce auquel la vie sur Terre peut continuer pour quelques temps encore. Que ce soit le carbone, l'azote, le soufre, le phosphore, le fer, rien ne leur échappe. Ils en font leur biomasse et contribuent ainsi à la production primaire de la matière organique. On parle alors



d'anabolisme. Tout élément qui constitue la biomasse microbienne est, à un moment ou à un autre, transformé par des bactéries, souvent organisées en biofilm. Mais ce n'est pas tout, cette même biomasse et nombre de composés minéraux sont utilisés pour produire de l'énergie en tant que donneur ou accepteur d'électrons.

Si l'on considère les premiers millimètres de la surface d'un sol, on trouve de 8 à 10 milliards de micro-organismes pour 100 g de sol. Majoritairement des mycètes et des bactéries en proportions variables selon les sols. Ils sont 10 fois moins nombreux un mètre en dessous de la surface. Très peu sont libres. Ils sont fixés en micro-colonies à la surface des particules du sol, dans des pores de taille suffisamment petite pour les protéger des protozoaires. On les trouve aussi associés aux racines des plantes dans la rizosphère. Une des fonctions les plus importantes de ces biofilms du sol est de décomposer la matière organique en nutriments pour leur propre utilisation mais aussi pour celle d'autres organismes dont les plantes. Si certains « macro-organismes » sont capables de cela en aérobie, seuls des micro-organismes peuvent le faire en anaérobie. Ils évitent ainsi que le carbone soit bloqué dans une voie sans issue. Autre rôle indispensable des bactéries du sol : celui de la fixation de l'azote. 135 millions de tonnes d'azote par an seraient fixés dans les sols de cultures légumineuses, les prés et les forêts contre 45 millions de tonnes par an dans l'environnement marin. Les légumineuses fonctionnent en symbiose avec des bactéries des genres *Rhizobium* et *Agrobacterium*. Et rien ne serait possible sans une première étape de fixation, d'adhésion des bactéries aux poils racinaires. Un début de biofilm, qui disparaît lors de la pénétration des bactéries dans la plante.



Les biofilms des sols jouent un rôle fondamental dans le recyclage de la biomasse. Fixés sous formes de micro-colonies aux particules, les procaryotes sont les seuls à décomposer la matière organique en anaérobie.

Les premiers maillons de la chaîne

Pendant longtemps, on a cru que toute vie actuelle sur Terre était dépendante de la photosynthèse. Or, il y a environ 40 ans, des américains découvrent sur la dorsale océanique du Pacifique, à 2 500 m de fond – là où nulle lumière ne pénètre – des écosystèmes vivants particulièrement riches. Des bivalves géants,



Les biofilms bactériens sont des maillons indispensables pour la vie des vers tubicoles et autres organismes des grands fonds (photographie prise par le Nautile dans le bassin de Guaymas, golfe de Californie).

notamment grâce à ces biofilms que la vie abyssale a pu se développer. Pour certains, ces fosses hydrothermales présenteraient même un environnement idéal de l'apparition de la vie sur Terre.

Jusque dans les nuages

Biofilms et sol, biofilms et eau. Mais qu'en est-il des biofilms et de l'air ? L'atmosphère représente le plus grand compartiment pour la biosphère. Des bactéries y ont été détectées jusqu'à des hauteurs de plus de 70 km. Elles sont rarement libres. Elles sont fréquemment sous forme d'agrégats cellulaires véhiculés par des particules inertes. On trouve aussi des morceaux de biofilm arrachés de la surface de feuilles où ils se sont formés. Le nombre total de bactéries aériennes (5×10^{19}) apparaît cependant bas par rapport à d'autres compartiments et leur rôle est encore peu connu. On sait qu'elles peuvent faire pleuvoir et neiger en favorisant la prise de glace dans l'atmosphère. On imagine que les biofilms volants pourraient, comme tout corps particulaire, augmenter l'albédo, cette fraction de l'énergie solaire réfléchi vers l'espace. Peut-être sont-ils également capables de participer à la biochimie atmosphérique ? On ne peut que souhaiter la transformation du méthane, le 3^e gaz à effet de serre, directement dans l'atmosphère par des bactéries méthyloxydantes. Une participation au « puits biologique de méthane » qui compléterait l'élimination chimique de ce gaz par les radicaux hydroxyles. Mais ceci n'est que pure hypothèse...

des crevettes aveugles, des poissons monstrueux ont élu domicile à proximité des fosses hydrothermales et des suintements froids. Les bactéries chimiolithotrophes utilisent uniquement des minéraux pour se développer. Elles forment le premier maillon de la chaîne alimentaire de ces lieux sous-marins d'émission de sulfure d'hydrogène et autres composés minéraux. Des *Beggiatoa* orange s'étendent ainsi en tapis à proximité de vers tubicoles. C'est