

Les biofilms

Le biofilm est une communauté de microorganismes (bactéries, champignons) fixée à une surface et maintenue par la sécrétion d'une matrice adhésive et protectrice.

-Les biofilms sont des couches de microorganismes associés à un type de surface et constitués d'un seul type ou de plusieurs types de microorganismes (levures, bactéries, protozoaires ou des combinaisons de toutes ces espèces).

Les biofilms sont ubiquitaires, ils concernent le monde végétal, minéral, aquatique, technologique. C'est une structure vivante, dynamique, en perpétuel remaniement

A l'échelle de la planète, le biofilm est probablement le mode de vie dominant des bactéries.

Principaux critères

-L'importance des microorganismes est de 15% contre 85% pour la matrice extracellulaire.

-Un biofilm est une structure qui a un âge et une densité avec une limite de visibilité considérée en dessous du seuil de 10^4 cellules/cm² et au-dessus de celui de 10^8 cellules /cm².

-Les biofilms se développent souvent de manière hétérogène sous la forme de microcolonies discontinues, séparées par des espaces où circule des liquides, des molécules librement.

-Les biofilms se développent parfois de manière homogène lorsqu'ils sont organisés par des champs de forces et le plus souvent dans des conditions expérimentales.

La structure des biofilms dépend non seulement des microorganismes qui le composent, des molécules engagées dans leur formation et des variations physico chimiques de leur environnement.

Formation du biofilm

Trois critères influencent la formation d'un biofilm

- Le phénotype et le métabolisme bactérien.
- Le type et l'état de surface.
- L'environnement physico chimique et biologique.

Le biofilm se forme par exemple sur les pierres dans le lit d'un ruisseau, mais aussi sur la paroi intérieure des conduites d'eau, ce qui peut avoir des conséquences importantes sur l'hygiène de l'eau potable.

Dans le corps humain, on trouve notamment des biofilms sur les implants, ce qui provoque généralement des problèmes de santé. Mais ils peuvent aussi jouer un rôle utile en empêchant des germes pathogènes de se fixer dans le tube digestif. (Figure 04).

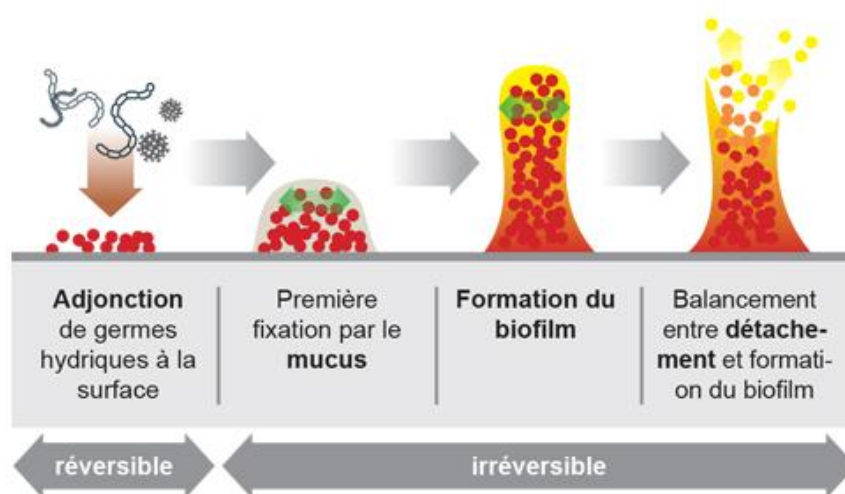


Figure 04 : Formation du biofilm.

L'adhésion

L'adhésion est une accumulation de microorganismes et de matériel extracellulaire sur une surface solide.

L'adhésion est un phénomène purement physico chimique qui est suivi de phénomènes biologiques.

Toutes les souches bactériennes n'ont pas la même capacité d'adhésion aux surfaces et des différences intra espèces existent ; selon :

- Des variations d'adhésion selon la nature et l'état de surface
- Des variations de la rugosité et des altérations des surfaces (corrosion) modifient la formation des biofilms
- Des variations d'adhésion selon les conditions physico chimique et biologique.

Il existe quatre étapes d'adhésion :

1-L'adhésion initiale (non spécifique) des microorganismes avec une entrée en contact avec la surface.

Cette adhésion est réversible

2-L'adhésion irréversible avec la formation de colonie à la surface avec des attachements par leurs organelles

3-La colonisation avec deux étapes de maturation :

*Une maturation primaire marquée par une croissance en surface, la formation d'une matrice d'exopolymères sur laquelle se développe une fine monocouche de biofilm (10 μm).

*Une maturation secondaire marquée par une croissance en multicouches donnant un biofilm important (100 μm).

4-La dispersion/dissolution par rupture des liaisons inter cellulaires et avec la matrice d'exopolymères.

-La formation, la croissance du biofilm comme la dissociation du biofilm sont dépendant de l'équilibre et du gradient des molécules biologiques circulantes autour et au sein du biofilm sous la forme de gradients de molécules signales bactériennes assurant la croissance de certaines espèces (notion de quorum sensing) et d'interactions entre molécules signales bactériennes d'espèces diverses limitant ou favorisant la croissance (notion de quorum quenching).

Rôle des microorganismes dans l'écosystème

Les microorganismes (bactéries et champignons) sont essentiels dans les fonctions clés du sol. Ils sont nécessaires pour la minéralisation de la matière organique et contribuent à une meilleure structure du sol ; ils participent à la dégradation de polluants organiques et à un meilleur état sanitaire dans les sols.

Minéralisation de la matière organique et nutrition des plantes

Les matières organiques doivent être minéralisées pour être assimilables par les plantes. Les microorganismes utilisent, pour leurs ressources nutritives, les matières organiques du sol. Celles-ci sont dégradées et des **éléments minéraux sont libérés**. Ils sont ainsi **accessibles aux plantes** dans le sol. Cela concerne **l'azote, le phosphore et le soufre** ; mais également **le potassium, le calcium, le magnésium, ainsi que le cuivre, zinc, cobalt et manganèse**.

Les champignons sont aussi les principaux êtres vivants à être capables de dégrader la lignine, un des composés principaux des végétaux. Par ailleurs certaines bactéries sont fixatrices d'azote atmosphérique et certains champignons permettent de mieux assimiler le phosphore. Elles forment des symbioses avec les racines.

Structure du sol

Les microorganismes participent à la structuration du sol, notamment par la production de molécules organiques qui contribuent à la cohésion du sol. Ainsi, comme d'autres organismes, ils permettent une **meilleure aération et un passage de l'eau**. Le trajet des racines va aussi participer à l'apparition de ces **cavités dans le sol**, qui sont les **habitats des microorganismes**.

Dégradation des polluants et état sanitaire

Certaines bactéries et certains champignons agissent sur les pesticides et autres polluants en les dégradant. Ils sont les seuls à pouvoir dégrader des contaminants particuliers très résistants, comme le chlordécone. Par ailleurs, des microorganismes étant en compétition

pour les habitats ou les ressources nutritives avec des pathogènes des plantes, ils peuvent contribuer, par leur présence nombreuse, à limiter leur prolifération ou leur implantation. D'autre part, certains participent aussi à la stimulation de la défense des plantes.

L'écosystème est un système dynamique constitué par un grand nombre d'individus vivant dans un même milieu et qui se maintient et se régularise grâce à de très nombreuses relations entre ses composants

Les eaux naturelles (écosystème aquatique) comme les eaux marines (océans) ou les eaux douces (lacs, mares, étangs, rivières...) sont des habitats microbiens très importants. Les matières organiques en solution et les minéraux dissous permettent le développement des bactéries.

Les bactéries participent dans ces milieux à l'autoépuration des eaux.

Elles sont aussi la proie des protozoaires. Les bactéries composant le plancton des milieux aquatiques sont appelées les bactérioplanctons.

Le sol est composé de matière minérale provenant de l'érosion des roches et de matière organique (l'humus) provenant de la décomposition partielle des végétaux. La flore microbienne y est très variée. Elle comprend, en plus des champignons, des protozoaires, des algues, des virus, des bactéries qui sont les représentants les plus importants quantitativement (Boulila, 2015)

(Khaldi A , 2023)

Le rôle clé des communautés microbiennes dans les fonctions des écosystèmes terrestres est assuré, bien sûr, par leur diversité taxonomique, mais le plus important est leur diversité fonctionnelle.

Généralement, la diversité fonctionnelle est définie comme la diversité des traits, qui sont les caractéristiques morphologiques, phénotypiques, biochimiques, physiologiques, structurelles, génomiques ou comportementales des organismes (Violle *et al.*, 2007). (Benaissa A, 2023)

Les interactions hôtes microorganismes

Lorsque plusieurs microorganismes cohabitent dans le même milieu, ils forment une **association microbienne** dans laquelle la croissance de chaque espèce est plus ou moins influencée par celle des autres.

A/Interactions microorganismes-sol

On distingue **6** catégories de relations entre microorganismes_sol

1. NEUTRALISME Les deux populations se multiplient sans aucune interaction. Il y a peu d'exemples de neutralisme en microbiologie du sol; en effet il est difficile pour 2 microorganismes de se développer de façon indépendante à la même place.

2. COMPÉTITION Les deux populations sont en compétition pour un même substrat ou pour un même habitat. Dans le sol, la compétition peut intervenir au niveau du substrat énergétique, d'ions minéraux nécessaires à la croissance (phosphate, magnésium) ou d'oligoéléments (fer).

3. MUTUALISME : Les deux populations ont **une influence bénéfique** l'une sur l'autre, éventuellement l'association est nécessaire à la survie des deux espèces. Ce type d'association est fréquent dans le sol, en raison des liens trophiques entre plusieurs groupements fonctionnels : fixateurs d'azotes et bactéries photosynthétiques, sulfato-réductrices et sulfo-oxydantes.

Symbiose et mutualisme

Dans le sol, les bactéries de la rhizosphère (couche de sol fixée aux racines des plantes) fixent l'azote et produisent des composés azotés utilisés par les plantes (exemple de la **bactérie Azotobacter** ou **Frankia**). En échange, la plante excrète au niveau des racines des sucres, des acides aminés et des vitamines qui stimulent la croissance des bactéries.

_D'autres bactéries dites **rhizobia** développe une symbiose avec des plantes légumineuses au niveau de nodules sur les racines ou les tiges, ces bactéries fixent à l'intérieur de ces nodules l'azote atmosphérique utilisé par la plante et en échange cette dernière leur assure les sucres, les acides aminés et les vitamines issus de la photosynthèse.

Exemple des rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes (PGPR)

Plusieurs bactéries de la rhizosphère appelées « rhizobactéries » ont montré une capacité d'améliorer la croissance de la plante (Benaissa, 2019). Ces dernières peuvent avoir des effets bénéfiques sur la croissance de la plante et sont nommées « rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes » (Plant Growth Promoting Rhizobacteria : PGPR) (Kloepper et *al.*, 1989), expression employée pour la première fois par Kloepper et Schroth (1978) spécifiquement pour les souches de *Pseudomonas fluorescens*.

_Les **mycorhizes** sont des associations symbiotiques entre des champignons du sol et les racines des plantes. Il en existe deux principaux types, les ectomycorhizes (externes aux racines) et les endomycorhizes (internes aux racines). La mycorhization des racines améliore l'alimentation hydrique et minérale de la plante.

4. COMMENSALISME : L'une des populations est bénéfiquement influencée par l'autre, la seconde n'étant pas affectée. C'est une interaction où un micro-organisme en tire un bénéfice mais l'autre n'en tire aucun, On trouve des exemples de commensalisme entre certaines **algues** qui favorisent la croissance de bactéries sans que leur propre taux de croissance soit modifié par la présence de la bactérie.

On peut citer aussi l'exemple de bactérie chimiolithotrophe nitritante **Nitrosomonas** transforme l'ammonium en nitrite alors que la bactérie chimiolithotrophe nitratante **Nitrobacter** transforme le nitrite en nitrate. Par conséquent Nitrobacter dépend de ce que Nitrosomonas lui fournit alors que le bénéfice que cette dernière tire de la présence de Nitrobacter est moins évident.

5. AMMENSALISME : L'une des populations est inhibée, l'autre non affectée. Un exemple classique est l'inhibition de la croissance d'une espèce par une substance antibiotique sécrétée dans le milieu par une autre. Ces antibiotiques sont en général libérés dans le milieu. Une association de type ammensalisme existe quand les métabolites excrétés par une espèce inhibent la croissance d'autres espèces : c'est le cas **des ions SH⁻** formés par les bactéries **sulfato-réductrices** qui inhibent la croissance de nombreux microorganismes

6. PARASITISME OU PRÉDATION Il n'y a pas de frontière nette entre parasitisme et prédation : l'ingestion d'un petit organisme par un plus gros est appelé **prédation**, la destruction d'un gros organisme par un petit est le parasitisme.

- Le parasitisme existe entre certaines bactéries dans le sol, par exemple entre **les Bdellovibrio** qui se fixent sur la membrane d'autres bactéries, pénètrent dans leur cytoplasme, s'y multiplient et font éclater la cellule hôte en libérant des bactéries filles.
- Tous les virus sont des parasites obligatoires. La plupart des protozoaires du sol sont des prédateurs de bactéries. Cette prédation joue certainement un rôle dans l'équilibre entre les groupes de microorganismes dans les sols.
- De nombreux invertébrés de petite taille sont des prédateurs des micro-algues. Leur rôle est sans doute modeste dans les sols exondés, par contre il devient important dans les sols submergés et en particulier dans les rizières irriguées

tropicales où la prédation des algues par le zooplancton est un facteur important du recyclage des éléments nutritifs et de la fertilité du sol.

B/Interaction microorganismes- milieux souterraines

Le souterrain est un habitat situé au-dessous de 8 mètres des habitats terrestres et en dessous de 10 cm des sédiments marins. Il est considéré comme le plus gros habitat colonisable sur le globe, composé généralement de roches magmatiques (basaltes, granites) et de roches sédimentaires (les argiles par exemple).

La physiologie des microorganismes et leur métabolisme doivent s'adapter à ces conditions environnementales.

(Figure 05).

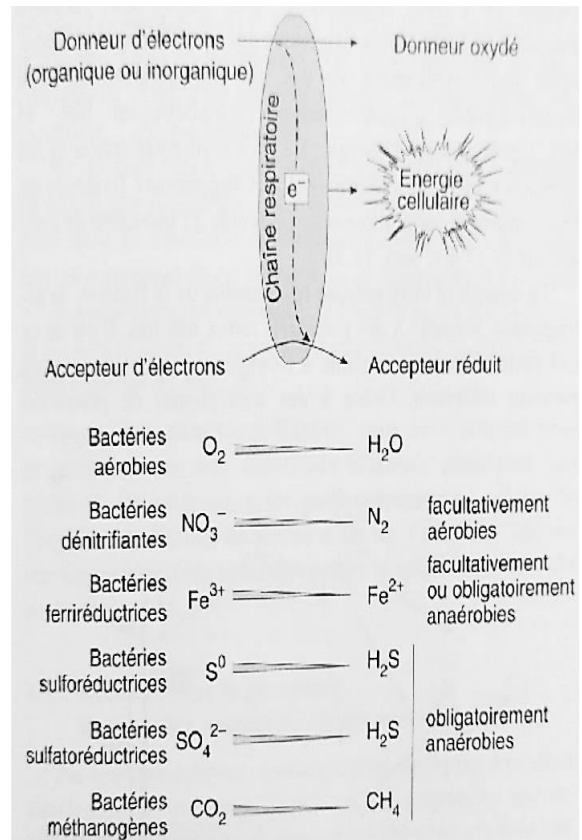


Figure 05 : Diagramme simplifié des respirations aérobie et anaérobie (Gobat et al., 2010).

Des études sur les aquifères basaltiques profonds par des méthodes moléculaires et des méthodes de culture classiques indiquent l'existence de microorganismes à métabolisme anaérobie (Bactéries Sulfato-Réductrices, méthanogènes et homoacétogènes) (Kotelnikova et Pedersen, 1997 ; Kotelnikova et al., 1998, Motamedi et Pedersen, 1998) ou thermophiles (Szewzyk et al., 1994 ; Boone et al., 1995).

Bactéries Sulfato-Réductrices « BSR »

Les microorganismes jouent un rôle majeur dans le cycle du soufre. En dehors de la réduction assimilatrice des sulfates (biosynthèse des acides aminés), les procaryotes sont responsables de toutes les biotransformations du cycle du soufre dans des conditions anaérobies (Schink, 1999). Dans les milieux sédimentaires et les systèmes hydrothermaux, les microorganismes vont réduire les sulfates sous forme de H₂S et le S₀ qui par la suite, sont oxydés par un certain nombre d'accepteurs d'électrons, y compris l'oxygène, le nitrate et les oxydes métalliques, par des processus abiotiques et microbiens (Amend *et al.*, 2004 ; Jørgensen and Nelson, 2004). De plus, la réduction des sulfates a un impact important dans la minéralisation de la matière organique (Bottinelli, 2008).

Interactions microorganismes-milieux aquatique

1. Bactéries

De par leur abondance et la diversité de leur classification et de leurs fonctions, les micro-organismes jouent un rôle important dans les flux de matière et d'énergie dans les écosystèmes aquatiques. De ce fait, les techniques d'identification, de comptage et de mesure des activités métaboliques, notamment les progrès de la microscopie à épifluorescence et de la biologie moléculaire, ont permis d'entrevoir l'extraordinaire diversité des microorganismes aquatiques. Jusqu'à présent, leurs conditions de vie et leur abondance ont été largement sous-estimées. De plus, l'amélioration significative de la méthode de séparation permet de décrire la composition biochimique de la communauté *in situ* et de traiter le transfert de substances d'un point de vue qualitatif. Tous les résultats disponibles indiquent que la relation nutritionnelle entre les micro-organismes forme un véritable réseau dans lequel le circuit microbien permet au moins partiellement de déplacer la production de microplancton vers des niveaux nutritionnels plus élevés (Amblard *et al.*, 1998). En termes de distribution et d'abondance, les bactéries sont les

deuxièmes éléments les plus abondants de la communauté microbienne aquatique après les virus (Anesio *et al.*, 2004).

2. Archeae

Les archées marines jouent un rôle important dans le plancton microbien et contribuent de manière significative aux cycles biogéochimiques, cela suggère qu'elles pourraient être associées à des métabolismes ou des stratégies de vie distincts (Hugoni *et al.*, 2013).

Les Archaea planctoniques marines ont été récemment reconnues comme étant les principaux moteurs de l'oxydation aérobie de l'ammoniac dans de nombreux écosystèmes aquatiques, ce qui suggère un rôle important dans le cycle de l'azote (Karner *et al.*, 2001 ; Francis *et al.*, 2007).

3. Virus

Les virus ont une forte influence sur l'abondance et la distribution des microorganismes dans la mer. De plus, les communautés virales dans différents habitats (eaux de mer/sédiments et régions océaniques profondes) présentaient des schémas de distribution et des propriétés génomiques spécifiques à une niche, ils infectent des clades microbiens écologiquement importants, notamment Thaumarchaeota et *Oleibacter*.

Métabolisme microbien dans les océans

Afin d'améliorer la compréhension de la microbiologie et l'écologie des habitats microbiens dans les océans, il est important de considérer les activités métaboliques des microorganismes à travers l'utilisation des substrats et l'obtention de l'énergie dans ces environnements (Orcutt *et al.*, 2011).

Cependant, l'évaluation de l'abondance et de l'activité des microorganismes dans l'océan est difficile en raison de leur faible concentration par rapport à la grande quantité de matériaux détritiques de taille et de densité similaires.

Les principales sources d'électrons dans le milieu marin profond comprennent la matière organique, l'hydrogène, le méthane, les composés soufrés réduits, le fer et le manganèse réduits et l'ammonium.

Ces donneurs d'électrons ont diverses abondances et potentiels énergétiques et diffèrent donc en importance en tant que substrats pour le métabolisme microbien.

Par conséquent, les particules et la matière organique dissoute dans les sédiments sont dégradées par l'hydrolyse et la fermentation microbiennes induites par les eucaryotes et les procaryotes pour former des molécules plus petites telles que des acides gras à chaîne courte, des alcools et des amines. Ces produits de dégradation sont ensuite utilisés par divers microorganismes et reminéralisés avec divers accepteurs d'électrons pour former du dioxyde de carbone (Orcutt *et al.*, 2011).

Outre la reminéralisation de la matière organique, la disponibilité du méthane affecte également la distribution et l'activité des microorganismes. Le méthane contenu dans ces milieux peut provenir de sources géologiques ou biologiques. Des flux élevés de suintements de méthane à gaz fournissent de la nourriture à divers écosystèmes chimiosynthétiques de microorganismes et de macrofaune (Orcutt *et al.*, 2011).

Dans les sédiments marins avec des concentrations moyennes à élevées de matière organique, l'oxygène est appauvri dans les premiers millimètres à quelques centimètres de profondeur dans le sédiment, tandis que dans les sédiments à faible teneur en matière organique, l'oxygène peut persister pendant plusieurs mètres, pénétrant dans l'océan dans certains cas : la croûte (D'Hondt *et al.*, 2009).

Microorganisme des Eaux douces

Comme pour l'eau de mer, la composition microbienne de l'eau douce des lacs et des rivières dépendra de la disponibilité du milieu en oxygène et en matière organique. Dans les rivières et les lacs où de très forts courants sous-jacents peuvent être observés en hiver, l'ensemble de la colonne d'eau sera agité, oxygéné et pourvu de matière organique. Par contre, en été, les eaux de surface

chauffées par le soleil et donc moins denses vont se déposer au-dessus des eaux plus froides et plus denses, formant ainsi une couche dans laquelle vont se fixer les micro-organismes aérobies.

La couche hypoxique sera colonisée par des microorganismes microaérophiles ou anaérobies (Corre, 2000). En effet, dans les rivières (même à forts courants d'eau), l'apport de grandes quantités de matière organique (déchets industriels, boues d'épuration) provoquera des conditions anaérobies spécifiques, qui détruiront alors sévèrement la composition de la communauté microbienne locale (exemple : eutrophisation).

Par ailleurs, il a pu être détecté des micro-organismes spécifiques tels que des bactéries sulfureuses pourpres associées aux Chromatiaceae dans la chémocline d'un lac suisse (Tonolla *et al.*, 1999), et des bactéries oxydantes d'ammonium (β -Proteobacteria) participant activement au cycle de l'azote dans les sédiments lacustres ou dans les eaux de surface (Corre, 2000).

Types de microorganismes extrêmophiles

1. Microorganismes psychrophiles

L'environnement froid représente géographiquement une partie très importante de la terre (régions polaires : Arctique et Antarctique), des régions alpines, des glaciers, du pergélisol et des océans, où la température est inférieure à 5°C à moins de 1000 mètres de profondeur. Les bactéries psychrophiles (adaptées au froid ou préférant le froid) constituent une quantité considérable de biomasse dans ces milieux (Cayol *et al.*, 2011).

La température limite à laquelle la vie bactérienne semble encore possible dans le pergélisol (partie du sol qui reste gelée toute l'année) est sans doute encore inférieure à cette valeur (Cayol *et al.*, 2011). Enfin, dans les régions polaires, le développement des bactéries sera limité par la température, et certains protozoaires flagellés ont augmenté leur capacité à absorber directement la matière organique dissoute de haut poids moléculaire, augmente

significativement afin de compenser la faiblesse de la ressource bactérienne (Sime Ngando and Yager, 1994).

En effet, à basse température, il a été constaté que la fluidité de la membrane bactérienne était réduite, ce qui était bénéfique à la synthèse des acides gras insaturés, polyinsaturés et ramifiés, accompagnée par une réduction de la longueur de chaîne hydrocarbonée. Ces modifications visent à introduire des contraintes spatiales et à réduire le nombre d'interactions au sein de la membrane en augmentant sa fluidité (D'Amico et al., 2006).

En plus de la fluidité membranaire, les enzymes des microorganismes psychrophiles doivent également s'adapter à cette température, et donc avoir une activité spécifique plus élevée que leurs homologues des microorganismes mésophiles à basse et moyenne température (Cayol *et al.*, 2011). Cependant, cette activité est toujours inférieure à leurs semblables à température moyenne, indiquant que l'adaptation au froid est incomplète (D'Amico *et al.*, 2006).

2. Microorganismes thermophiles

Les environnements tempérés naturels sont largement répandus sur notre planète et généralement associés à des zones tectoniques actives généralement associés à une activité volcanique. Par ailleurs, beaucoup d'études sur les organismes thermophiles ont été effectuées au niveau des eaux thermales dont la composition va donc dépendre de la nature des roches traversées ainsi que de la température et donc du type d'activité volcanique à laquelle elles sont associées. La température de l'eau atteint des valeurs comprises entre 150 et 350°C suivant la profondeur (Cayol *et al.*, 2011).