

Chapitre II : La microbiologie du sol

Le sol est un milieu complexe vital dont les scientifiques se limitaient à 1% de connaissance d'une communauté donnée du sol, il offre une variété de micro-habitats. C'est l'une des raisons pour laquelle une diversité microbienne dans les sols est beaucoup plus grande que dans les milieux aquatiques.

La microbiologie du sol est importante pour une multitude de raisons dont on cite : la contribution des micro-organismes terrestres aux cycles biogéochimiques de la planète et en agriculture, et en maintenant un environnement de qualité.

Dans l'écosystème terrestre la production primaire est assurée par les plantes mais le recyclage des nutriments qui s'effectue via une boucle microbienne est aussi essentiel. Chaque type de climat et de sol abrite une communauté de micro-organismes qui lui est spécifiquement adaptée.

1. Spécificité des milieux telluriques

1.1.Composition

Des particules de tailles différentes sont présentes dans le sol, la gamme de 0,1-2 mm de diamètre sont appelés sable, celles comprise entre 0,002 et 0,1 mm du limon, et celles de moins de 0,002 mm de l'argile. Un sol dans lequel aucune des particules ne domine est appelé sol limoneux.

Les sols sont composés d'au moins quatre composantes :

- ✓ La matière inorganique minérale, typiquement 40% ou plus du volume du sol,
- ✓ La matière organique, habituellement d'environ 5%,
- ✓ L'air et de l'eau, plus ou moins 50%,

Des micro-organismes et des macro-organismes, environ 5%.

1.2.Formation

Les sols ont été formés, et continuent de l'être, dans une grande variété d'environnements. Les sols peuvent être divisés en deux grands groupes:

- ✓ les sols minéraux sont issus de l'altération des roches et autres matériaux inorganiques,
- ✓ les sols organiques sont dérivés de la sédimentation dans les tourbières et les marais.

La plupart des sols sont un mélange de ces deux types. Bien que les sols minéraux prédominent dans la plupart des environnements terrestres, il y a un intérêt croissant pour le rôle que jouent les sols organiques dans le stockage du carbone.

1.3.Oxygène dans le sol

La diffusion de l'oxygène dans le sol se produit environ 4000 fois plus rapidement que celle à travers l'eau.

Les concentrations d'oxygène et les taux de flux dans les pores et les canaux sont élevés, alors que dans les zones remplies d'eau, le taux de flux d'oxygène est beaucoup plus faible.

Même dans les zones saturées en oxygène, des environnements microbiens aquatiques peuvent être créés. En effet, dans les sols gorgés d'eau, le seul oxygène présent est celui dissous dans l'eau, ce qui peut être consommé rapidement par la microflore résidente. Ces sols deviennent alors anoxique, et montrer de profonds changements dans leur activités biologiques.

1.4.Autres gaz

L'eau présente dans le sol comporte des matériaux qui y sont dissous, et le mélange est appelé la solution du sol.

Dans les sols bien drainés, l'air pénètre facilement, et la concentration en oxygène de la solution du sol peut être élevé, similaire à celle de la surface du sol. Les changements dans la teneur en eau et les flux de gaz affectent aussi les concentrations de CO₂, CO, et d'autres gaz présents dans l'atmosphère du sol. Ces changements seront accentués dans les pores plus petits où de nombreuses bactéries se trouvent. À des profondeurs inférieures l'oxygène est moins disponible, en particulier dans les sols humides, moins perméables.

Les racines des plantes sont un autre facteur affectant les niveaux d'oxygène et de CO₂ dans le sol. En effet, lorsqu'elles poussent dans les sols aérés normales, elles consomment de l'oxygène et libèrent du CO₂, en influençant les concentrations de ces gaz dans l'environnement racinaire.

1.5.Température

La température du sol et des eaux souterraines changent de façon saisonnière à une profondeur d'environ 10 m, en dessous de laquelle la température de l'eau souterraine est déterminée en grande partie par la température moyenne annuelle de la région.

La température est un facteur clé qui influe sur la croissance microbienne et les taux de biotransformation. En général, les taux de biodégradation diminuent avec la température, cependant, les effets de température peuvent être complexes.

1.6.PH

Le pH de presque toutes les eaux souterraines se situe entre 6 à 9, mais le pH des sols peut être acide dans les zones où la pluviométrie lessive les bases de ce sol, principalement dans les régions arides et semi-arides. Les sols et les eaux souterraines à faible alcalinité peuvent également devenir acides en raison de contamination par la biodégradation (par la production d'acides organiques, ou de HCl par dé-halogénéation réductrice).

Les champignons préfèrent des conditions acides alors que la biodégradation bactérienne tend à être plus rapide à des pH presque neutre. Par conséquent, la chaux est couramment ajoutée pour neutraliser le pH où l'acidité est préoccupante.

1.7.Eau

L'un des principaux facteurs qui influent sur l'activité microbienne dans le sol est la disponibilité de l'eau. La teneur en eau du sol dépend de la composition du sol, des précipitations, du drainage et la couverture végétale.

L'eau est retenue dans le sol de deux manières: soit par adsorption sur des surfaces ou libre entre les particules du sol. Il y a également de l'eau dans les canaux du sol, où les flux de masse sont important pour le transport rapide des micro-organismes leurs substrats et leurs produits.

2. La microflore du sol

La plupart des procaryotes du sol sont localisés à la surface des particules. Ils ont besoin d'eau et de nutriments qui doivent être dans leur voisinage immédiat. On trouve le plus souvent les procaryotes sur les surfaces, dans les pores du sol (2 à 6 μm de diamètre). Là il risque probablement moins d'être mangé par les protozoaires, que ceux qui se trouvent exposés à la surface externe d'un grain de sable ou d'une particule de matière organique.

La population microbienne est très dense. Dans un sol de surface, la population bactérienne, mesurée au microscope, peut approcher les 10^9 à 10^{10} cellules par gramme de poids sec de

terre. Les champignons peuvent développer jusqu'à plusieurs centaines de mètres de hyphes par gramme de sol.

Les producteurs primaires prédominants sont les végétaux et non les algues bien que celles-ci et les cyanobactéries soient capables de se développer à la surface des sols.

2.1. Les bactéries

Dans un sol organique, la population bactérienne diminue avec la profondeur, et elle est parfois plus grande à 160 cm qu'à la surface du sol. Dans un sol ombragé de forêt, la population la plus importante se trouve fréquemment dans le premier ou les deux premiers centimètres du sol; dans le sol des champs, au contraire, elle se situe à plusieurs centimètres sous la surface de la croûte supérieure du sol.

- La biomasse bactérienne est de l'ordre de 1000 à 2000 kg/ha dans les sols peu peuplés, et de 3000 à 7000 kg/ha dans les sols très riches. Dans la plupart des sols, la biomasse bactérienne est inférieure à la biomasse fongique, mais supérieure à la somme des biomasses des algues, protozoaires et nématodes.

- Les conditions énergétiques, physiques, chimiques et biologiques qui règnent dans le sol et qui conditionnent le comportement et les réactions de la microflore tellurique sont désignées sous le terme global d'environnement édaphique.

- Les bactéries du sol sont en majorité des chimioorganotrophes, c'est-à-dire des organismes tirant leur énergie de la dégradation de la matière organique. Le groupe des bactéries chimolithotrophes est aussi important, parce qu'un grand nombre des processus qu'accomplissent ces bactéries sont essentiels pour la production des récoltes.

- Diverses bactéries sont capables de fixer l'azote atmosphérique et de le rendre ainsi disponible pour les plantes. Certaines vivent pour cela en symbiose avec des plantes: *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Frankia*, etc, alors que d'autres vivent librement dans le milieu, comme *Azotobacter*, *Azospirillum* et les Cyanobactéries dans les rizières. D'autres bactéries jouent également des rôles prépondérants dans les cycles de certains éléments fertilisants, comme les bactéries nitrifiantes *Nitrosomonas* et *Nitrobacter* ou les bactéries acidifiantes du cycle du soufre *Thiobacillus*.

- Certaines bactéries sont pathogènes et peuvent causer de gros dégâts aux cultures: *Erwinia carotovora* sur carottes, *Xanthomonas fragariae* sur fraisiers, *Pseudomonas syringae* sur

curcubitacées, etc. D'autres bactéries protègent par contre les plantes contre des agents pathogènes.

Parmi les facteurs qui influencent la nature et les activités biochimiques de la flore bactérienne du sol, on signalera en particulier l'humidité, l'aération, la température, le pH, la matière organique et les éléments inorganiques.

2.2. Les champignons

Les champignons filamenteux terrestres établissent des ponts dans les zones entre les particules du sol ou des agrégats, et sont ainsi exposés à des niveaux élevés d'oxygène. Ces champignons ont tendance à former des structures imperméable à l'oxygène, comme les sclérotés et des cordes hyphales. Ceci est particulièrement important pour le fonctionnement des basidiomycètes, qui forment des structures étanche à l'oxygène. Dans ces structures, les champignons filamenteux déplacent les éléments nutritifs et l'eau sur de grandes distances, y compris à travers les espaces aériens. Ces polymérisations oxydatives ne se produisent habituellement pas chez les champignons aquatiques.

Dans la plupart des sols cultivés et bien aérés, les champignons représentent cependant la plus grande partie du protoplasme microbien total. La biomasse des microchampignons est comprise entre 100 et 1000 kg/ha.

- Les genres le plus fréquemment observés dans le sol sont les suivants : *Penicillium*, *Fusarium*, *Mucor*, *Aspergillus*. La microflore des champignons apparaît comme étant beaucoup plus variée.
- Les facteurs externes qui influencent la croissance et la multiplication des champignons dans le sol sont l'état de la matière organique, le pH, l'humidité, la température, les saisons, l'aération, les fertilisants organiques et inorganiques, etc.
- Les champignons sont hétérotrophes, ce qui signifie que ni la lumière solaire ni l'oxydation des substances inorganiques ne peuvent leur fournir l'énergie nécessaire à leur croissance. Ils ont donc besoin de substrats organiques oxydables.
- Les phycomycètes décomposent rarement la cellulose et la lignine; alors que certains basidiomycètes décomposent cette dernière.
- Certains phycomycètes et deutéromycètes attaquent les amibes (protozoaires) et les nématodes (vers), ce qui contribue à limiter l'activité de ces organismes dans le sol.

- Il existe des espèces qui peuvent dégrader la cellulose, l'hémicellulose, l'amidon et la lignine. Les champignons filamenteux peuvent transformer une grande variété de composés organiques et inorganiques.
- Les champignons, à l'exception de quelques espèces, concourent à la dégradation de la matière végétale et animale et participent à la formation de l'humus à partir de résidus organiques bruts.

2.3. Les actinomycètes

Les actinomycètes sont des micro-organismes unicellulaires et filamenteux que l'on situe entre les bactéries et les champignons dont ils sont voisins.

- Les actinomycètes sont présents un peu partout dans la nature, venant après les bactéries dans l'ordre d'abondance des micro-organismes. Ils représentent la principale portion de la population microbienne normale des sols et des boues des lacs et des rivières. Dans les endroits alcalins et secs, leur population peut être spectaculaire. Les recherches signalent par exemple que les actinomycètes représentent 95 % des organismes dans certaines localités en raison probablement de l'alcalinité du sol.
- Les actinomycètes sont plus encouragés par les milieux secs qu'humides. Leur nombre est plus élevé dans les champs et pâturages que dans les sols cultivés. Ils sont défavorisés par un milieu à pH acide. Les sols des régions de climat chaud sont plus favorables à la croissance et à la reproduction des actinomycètes que ceux des régions de climat plus froid.
- La plupart des actinomycètes du sol sont aérobies. Ils peuvent utiliser le carbone à partir de molécules simples ou complexes telles que: acides organiques, sucres, polysaccharides, lipides, protides et hydrocarbures aliphatiques. Plusieurs espèces décomposent la cellulose, plusieurs autres dégradent l'amidon, l'inuline, la chitine et la lignine. L' NH_4^+ , les NO_3^- , les acides aminés, les peptones et un certain nombre de protéines sont utilisés comme source d'azote.
- Les actinomycètes sont habituellement représentés par les formes saprophytes qui sont essentielles dans le processus de dégradation de résidus organiques complexes. Possédant la capacité de produire des substances odoriférantes en quantité décelable par l'organisme humain, le plus souvent d'odeur terreuse, ils en imprègnent fréquemment l'eau. Le charbon actif, à une concentration d'environ 10 mg/l, est très efficace pour réduire ces odeurs terreuses. De nombreux actinomycètes produisent des antibiotiques.

2.4. Les algues

Les algues ne sont jamais aussi nombreuses dans le sol que les bactéries, les actinomycètes ou les champignons. Elles sont présentes en grand nombre là où la lumière accède et/ ou l'humidité est adéquate. Les techniques de dénombrement ont permis de déceler de 100 à 10 000 cellules d'algues vivantes par gramme de sol à partir d'échantillons prélevés immédiatement sous la surface d'un sol composé de terre arable. Exceptionnellement, on a pu trouver dans certains sols jusqu'à 50 000 de ces cellules par gramme de sol.

- C'est en raison du besoin de lumière solaire que l'on trouve les algues surtout dans les 5 à 10 premiers centimètres du sol; en dessous, la population d'algues diminue rapidement avec la profondeur.

- Les principaux facteurs qui influencent la flore des algues sont l'humidité et le pH.

- Les *Chlorophyceae* (algues vertes) et les *Cyanophyceae* (algues bleues) sont moins sensibles à la sécheresse que les diatomées. Les fleurs d'eau se produisent surtout en saison fraîche, humide, durant laquelle l'intensité lumineuse n'est pas nécessairement à son maximum.

- Chaque espèce d'algues possède un pH optimal de croissance. Les *Cyanophyceae* (algues bleues) se trouvent dans les sols neutres ou alcalins; on ne les trouve pas dans les sols dont le pH est inférieur à 5, et quelques-unes seulement sont présentes dans les sols dont le pH se situe entre 5 et 6. Les diatomées fréquentent peu les sols acides, mais elles sont nombreuses dans les sols calcaires. Les *Chlorophyceae* (algues vertes) sont moins limitées par le pH, et elles dominent dans la flore d'algues des lieux acides, du fait de l'absence d'autres formes.

2.5. Insectes et d'animaux

Ils sont aussi présents dans les sols, et ceux-ci utilisent souvent les champignons et les bactéries comme sources de nourriture, ainsi que les résidus de transformation, ce qui peut entraîner une diminution de leurs développements. Les vers de terre, avec leur capacité à mélanger et à ingérer les sols, rejettent des bactéries et des enzymes de leurs intestins, ce processus est important pour la structure du sol et sa communauté microbienne. Les vers de terre aident également à mélanger les matières organiques du sol. Dans les zones forestières, qui n'ont pas autant de vers de terre, une couche plus distincte de la matière organique sera formée, et qui sera séparée de la couche inorganique sous-jacente

3. La microflore et écosystème terrestre

3.1. Interactions avec le milieu, les végétaux et la faune

L'interaction est un caractère fondamental du vivant tout comme le métabolisme. Elle prend des formes diversifiées particulièrement chez les micro-organismes. Ces derniers interagissent non seulement entre eux mais aussi avec des plantes, les animaux et leur milieu. Les interactions peuvent être conflictuelle ou bénéfiques.

- Les interactions conflictuelles ont un effet négatif sur l'un ou plusieurs partenaires. Parmi elles, on trouve la compétition, l'amensalisme, le parasitisme.

- Les interactions bénéfiques sont au contraire bénéfiques sur l'un ou plusieurs intervenants. Parmi elles, on trouve la coopération, mutualisme, symbiose, commensalisme.

3.1.1. Interaction microorganismes-milieu

- Les microorganismes agissent à divers niveaux sur leur milieu. Ils jouent des rôles essentiels dans les cycles biogéochimiques des éléments nutritifs et dans la formation de l'humus. Ils sont également primordiaux par exemple pour la biodégradation des produits étrangers xénobiotiques (qui n'existent pas à l'état naturels comme les pesticides). Ainsi, plusieurs matières actives de synthèse pour la protection des plantes pourraient voir leur efficacité pratique compromise par une biodégradation accélérée provoquée par leur utilisation répétée.

- L'effet des microorganismes du sol sur la structure du sol est également très important. Grâce aux liants qu'ils produisent et aux hyphes des champignons qui agissent comme une sorte de filet, la structure du sol peut être nettement améliorée et stabilisée. Ceci a un effet positif sur l'aération du sol et sur son équilibre hydrique, et d'autre part protège le sol contre l'érosion.

- Enfin, certains microorganismes sont également capables de modifier le pH du sol, ce qui influence la solubilité de certains éléments nutritifs. D'un autre part, les microorganismes sont fortement dépendants et influencés par la régulation des disponibilités en eau et en oxygène du sol ainsi que par la température et le pH de leurs milieux et même la présence des xénobiotiques.

3.1.2. Interactions des microorganismes-végétaux

Les plantes sont la principale source de matière organique dont la plupart des micro-organismes du sol dépendent ; en outre, les plantes sont fortement colonisées par des

microorganismes, beaucoup d'entre eux ont développé des relations étroites avec les végétaux (commensalisme, mutualisme, pathogènes).

Différents types de micro-organismes sont associés aux feuilles, tiges, fleurs, graines et aux racines. La communauté microbienne influence directement ou indirectement les plantes. Cette communauté inclut des micro-organismes qui se développent à la surface de la plante ou épiphytes, et à l'intérieur des cellules végétales ou endophytes.

On distingue aussi des microorganismes de la phyllosphère (se trouvent sur les surfaces et dans les parties aériennes des plantes) et microorganismes de la rhizosphère et du rhizoplan (la rhizosphère est représentée par le volume de sol autour de la racine. La surface de la racine de la plante est appelée rhizoplan).

3.1.3. Interactions des microorganismes- faune

Il existe de nombreuses relations qui peuvent être symbiotiques mutuelles et même pathogènes entre de microorganismes et des invertébrés. Par exemple:

- *Buchnera* est une bactérie endosymbiote des aphides (puceron). Elle vit à l'intérieur des cellules de l'insecte et lui fournit des acides aminés essentiels.
- La bactérie *Wolbachia* est hébergée dans des organes génitaux de certains insectes (ex: les moustiques). Cette bactérie peut contrôler les capacités de reproduction de son hôte.
- Des bactéries sont associées aux termites et leur apportent des sources d'azote et de carbone.
- D'autres colonisant le rumen (flore intestinale) des herbivores permettent la digestion de la cellulose par ces animaux, de la même manière, certaines bactéries colonisent le jabot d'un oiseau folivore (consommateur de feuilles), le Hoazin (*Opisthocomys hoasin*). Ces bactéries permettent la digestion de la cellulose.

4. Associations des micro-organismes du sol avec les végétaux

4.1. Les interactions conflictuelles:

Le sol en général et la rhizosphère en particulier regorgent d'innombrables microorganismes dont une partie peut directement attaquer les racines et leur causer des dégâts plus ou moins importants pouvant conduire jusqu'à la mort de la plante: les agents pathogènes. Ceux-ci appartiennent pratiquement à toutes les familles de champignons et de bactéries. Souvent, la plante n'est pas attaquée par un seul pathogène mais par un complexe parasitaire. On distingue:

- Les microorganismes **pathogènes facultatifs** peuvent également vivre de manière saprophyte, c'est à dire de se maintenir et de se développer sur des débris organiques en absence de la plante hôte. tels les *Pythium* présent dans la plupart des champs cultivés. Souvent, ils ne sont pas des pathogènes très agressifs et ne causent d'importants dégâts aux plantes que lorsque les conditions sont défavorables à ces dernières.
- Les agents **pathogènes obligatoires**. Ceux-ci ne peuvent se développer qu'en présence de leur plante hôte. En absence de celle-ci, ils peuvent subsister dans le sol pendant une certaine période grâce à des formes de résistances; toutefois, celles-ci ne restent pas indéfiniment viables et, comme ils ne peuvent se développer sans la plante hôte, ne sont plus observable dans une terre n'ayant pas hébergé la plante hôte pendant un certain temps. Lorsque la plante hôte est présente, ces agents pathogène sont souvent très agressifs et peuvent causer de très importants dégâts. Un exemple typique de cela est l'hernie du chou: l'agent pathogène, *Plasmodiophora brassicae* (*champignon*), se développe sur les racines des crucifères et cause des excroissances importantes sur les racines.
- De nombreux microorganismes de sol peuvent réduire la production végétale sans causer véritablement de symptômes typiques sur les plantes, mais en les affaiblissent ou en les stressant un peu. On parle alors de **pathogènes mineurs**. Suivant les conditions environnementales ou l'état physiologique de la plante, certains de ces pathogènes peuvent alors également devenir des «pathogènes typiques». Exemple, le champignon *Pythium ultimum* peut causer de très gros dégâts aux très jeunes plantes et causer la fonte des semis. A partir d'un certain âge, la plante devient cependant résistante et peut se développer malgré la présence de ce champignon. Celui-ci continue tout à influencer négativement la croissance de la plante et, sans causer de véritables symptômes, et réduire le rendement des plantes.

Du point de vue pathologique, les bactéries jouent surtout un rôle dans les situations très humides et chaudes. Certaines bactéries pénètrent les racines, principalement par des blessures, et se développent ensuite dans les vaisseaux de la plante, pouvant causer sa mort (*Xanthomonas fragariae* sur fraisiers). D'autres peuvent causer de gros dégâts aux plantes en créant une macération des tissus végétaux avec des enzymes (comme *Erwinia carotovora* sur carotte). Les bactéries sont très importantes dans la rhizosphère des plantes, où elles peuvent jouer un rôle important, soit en affaiblissant la plante avec des sécrétions de toxines ou d'enzymes de macération.

Remarque: Les divers agents pathogènes se différencient également de part de leur spectre des plantes qu'ils attaquent. Certains, comme les responsables des fontes de semis *Pythium et Rhizoctonia*, peuvent attaquer des plantes de diverses familles. D'autres, comme le piétin échaudage *Gaeumannomyces graminis var. tritici*, n'attaque qu'une espèce de plantes. D'autres enfin, comme les fusarioses vasculaires, sont extrêmement spécialisées et chacune de leurs souches ne causent des dégâts qu'à certaines variétés de la plante hôte.

4.2. Les interactions bénéfiques

4.2.1. Mutualisme et symbiose:

Les plantes interagissent étroitement avec les micro-organismes aussi bien par leurs racines que par et la surface des feuilles ; et même plus au niveau de leur tissu vasculaire ou encore au niveau de leurs cellules. La plupart des mutualismes entre les plantes et les micro-organismes accroissent la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes ou augmentent leurs défenses contre les agents pathogènes. Parmi ces phénomènes mutualistes on peut citer:

a. Microorganismes antagonistes importants:

De nombreux microorganismes travaillent pour la santé des plantes et les protègent contre les agents pathogènes. Ces microorganismes utiles, champignons ou bactéries, appartiennent en partie aux mêmes familles que certains microorganismes pathogènes: *Fusarium*, *Pseudomonas*, *Bacillus*. Parmi toutes les souches d'une espèce de microorganismes, certaines sont très efficaces alors que d'autres ne montrent aucune action bénéfique sur la santé des plantes, ou même dans certains cas peuvent lui être néfaste, ces organismes utiles, sont appelés **antagonistes**. Les mécanismes de protection des antagonistes comprennent des phénomènes de compétition (pour le fer, pour les sites d'infection, pour les nutriments), le parasitisme, la production de cyanide ou d'antibiotiques, production de substances de croissance de la plante, induction de résistance dans la plante, dégradation des toxines du pathogène.

- La souche Fo47 de *Fusarium oxysporum*, protège par exemple diverses plantes contre des fusarioses vasculaires.
- Les *Trichoderma* font partie des champignons antagonistes, ils habitent la plupart des sols et montrent une action contre un grand nombre de champignons parasites. Ils produisent une grande variété d'antibiotiques jouant un rôle important dans la protection des plantes.
- Les bactéries les plus connues comme antagonistes sont les *Pseudomonas* fluorescents, les *Bacillus*, (comme *B. subtilis*) et certains actinomycètes (comme *Streptomyces* spp.).

b. Les mycorhizes:

Ce sont des associations symbiotiques entre des champignons filamenteux 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.

c. Actinorhizae

Des relations actinorhiziennes, se produisent également. Celles-ci sont formées par l'association de souches de *Frankia* avec huit familles de plantes non légumineuses. Elles fixent l'azote et sont importantes, en particulier pour les arbres et les arbustes. Les membres du genre *Frankia* sont à croissance lente.

d. Microorganismes formant des nodules racinaires : Rhizobia

Les 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.

5. La fixation d'azote : symbiose légumineuses-Rhizobium

C'est un mutualisme plante-bactérie d'une grande importance pour l'homme « légumineuses/ bactéries fixatrices d'azote ». Les partenaires de la symbiose sont appelés symbiotes. Les bactéries symbiotiques fixatrices d'azote jouent un rôle encore plus important dans la croissance des plantes pour la production agricole, peuvent se développer librement dans le sol ou infecter les plantes portant un nom générique « *Rhizobia* » et appartiennent à plusieurs genres. Les genres *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, et d'autres infectent les racines de légumineuses telles que : le soja, les haricots, les pois, les arachides, la luzerne, le trèfle..... (Dont la plupart sont des plantes buissonnantes ou de petits arbres trouvés dans des sols pauvres dans de nombreuses parties du monde). Les *Rhizobiums* sont spécialement adaptés pour certaines espèces de légumineuses, sur lequel ils forment des nodules racinaires. L'azote est ensuite fixé par un procédé symbiotique de la plante et des bactéries. La plante fournit des conditions anaérobies et des nutriments de croissance pour les bactéries, les bactéries fixent l'azote qui peut être incorporé dans des protéines végétales.

Rhizobium infecte et nodule spécifiquement les légumineuses. La bactérie possède un grand plasmide qui est vital pour l'infection et la nodulation de la plante hôte

5.1.Régulation de l'oxygène dans les nodules : la Leghémoglobine

En l'absence de son symbiote bactérien, une légumineuse ne peut pas fixer N₂. Par contre Rhizobia , peut fixer le N₂ lorsqu'il est cultivé en culture pure dans des conditions de microaérophilie (un environnement pauvre en oxygène est nécessaire parce que les nitrogénases sont inactivées par une forte concentrations de O₂) . Dans le nodule les niveaux d'O₂ sont contrôlés par la protéine leghémoglobine O₂. La production de cette protéine contenant du fer est induite par l'interaction de la plante et les partenaires bactériens. La leghémoglobine fonctionne comme un " tampon d'oxygène " entre la forme oxydée (Fe³⁺) et la forme réduite (Fe²⁺) de fer non lié pour garder un niveau bas d'O₂ dans le nodule. Il ya une spécificité marquée entre les espèces de légumineuses et les rhizobiums qui peuvent établir une symbiose. Une espèce de rhizobium particulière est capable d'infecter certaines espèces de légumineuses, mais pas les autres. Si les légumineuses sont inoculées avec la souche spécifique de rhizobium, ceci implique une abondance en leghémoglobine, alors des nodules fixateurs d'azote se développent sur les racines

5.2.Étapes de Formation des nodules

1. Une reconnaissance du partenaire correct à la fois par la plante et par la bactérie et l'attachement de la bactérie aux poils de la racine.
2. La sécrétion de molécules de signalisation d'oligosaccharides (facteurs nod) par la bactérie.
3. L'invasion bactérienne des poils de la racine.
4. Mouvement des bactéries à la racine principale par l'intermédiaire du canal d'infection.
5. Formation de cellules bactériennes modifiées (bactéroïdes) dans les cellules et le développement de l'état de fixation d'azote par les plantes.
6. La division cellulaire bactérienne et celle de la plante continue et on observe la formation du nodule mature.

Un autre mécanisme de formation de nodules qui ne nécessite pas de facteurs nod est utilisé par certaines espèces de rhizobia phototrophes. Ce mécanisme n'a pas encore été élucidé, mais semble nécessiter la production bactérienne de cytokinines. Les cytokinines sont des hormones végétales, des dérivés d'adénine ou phénylurée, nécessaires pour la croissance et la différenciation cellulaires

5.2.1. L'attachement et l'infection

Les racines des légumineuses sécrètent des composés organiques qui stimulent la croissance d'une communauté microbienne diversifiée de la rhizosphère. Si les rhizobiums inoculés sont spécifiques, ils forment de grandes populations et finalement s'attachent aux poils de la racine. Une protéine d'adhésion appelée **rhicadhesine** est présente sur les surfaces des

cellules de rhizobium. D'autres substances, telles que les **lectines** et des récepteurs spécifiques dans la membrane cytoplasmique des plantes, jouent également un rôle dans l'attachement plante - bactérie. Après l'attachement, une cellule rhizobienne pénètre dans les poils de la racine qui se courbe en réponse à des substances excrétées par la bactérie. La bactérie provoque ensuite la formation par la plante d'un tube cellulosique, appelé canal d'infection, qui s'étend vers le bas des poils de la racine. Les cellules adjacentes sont ensuite infectées par les rhizobiums, et des cellules végétales se divisent. La division cellulaire de la plante continue constitue le nodule tumoral

5.3. Bactéroïdes et les nodules racinaires

Le rhizobium se multiplie rapidement dans les cellules végétales et se transforme en cellules gonflées, difformes, et ramifiées appelées bactéroïdes. Une microcolonie de bactéroïdes est alors entourée par des portions de la membrane cytoplasmique de la plante pour former une structure appelée le symbiosome, et c'est seulement après la formation du symbiosome que la fixation de N_2 commence. La fixation de N_2 nécessite la nitrogénase. La nitrogénase des bactéroïdes présente les mêmes propriétés bio-chimiques que l'enzyme des bactéries fixatrices de N_2 vivant en liberté, y compris la sensibilité à O_2 et la capacité de réduire l'acétylène ainsi que N_2 . Les bactéroïdes dépendent de la plante pour le donneur d'électrons pour la fixation de N_2 . Les principaux composés organiques transportés à travers la membrane du symbiosome et dans les bactéroïdes sont les intermédiaires du cycle de l'acide citrique, en particulier les acides organiques en C4 succinate, malate, et fumarate. Ces intermédiaires sont utilisés comme donneurs d'électrons pour la production d'ATP, convertis en pyruvate, ce dernier est alors utilisé comme source d'électrons pour la réduction de N_2 . Le produit de la fixation de N_2 est l'ammoniaque (NH_3), et la plante assimile la majeure partie de cette NH_3 par formation de composés d'azote organiques. La glutamine synthétase, enzyme d'assimilation du NH_3 est présente en grande quantité dans le cytoplasme de la cellule végétale et peut convertir le glutamate et NH_3 en glutamine (fig. 11). Ceci est un exemple de transport de composés d'azote organique par les bactéries fixatrices d'azote dans la plante.

Lorsque la plante meurt, le nodule se détériore, libérant les bactéroïdes dans le sol. Bien que les bactéroïdes soient incapables de division, un petit nombre de cellules de rhizobium dormants sont toujours présents dans le nodule. Ces cellules prolifèrent, en utilisant certains des produits de la dégradation du nodule comme nutriments. Les bactéries peuvent ensuite déclencher l'infection de la prochaine saison de croissance ou de maintenir une existence libre dans le sol

5.4. Autre exemple de nodules : Rhizobiums formant des nodules sur les tiges

Bien que la plupart des légumineuses forment des nodules fixateurs d' N_2 - sur leurs racines, quelques espèces de légumineuses portent des nodules sur leurs tiges. Ce type de légumineuses est très répandues dans les régions tropicales où les sols ont souvent une carence en azote par lixiviation et l'activité biologique intense. Le système le mieux étudié est celui de *Sesbania* une légumineuse aquatique tropicale, qui est infectée par *Azorhizobium caulinodans*. Les nodules se forment généralement sur la partie immergée de la tige ou juste au-dessus du niveau de l'eau, avec une formation qui ressemble à celle des nodules racinaires : attachement, formation d'un canal d'infection, et la formation des bactéroïdes

6. Le sol et la santé humaine

Les hommes sont en contact constant avec les sols, tout comme avec les eaux. Ce peut être un contact direct, lorsque les enfants ou les adultes jouent avec la boue, ou lorsqu'ils mangent des feuilles et des racines de légumes, couverte de poussière. Dans la plupart des cas, ce contact est inoffensif. Cependant, les sols contiennent une grande variété de micro-organismes pathogènes. Ce dont ceux-ci ont besoin, c'est une porte d'entrée et des conditions favorables dans ou sur le corps humain.

Une grande variété d'anaérobies, dont *Clostridium*, sont présents dans les sols. A moins d'une blessure profonde qui fournirait l'environnement anaérobie nécessaire à leur croissance, ces anaérobies posent peu de problèmes.

Des blessures de ce type arrivent cependant lors de guerres ou d'accidents, et peuvent conduire à la gangrène. C'était une cause importante d'issue mortelle chez les militaires avant l'arrivée de la microbiologie moderne et des antibiotiques.

Les sols contiennent d'autres pathogènes. Des organismes comme *Acanthamoeba*, qu'on peut inhaler avec la poussière, peuvent provoquer des méningo-encéphalites amibiennes primaires, quand les sols sont utilisés pour le dépôt en surface d'ordures non traitées, une grande variété de pathogènes peuvent se transmettre, y compris des protozoaires comme *Acanthamoeba*, et *Cyclospora*. L'emploi de fumiers d'origine humaine comme engrais a entraîné une vaste contamination des fruits et légumes frais et a eu des répercussions internationales.

Lorsqu'ils se développent dans les constructions, les micro-organismes, peuvent aussi devenir préoccupants. Ce problème fréquent est en augmentation, souvent du à l'inondation de maisons située dans les régions basses ou à l'accumulation de l'humidité aux abords des

évier et dans les salles de bain (même dans de grandes maisons modernes) a des conséquences importantes sur la santé.

C'est particulièrement grave lorsque l'eau imprègne les murs des maisons. Dont 50% des maisons présentaient des problèmes de moisissures, sources importantes d'infection chronique des sinus ainsi que l'augmentation de l'asthme. Les principaux champignons responsables sont *Stachybotrys chartarum*, *Eurotium herbariorum* et *Aspergillus versicolor*.

La croissance fongique donne un mucus noir. Celui-ci sèche et il ne reste qu'une couche poussiéreuse d'où les spores peuvent se disperser dans l'air. En outre *Mycobacterium komossens* et des bactéries à Gram négatif productrices d'endotoxines en ont été aussi isolées.