

## Résumé : Microbiologie du sol

Les micro-organismes du sol, principalement les bactéries, les champignons, les actinomycètes, les protozoaires et les algues microscopiques, jouent un rôle fondamental dans le fonctionnement des écosystèmes terrestres. Ils interviennent dans la dégradation de la matière organique, le recyclage des éléments nutritifs, la formation et la structuration du sol, ainsi que dans la promotion de la croissance des plantes grâce à des interactions symbiotiques.

### I. Spécificité de l'écosystème tellurique

#### 1. Structure physique complexe

Le sol est un système complexe et hétérogène, composé de quatre éléments fondamentaux interagissant constamment : la matière minérale, la matière organique, la solution du sol et l'atmosphère du sol. La **matière minérale** représente la fraction inorganique du sol et dérive de la roche mère. Elle est constituée de **composants primaires**, tels que le quartz (silice), les feldspaths (sources d'aluminium, de potassium, de calcium...), et d'**éléments secondaires**, comme les argiles et les oxydes de fer et de manganèse, issus de la transformation chimique des minéraux primaires par les processus d'altération.

La **matière organique**, quant à elle, est formée par la décomposition de résidus végétaux et animaux. L'humus, sa forme stable, est un composant essentiel qui améliore la structure du sol, sa capacité de rétention en eau et sa fertilité chimique, tout en servant de substrat énergétique à une grande diversité de micro-organismes.

La **solution du sol** correspond à la phase liquide, composée d'eau et de substances minérales et organiques dissoutes. Cette eau est retenue dans le sol par des **forces capillaires** au sein des agrégats et circule selon un gradient de potentiel hydrique. Elle contient une variété de nutriments disponibles (monosaccharides, acides aminés, ions ammonium, phosphates, potassium, etc.) indispensables à la croissance des plantes et à l'activité microbienne.

Enfin, l'**atmosphère du sol** occupe les pores non saturés d'eau. Elle se distingue de l'air atmosphérique par sa **teneur plus élevée en dioxyde de carbone** (jusqu'à 10 fois plus) et sa forte humidité, conséquence de l'activité respiratoire des micro-organismes et des racines. Elle contient aussi de l'azote ( $N_2$ ), de l'oxygène ( $O_2$ ), du dioxyde de carbone ( $CO_2$ ), ainsi que des **gaz transitoires** tels que le méthane ( $CH_4$ ), le sulfure d'hydrogène ( $H_2S$ ), l'ammoniac ( $NH_3$ ), et d'autres composés organiques volatils (alcools, esters, acides gras). Lorsque la concentration en oxygène descend en dessous de 1 %,

les conditions deviennent anaérobies, entraînant des processus microbiens spécifiques comme la **dénitrification**, la **réduction des sulfates** ou la **méthanogenèse**, qui modifient profondément la chimie du sol.

## 5. Fonctions écologiques essentielles

Les micro-organismes telluriques assurent des fonctions majeures :

- **Décomposition de la matière organique** : recyclage des nutriments.
- **Cycle biogéochimiques** : azote, carbone, soufre, phosphore.
- **Stabilisation de la structure du sol**.
- **Biorémediation** : dégradation de polluants organiques et inorganiques.
- **Symbioses bénéfiques** : ex. les mycorhizes et les bactéries fixatrices d'azote.

## 6. Influence des facteurs abiotiques

La température, le pH, l'humidité, la texture du sol, et la teneur en nutriments influencent directement la composition et l'activité microbienne. Chaque type de sol (argileux, sableux, limoneux) héberge ainsi une communauté microbienne particulière, adaptée aux conditions locales.

## II.3. Les propriétés du sol

Les propriétés du sol déterminent sa fertilité, sa capacité à héberger la vie microbienne, et son aptitude à soutenir la croissance végétale.

### 1. Propriétés physiques

Les propriétés physiques du sol concernent sa texture, sa structure, sa porosité, sa densité, sa capacité de rétention en eau et sa température.

- **Texture** : Elle dépend de la proportion relative des particules minérales (sable, limon et argile). Elle influence directement l'aération, la perméabilité, la rétention d'eau et la disponibilité des nutriments.
- **Structure** : Elle décrit l'agencement des particules du sol en agrégats. Une bonne structure favorise la circulation de l'eau, de l'air et des racines, tout en offrant des habitats variés aux micro-organismes.
- **Porosité** : Correspond à l'ensemble des vides du sol. Elle conditionne la rétention d'eau, l'infiltration, l'aération, et donc l'activité microbienne.

- **Capacité de rétention en eau** : C'est la quantité d'eau que le sol peut retenir après drainage. Elle dépend de la texture, de la structure et de la teneur en matière organique.
- **Température du sol** : Elle influence la vitesse des réactions biochimiques, la germination des graines, et l'activité des enzymes et des micro-organismes.

## 2. Propriétés chimiques

Les propriétés chimiques du sol régissent la disponibilité des éléments nutritifs et les équilibres ioniques.

- **pH du sol** : Il mesure l'acidité ou la basicité du sol. La majorité des micro-organismes du sol sont actifs dans un pH proche de la neutralité (entre 6 et 7).
- **Capacité d'échange cationique (CEC)** : Il s'agit de la capacité du sol à retenir et échanger des cations ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ...).
- **Teneur en nutriments** : Le sol contient des macronutriments (azote, phosphore, potassium, calcium, magnésium, soufre) et des oligoéléments (fer, zinc, cuivre, manganèse, etc.) essentiels au développement des plantes et des micro-organismes.
- **Présence de polluants** : Les métaux lourds, les pesticides, les hydrocarbures ou autres substances toxiques peuvent affecter l'équilibre chimique du sol et réduire sa fertilité.

## III. Microflore tellurique

Elle constitue la base du réseau trophique souterrain et joue un rôle capital dans le fonctionnement, la fertilité et l'équilibre des écosystèmes terrestres.

### 1. Les bactéries du sol

Les **bactéries** représentent le groupe le plus abondant et le plus diversifié dans le sol. Elles peuvent atteindre jusqu'à  $10^9$  cellules par gramme de sol et appartiennent à des dizaines de phylums différents. Les plus dominants dans les sols sont :

- **Proteobacteria** : regroupe de nombreuses bactéries rhizosphériques, incluant des fixatrices d'azote (*Rhizobium*, *Azospirillum*) et des bactéries promotrices de croissance (PGPR).
- **Actinobacteria** : notamment *Streptomyces*, qui produisent des enzymes de dégradation de la lignine, des antibiotiques naturels, et participent à la formation de l'humus.
- **Firmicutes** : groupe résistant, capable de former des spores (ex. : *Bacillus*), souvent actif dans la décomposition en milieu stressant ou pauvre.

- **Acidobacteria** : abondants mais encore mal connus, souvent présents dans les sols acides ou peu perturbés.
- **Bacteroidetes** : spécialisés dans la dégradation des polymères complexes.

Les bactéries remplissent des fonctions clés telles que la **décomposition de la matière organique**, la **minéralisation des nutriments**, la **fixation biologique de l'azote**, la **nitrification**, et la **solubilisation du phosphore**. Certaines bactéries forment des biofilms ou des associations symbiotiques avec les plantes, jouant un rôle crucial dans la santé végétale et la structuration du sol.

## 2. Les champignons telluriques

Les **champignons** représentent 60 à 90 % de la biomasse microbienne dans de nombreux sols, avec un réseau mycélien pouvant s'étendre sur plusieurs mètres dans quelques grammes de sol. Ils comprennent : **Champignons saprophytes** (*Aspergillus*, *Penicillium*, *Trichoderma*) : décomposent les matières organiques complexes comme la lignine, la cellulose ou la chitine.

## 3. Les actinobactéries

Ce sont des **bactéries filamenteuses**. Elles forment un réseau mycélien, résistent à la dessiccation, et dégradent des substrats très complexes. Certaines, comme *Streptomyces*, produisent des antibiotiques naturels et **des** enzyme extracellulaires puissantes (cellulases, xylanases).

## 4. Les archées

Longtemps sous-estimées, les **archées** sont aujourd'hui reconnues comme des membres importants de la microflore du sol. Elles jouent un rôle crucial dans **La nitrification**, **La méthanogenèse** et **La tolérance aux conditions extrêmes**.

## 5. Protozoaires et nématodes

Les **protozoaires** (amibes, ciliés, flagellés) sont des micro-eucaryotes prédateurs qui se nourrissent de bactéries. Ils régulent la population bactérienne, stimulent la **minéralisation du N** (en libérant de l'ammonium après digestion).

## 6. Algues microscopiques

Présentes principalement en surface, notamment dans les sols humides ou exposés à la lumière, Elles réalisent la photosynthèse, enrichissent le sol en carbone organique et contribuent à la stabilisation du sol.

## 7. Virus du sol

Les **bactériophages** et virus de champignons sont omniprésents dans les sols, mais encore peu étudiés. Ils modulent les communautés microbiennes par **lyse cellulaire**, participent aux **cycles des nutriments** via la libération intracellulaire et contribuent à la dynamique évolutive des micro-organismes par transfert horizontal de gènes.

## IV. Interactions avec la faune, les eaux et les végétaux

Les interactions entre la microflore, la faune, l'eau et les plantes ne sont pas indépendantes. Elles s'intègrent dans un **réseau écologique dynamique** appelé **holobionte sol-plante**.

### 1. Interactions des micro-organismes avec les végétaux

#### Bactéries bénéfiques : PGPR

- Les **Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR)** comme *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Rhizobium*, et *Bacillus* favorisent la croissance végétale par :
  - Fixation de l'azote atmosphérique
  - Solubilisation du phosphore et du potassium
  - Production d'auxines, cytokinines, gibbérellines
  - Induction de résistance systémique (ISR) contre les pathogènes Champignons mycorhiziens
- Les **Glomeromycota** forment des **mycorhizes arbusculaires**, qui facilitent l'absorption du phosphore, du zinc et de l'eau.
- Ils échangent des nutriments contre des sucres produits par la plante via un réseau souterrain (mycélium extramatriciel), agissant comme des **médiateurs biogéochimiques**.

#### Microbiome endophyte

- Certains micro-organismes vivent à **l'intérieur des tissus végétaux** (racines, tiges, feuilles), sans provoquer de maladies.
- Ils améliorent la **tolérance au stress** (sécheresse, salinité), modulent l'expression génétique de la plante et renforcent ses défenses

## V. Le cycle de l'azote dans le sol

L'azote se trouve dans le sol sous différentes formes :  $N_2$  (gaz),  $NH_4^+$  (ammonium),  $NO_2^-$  (nitrite),  $NO_3^-$  (nitrate). La transformation de l'azote d'une forme à une autre est assurée essentiellement par l'action des micro-organismes, ce qui constitue le cycle de l'azote.

### V.1. Fixation biologique de l'azote

L'**azote atmosphérique (N<sub>2</sub>)**, qui constitue 78 % de l'air, est la forme la plus abondante mais la moins directement utilisable par les êtres vivants. Seules certaines **bactéries et archées** sont capables de le fixer grâce à une enzyme appelée **nitrogénase** (complexe enzymatique sensible à l'oxygène, composé de la dinitrogénase et de la dinitrogénase réductase).

Les micro-organismes fixateurs d'azote peuvent être :

- **Libres dans le sol** : *Azotobacter*, *Clostridium*, **cyanobactéries** (ex. : *Anabaena*).
- **Symbiotiques avec les légumineuses** : *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, qui induisent la formation de **nodules racinaires** où se déroule la fixation.

## V.2. Ammonification (minéralisation)

L'**ammonification** est le processus par lequel l'azote organique (provenant de la dégradation des acides aminés, acides nucléiques, urée...) est transformé en **ammoniac (NH<sub>3</sub>)** par des bactéries hétérotrophes. Selon l'humidité du sol :

- En sol **sec**, le NH<sub>3</sub> s'échappe sous forme gazeuse.
- En sol **humide**, il se transforme en **ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)** :



## V.3. Nitrification

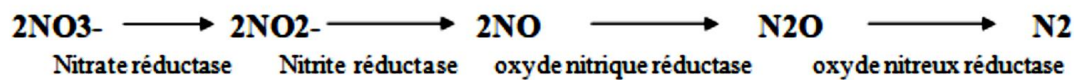
La **nitrification** est une **oxydation microbienne aérobie** en deux étapes :

1.  $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$  par *Nitrosomonas*
2.  $\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$  par *Nitrobacter*

En conditions **anaérobies**, des bactéries **anammox** (ex. : *Brocadia*, *Kuenenia*, *Scalindua*) peuvent convertir directement  $\text{NH}_3 + \text{NO}_2^- \rightarrow \text{N}_2$ , un processus rencontré surtout dans les **sédiments, les eaux usées et les milieux pauvres en oxygène**.

## V.4. Dénitrification

La **dénitrification** est la **réduction du nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)** en gaz azotés (NO, N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>), ce qui assure le **retour de l'azote à l'atmosphère**. Ce processus est **facultatif anaérobie**, réalisé par des micro-organismes hétérotrophes lorsque l'oxygène est absent, notamment dans les **sols saturés en eau**.



Microorganismes impliqués : *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Bacillus*, *Agrobacterium*, *Flavobacterium*.

## Exemple de symbiose : *Rhizobium* – Légumineuses

La symbiose entre les bactéries du genre *Rhizobium* et les plantes légumineuses (pois, haricots, trèfle, luzerne, soja...) est un exemple emblématique de fixation symbiotique de l'azote atmosphérique dans le sol.

### 1. Reconnaissance et signalisation moléculaire

La plante sécrète dans le sol des flavonoïdes racinaires, qui sont perçus par *Rhizobium*. En réponse, la bactérie synthétise des facteurs Nod (nodulation), des signaux chimiques spécifiques qui déclenchent :

- La déformation des poils absorbants
- La formation d'un tube d'infection par lequel la bactérie pénètre dans la racine.

### 2. Formation des nodules racinaires

Une fois dans les tissus végétaux, *Rhizobium* colonise les cellules corticales, provoquant la formation de nodules : structures spécialisées dans lesquelles les bactéries se transforment en bactéroïdes, formes physiologiquement actives fixatrices d'azote. Le développement des nodules est régulé par des gènes de nodulation (Nod) chez *Rhizobium*.

### 3. Fixation de l'azote

Dans le nodule, l'enzyme nitrogénase catalyse la réduction de l'azote moléculaire ( $\text{N}_2$ ) en ammoniac ( $\text{NH}_3$ ).