

# Écologie des sols

Interraction nombreuses entre les plantes

Ecologie importante pour la santé et la production

Milieu physique, chimique et organismes

On rajoute des plantes qui ont une forte influence sur les communautés des etres-vivants

Les sols rendent de nbs services : croissance végétaux, régulation eau, habitat, ressources génétiques, épuration de l'eau, régulation de l'atmosphère, réserve de matériaux => services écosystémiques (service rendu à l'Homme gratuitement par les écosystèmes)

Service de production (économique)

Microorganismes dans l'espace poral du sol

Fonctionnement global d'un sol : état organique, structure du ol & biodiversité du sol

La biodiversité, une assurance pour l'avenir : loi écologique forte

Biodiversité => Productivité (fertilité, santé des plantes) & Stabilité (résistance, résilience) => durabilité (des productions, du patrimoine biologique)

La biodiversité n'a pas toute la même résistance à une perturbation => pour maintenir la fonction (malgrès que ce ne soit pas les mêmes μorgas)

Organismes dans le sol :

- porags (bactéries, chmpignons)
- microfaune (nématodes : tardigrade (décomposeurs))
- mésofaune (acariens)
- macrofaune (fourmis, diptères)
- mégafaune (vertébrés)

Combien d'espèces dans un sol :

- 1m2, 20 cm de prof : 1000 invertébrés, 400-500 acariens, 60-80 collemboles, 90 nématodes, 60 protozoaires, 20-30 enchytréides, etc
- 1 000 000 d'espèces bactériennes
- 100 000 espèces de champignons

Les mycéliums permettent la stabilité structural

Le carbone du sol (bactéries, champignons) représente environ 6-10 UGB / ha

Les fonctions biologiques :

Microorganismes : ingénieurs chimiques : cycle biogéochimique

Microfaune : régulateurs biotiques

Méso-macrofaune : ingénieur de la litière

Macrofaune et racines : ingénieurs du sol

Prédateurs

Bioagresseurs

Fonction biologiques pour des services écosystémiques

Recyclage des nutriments, transformation du carbone, régulation des populations, maintenance de la structure du sol => rendre des services écosystémiques

Services agrosystémiques

On peut représenter l'ensemble des interactions des microorganismes du sol sous la forme d'un réseau trophique (phytophages, microorganismes, décomposeurs)

Organisation du réseau trophique en 3 grands compartiments : ingénieurs de l'écosystème, décomposeurs de la litière, micro-réseau trophique

Les principaux organismes du sol et leurs fonctions

### **Microfaune : nématodes et protozoaires**

(> 60 familles de nématodes identifiées et dénombrées)

Problèmes sur les plantes mais aussi nématodes bactériophages, carnivores, fongiphages, omniphages => activité de prédation et accélération de cycles biogéochimiques

-> près des racines, là où y'a à manger

-> indicateur de la qualité du sol et des perturbations

Amibes (protozoaires) : vie sur film d'eau, proche des racines => exerce activité de prédation sur les bactéries : accélération du recyclage des éléments nutritifs

### **Les Arthropodes**

Collembolles : détritivores, microbivores plus de 6000 espèces connues

Acariens : échantillon d'un sol de forêt : diversité des microarthropodes et dominance des acariens : décomposition de la Mo, prédateurs, parasites; 48 000 espèces décrites

Les carabes ; auxiliaire précieux

Limaces chassées par des carabidés (famille très diversifiée) ou des staphylinides

Les araignées : prédateurs très mobiles, se nourrissent de nématodes, vers de terre et autres arthropodes, jusqu'à 200 ind/m<sup>2</sup> de sol

### **Ingénieurs du sol : vers de terre**

3700 espèces de vers décrites dans le monde, en France, principalement la famille des lombricidae

- épigés (surface horizontale)
- anéciques (galeries verticales, lent et sensible aux perturbations)
- endogés (galeries profondes horizontales)

Ce n'est pas tout à fait la vérité, il y a des épi-anéciques, ...

VdT hermaphrodite : né mâle, puis échange leur gamète mâles, deviennent femelle puis s'autoféconde, formation de cocons de VdT

Fertilité variable selon les espèces : anécique (12 cocons / an) et épigés (une centaine de cocons / an)

Le développement du cocon : 9 mois pour l'anécique et 45 jours pour l'épigé  
Développement en fonction du nombre de perturbations, les anéciques auront plus de mal à recoloniser le milieu que les épigés

OPVT : observatoire des Vers de Terre

Période de léthargie : biodisponibilité de l'eau (quand il n'y en a pas assez)

Vie au ralenti avec enroulement sur eux-même : loquette d'estivation

Léthargie en hiver, au printemps, été, automne : quand le sol est trop sec

Intérêts :

- ingénieur des écosystèmes
- sensible aux modifications de l'environnement
- facile à prélever, à observer et à déterminer
- Méthodes standardisées
- bioindicateur de la qualité biologique des sols

Lombriciens comme acteurs & indicateurs du fonctionnement du sol

- 1 - Fragmentation et incorporation de la matière organique : mûrissent
- 2 - Brassage matières organique et minérale
- 3 - création de porosité et d'agrégation biologiques
- 4 - stimulation de l'activité des microorganismes

Conséquences environnementales et agronomiques

Augmenter l'infiltration de l'eau et limiter le ruissellement, limiter les problèmes d'érosion du sol

Augmenter la rétention d'eau, aug RU, aug des éléments nutritifs donc aug potentiel de dégradation

Augmenter la dynamique des nutriments  
Augmenter la stabilité structurale, aug rugosité => baisse du ruissellement  
=> limite l'érosion et limite les pollution, améliore la production de biomasse

**Les principaux organismes du sol et leurs fonctions** = bactéries + champignon

Bactéries : 1-2µm, organismes procaryotiques  
Champignon : > 10µm, organismes eucaryotiques  
Grande diversité dans les sols

Assurance écologique : lien biodiversité - fonctionnement biologique du sol

Érosion de la biodiversité du sol = réduction de la minéralisation de la MO =>  
Baisse de la fertilité biologique du sol (eutrophisation; acidification, déstructuration du sol)

Lien diversité microbienne - productivité végétale

Érosion de la biodiversité du sol = réduction de la Production animale

Lien diversité microbienne - santé des sols => biodiversité = barrière aux espèces invasives (pathogènes)

Car les pathogènes deviennent de moins bons compétiteurs

Si maladies fongiques d'un écosystème = dysfonctionnement

Lien diversité microbienne = fonctions, services

Dégradation de la MO => fourniture éléments minéraux (N,P,K,S) => fertilité,  
fourniture du ciment organique => cohésion du sol, stockage du C => fertilité,  
GES

Dégradation de produits exogènes (xénobiotique) -> dégradation minéraux  
lourds, pesticides => bioremédiation

Occupation des habitats du sol -> barrière aux pathogènes => santé du sol

Les microorganismes du sol contribuent à la qualité du sol, de l'air et de l'eau  
Biodégradation des pesticides, effets sur la qualité du sol, effet due la qualité de  
l'eau

## Cycle du carbone

Apport de MO -> enfouissement -> humification/minéralisation -> éléments  
minéraux assimilés par les plantes ou nappe phréatique

Les fonctions biologiques et biogéochimiques : le cycle de la MP : rôle de la  
biocénose

Dégradation MO par les organismes du sol : lignine et cellulose

Rôle des murgas

MO (surtout végétale) -> hydrolyse enzymatique -> "métabolisme" -> assimilation (biomasse microbienne vivante), sécrétion (mucus pour matière humiques plus stables), minéralisation ( $\text{CO}_2$ , sels minéraux,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{PO}_4$ )  
Synthèse beaucoup plus efficace quand c'est aérobie

Évolution respective des différents compartiments impliqué lors de la décomposition des résidus de cultures

Baisse des résidus, puis pic de biomasse microbienne, aug MO humifié et relargage de  $\text{CO}_2$  logarithmique

Les conditions environnementales modifient les vitesse de minéralisation des matières organiques des sols

- teneur en eau du sol
- aération
- température
- teneur en N minéral dans le sol
- protection physique des MOS
- composition biogéochimique

Deux Mo ne se valent pas en fonction de leur composition chimique

La lignine est difficile à dégrader

Localisation des MO dans le sol et l'humification font dépendre la minéralisation

## Cycle de l'azote

$\text{N}_2$  - Fixation azote -  $\text{NH}_4$ , voie de fixation symbiotique et une voie dite libre  
Amonification ->  $\text{NH}_4^+$

Dénitrification  $\text{NO}_3^-$  ->  $\text{NO}_2^-$  ->  $\text{N}_2\text{O}$  ->  $\text{N}_2$

Ammonification : processus de transformation oxydatifs des formes azotées contenues dans la MO (AA, protéines) en ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) ou ammonium ( $\text{NH}_4^+$ )

$\text{NH}_4^+$  => source principale d'azote pour les végétaux et champignons

La plupart des plantes l'assimilent via les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ )

Sources organiques très diverses

Microorganismes très variés ( *Bacillus clostridium*, *Proteus*, *Pseudomonas*, *Streptomyces*, ... )

Ammonification => hydrolyse des polymères, désamination aérobie et désamination (va produire  $\text{NH}_4^+$ )

Nitrification

Oxydation microbienne des formes réduites de l'azote dans le sol ( $\text{NH}_3$  et  $\text{NH}_4^+$ )

2 étapes : nitritation -> nitratisation

2 groupes bactériens impliqués : bactéries nitreuses et bactéries nitrifiantes

Bactéries autotrophes et aérobie obligatoires

Nitrification hétérotrophe peut être réalisée par les champignons et certaines espèces bactériennes

Nitritation (bactéries ou archées bactéries de types Nitroso)  $\text{NH}_4^+ + 3/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2^- + \dots + \text{E}$

Nitratation (bactéries de type Nitro)  
 $\text{NO}_2^- + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + \text{E}$

Grande diversité des bactéries nitrifiantes

Conditions environnementales à la nitrification ( $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_3^-$ )

Les bactéries nitrifiantes sont de faibles compétitrices par rapport aux autres bactéries qui utilisent  $\text{NH}_4^+$

Les  $\text{NH}_4^+$  seront mobilisés par les microorganismes pour qu'ils puissent dégrader les MO complexes

Consommation d' $\text{O}_2$  (aérobie stricte)

Nitrates dénitrifiés (par voie gazeuse)

Volatilisation de l'ammoniac

Réduction chimique du nitrate et nitrite

Lixiviation du nitrate

réduction biologique (De  $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{N}_2$ )

Réduction biologique des nitrates en gaz azoté : NO,  $\text{N}_2\text{O}$  et  $\text{N}_2$

Grande variété de bactéries hétérotrophes

$\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O}$  (GES très important)  $\rightarrow \text{N}_2$

$\text{N}_2\text{O}$  produit par les sols et les marais

Pour passer de  $\text{N}_2\text{O}$  vers  $\text{N}_2$  : condition pH très spécifique : sol proche de la neutralité

Conditions environnementales de dénitrification dans le sol

Les activités de nitrifications sont importantes autour de la particule de sol

Tandis que la dénitrification se fait plutôt à l'intérieur de l'agrégat

On estime qu'à partir de 60% des pores remplis d'eau, la dénitrification devient bcp plus importante

En dessous, il s'agit de la nitrification

La fixation biologique de l'azote atmosphérique

$\text{N}_2$  (Inerte)  $\rightarrow 2 \text{NH}_3$  (assimilable)  $\Rightarrow$  nitrogénase = Consommation de 16 ATP

Coûteux en énergie, lent et peu efficace, réduction de  $\text{N}_2$  en  $\text{NH}_3$  nécessite la mobilisation de 20 gènes, appelés *Nif* gènes

2 voies de fixation de l'azote atmosphérique

- voie symbiotique : fabacées (rizhobium), bétulacées (Frankia)

- voie associative : Graminées (PGPR) (soumis à la pression en  $\text{O}_2$ )

(Gobat et al, 2003)

Union physique des partenaires : liaison sans partage

Les symbiotes échangent des nutriments ou des facteurs de croissance de manière exclusive sans que ceux-ci n'apparaissent dans le milieu extérieur

Les bactéries diazotrophique, capacités de mobilité (flagelles ; gram(-)) : genre *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Mesorhizobium*, *Azorhizobium*

Nodules sur les racines (ou aérien : *Sesbania rostrata*)

Fabrication des nodules par communication chimique

La rhizosphère va avoir des composés carbonés volatiles provenant des racines des plantes (exudats) pour attirer ou repousser les bactéries

Les composés vont réveiller les bactéries rhizobium, pour qu'elle aillent se fixer à un endroit par chimiotactice.

Les flavonoïdes (composés de la plante) va lancer le facteur Nod (interaction entre le poil absorbant et la racine) pour lancer la fabrication des nodules

Bactéries Gram + filamenteuse (abondant dans sol forestier) *Frankia*

Ressemble à un champignon mais est bien une bactérie

Bactéries libres (+ PGPR) != bactérie symbiotiques associatives

Bactéries libres : demande forte en C et en E

Diazotrophe phototrophe ou hétérotrophes

Phototrophes fixent plus de N que les hétérotrophes

Une symbiose modifie la conformation de la plante, ainsi que son comportement  
Les bactéries dites libres ne modifient pas les cellules de la plante, elle nécessite d'avoir une quantité de ressources proche d'elle, donc se développe près des racines

Les bactéries PGPR sont les bactéries en assoc' ou en symbiose, favorisent la croissance de la plante, avec un mode d'action très variés, une même population peut cumuler plusieurs propriétés => les bactéries libres font partie de cette catégorie

Les fonctions de ces bactéries :

- stimulation et régulation de la croissance racinaire  
Imitent des hormones végétales : phytohormones (auxine, éthylène : stimuler la croissance directe des plantes), réguler les concentrations hormonale de la plante
- amélioration de la nutrition des plantes  
Concentration en éléments minéraux, solubilisation du phosphate inorganique, sécrétion de sidérophores (chélation du fer), fixation de N<sub>2</sub>, mucilage favorisant les échanges d'ions et d'eau
- protection des racines contre les parasites  
Production de composés inhibiteurs (acide cyanhydrique, ...), compétition

avec les parasites, stimulation (induction) des mécanismes de résistance des plantes

## Les champignons

Peuvent s'attaquer à des formes très stables du carbone, augmentent l'accumulation de MO, retiennent les nutriments dans le sol, la fixation des particules de sol

Mycorhize : champignon qui vit en symbiose avec un végétal

La plupart des plantes (sauf chénopodiacées et brassicacées) cultivées sont mycotrophes => le champignon est un collecteur de sels minéraux => translocation des éléments minéraux d'un point vers un autre via le champignon

-> transfère les éléments minéraux ainsi que l'eau, ce qui va améliorer la compétitivité de la plante

Le champignon de Paris n'est pas une mycorhize parce qu'il n'y a pas de plantes en assoc'

Pour les plantes cultivées, il s'agit des mycorhizes de type arbusculaires (+ 200 espèces), champignon microscopique, donc invisible

Les champignons que l'on mange sont généralement de types ectomycorhize

Les mycorhizes protègent contre les pathogènes racinaire et aussi peuvent modifier le métabolisme et la physiologie des plantes

La symbiose demande néanmoins une dépense d'énergie, donc s'il y a bcp de phosphore dans le sol, la plante va se passer des mycorhizes pour récupérer l'élément en question

Les variétés modernes de blé ont toujours la capacité de faire de la symbiose, mais cette symbiose n'est pas active

## Les communautés

Les indicateurs de présence de communautés d'organismes

Méthode TSBF : permet de comptabiliser la mésofaune et la macrofaune (cloporte, VdT) mais on ne peut pas accéder aux espèces très mobiles

Méthode Barber : on place un pot dans le sol pour étudier les arthropodes épigés

Extraction McFayden : pour le contrôle de la microfaune

Méthode d'extraction des nématodes : nématodes vivants donc frais, élutriation (nétoygae avec de l'eau)

Extraction des vers de terre par la moutarde ou via un test bêche



Monde microbien : estimation par la respiration, le taux de décomposition de la MOS, taux de nitrification, dénitrification et diverses activités enzymatiques  
Quantité : Mesure des constituants cellulaires ; biomasse C,N ou P ou de phospholipides

On récupère l'ARN pour avoir une meilleure vue des gènes impliqués et fonctionnels mais aussi les protéines pour connaître la fonction de la protéine et donc la fonction de la communauté microbienne

IFT : indice de fréquence de traitement

L'évolution du réseau trophique de la nématofaune en fonction de la gestion des sols

Les indicateurs d'enrichissement (EI) montre le flux nutritif qui va vers les plantes (surtout dans les écosystèmes très perturbés)

L'indice de structure (SI) montre la complexité du réseau de nématodes

La mise en jachère fait passer le sol de perturbé vers quelque chose de plus stable avec EI qui baisse et SI qui augmente

La fertilisation est une perturbation du sol, donc EI va monter et SI baisser