

## Chapitre 2 : caractéristiques et propriétés biologiques des sols

Nous venons de voir dans la partie précédente les caractéristiques et propriétés physiques du sol. Pour certaines, elles vont être en lien direct avec les êtres vivants du sol ; mais nous allons voir que ceux-ci peuvent aussi modifier les caractéristiques et propriétés chimiques du sol.

Nous commencerons par une partie générale sur la biologie du sol, puis nous verrons plus en détails quelques exemples :

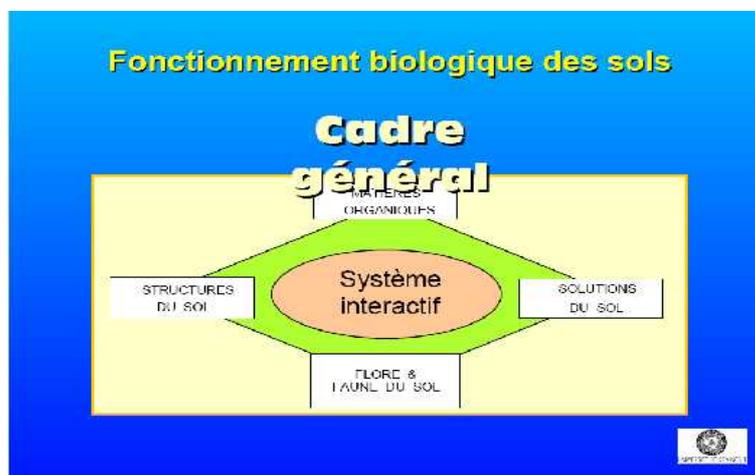
- ◆ les vers de terre (lombrics)
- ◆ la plante, au travers de sa racine et le fonctionnement particulier de l'interaction racine/sol (rhizosphère), avec des interactions racine/bactéries et racines/champignons (mycorhizes)
- ◆ les bactéries du sol
- ◆ quelques 'bioagresseurs' du sol

### 1. Notions de base sur les Propriétés biologiques du sol

#### 1.1 Le sol est un système interactif

La présence de racines, d'animaux et de micro-organismes dans le sol est en interaction avec ses propriétés physiques et chimiques (structure, dynamique MO, solution du sol...).

#### 1.1.2 Interaction entre biologie et physique du sol



Cette présence d'êtres vivants est synonyme d'activité biologique. Celle-ci est en interaction :

- ◆ à long terme sur sa composition physique et sa dynamique (transformation des minéraux, enrichissement en MO via les producteurs primaires : les végétaux, évolution des MO)
- ◆ À court terme sur sa structure (qui elle-même définit un 'comportement' physique du sol en terme de porosité, de circulation des fluides, eau et air) et la stabilité de cette structure

- ◆ Ces liens peuvent être envisagés dans l'autre sens : par exemple, une structure avec très peu de porosité aura un impact direct sur la biomasse du sol...

### 1.1.3 Interaction entre biologie et chimie du sol :

- ◆ Les êtres vivants vont être des facteurs clefs dans les cycles des éléments. Ils peuvent les faire passer d'une forme organique à minérale (minéralisation) ou, à l'inverse, de la forme minérale à organique (on parle d'organisation ou de rétrogradation). De plus, ils peuvent (surtout les bactéries), faire passer les éléments d'un état oxydé à un état réducteur (ou vice-versa)

### 1.1.4 Exemples concrets de ces interactions

Par exemple :

-la nature chimique et physique du sol change lorsqu'il passe dans les intestins des vers ou à proximité d'une racine.

-Les bactéries à proximité des racines vont rendre disponibles pour la plante les éléments nutritifs.

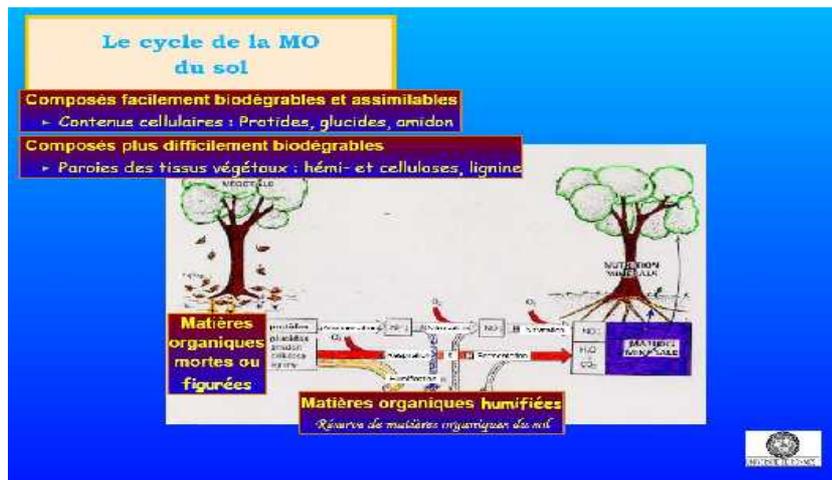
-Les résidus de plantes ont en soi peu de valeur nutritive dans la forme dans laquelle ils retournent au sol. Les organismes du sol, qu'ils soient grands (macro-organismes) ou petits (micro-organismes), se nourrissent toutefois de ces résidus et les décomposent dans un processus continu.

## 1.2 Le sol et sa composante biologique forment un système hiérarchisé



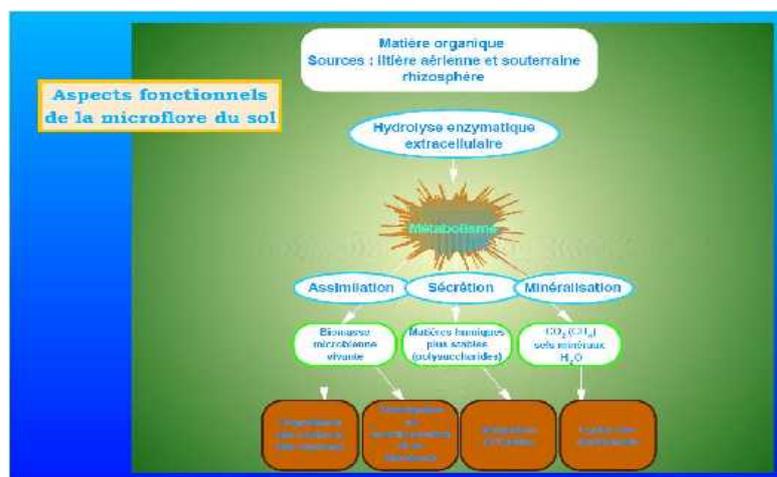
Cette hiérarchie signifie qu'un étage supérieur conditionne l'étage inférieur; dit autrement, une modification d'un étage va 'commander' des modifications dans l(es) étage (s) inférieur(s). Parfois, il arrive que cela peut marcher dans l'autre sens....

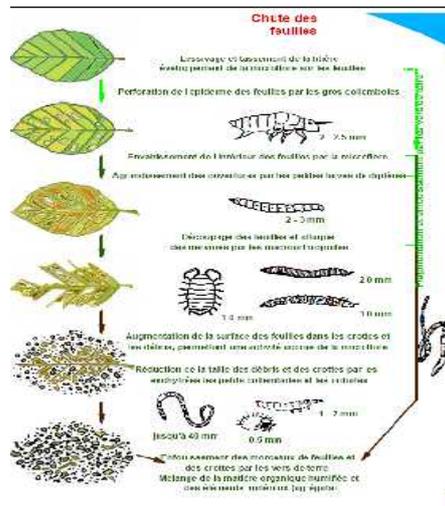
### 1.3 La biologie du sol et le cycle de la MO



La biologie du sol a une fonction essentielle de dégradation et de recyclage des matières organiques. Cette fonction peut être segmentée en 3 ; en effet les matières organiques, à travers le métabolisme des êtres vivants du sol, peuvent avoir 3 issues :

- ◆ l'assimilation: les êtres vivants ingèrent, digèrent la matière organique et l'assimilent en matière organique vivante
- ◆ La sécrétion : les êtres vivants sécrètent des molécules organiques dans le sol ; citons en particulier les polysaccharides pour leur effet d'agrégation des particules du sol.
- ◆ La minéralisation : une partie de la matière organique est minéralisée, sous forme d'ions minéraux, solubles, qui sont assimilables par les végétaux.





Un cortège d'êtres vivants fait évoluer la matière organique fraîche vers des formes humifiées et des minéraux : certains commencent par ingérer les tissus végétaux, les digèrent en interaction avec des bactéries, d'autres se nourrissent des boulettes fécales des premiers, des champignons vont dégrader les tissus végétaux à C/N élevés...sans oublier les consommateurs secondaires (prédateurs, qui consomment les premiers)....

#### 1.4 Notions sur l'abondance et aperçu de la diversité biologique du sol

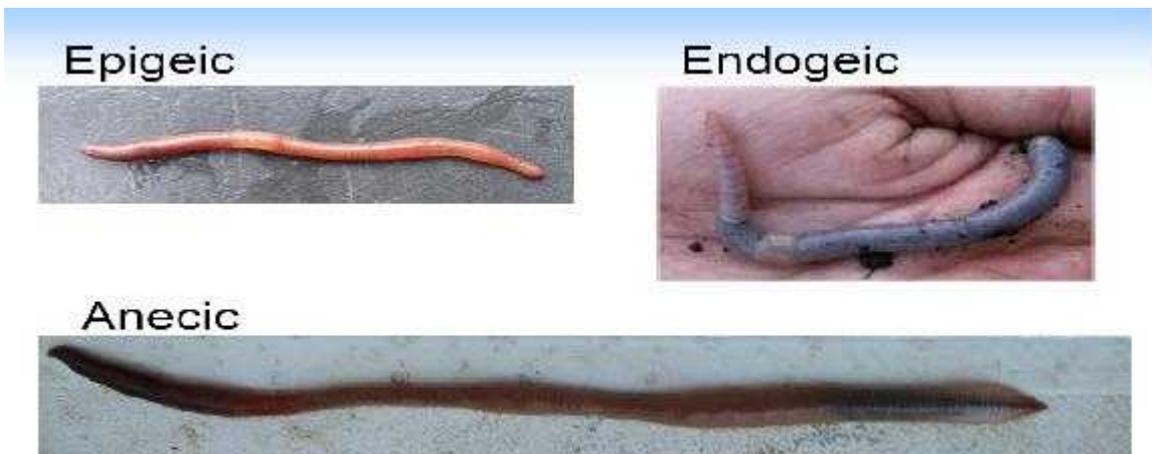
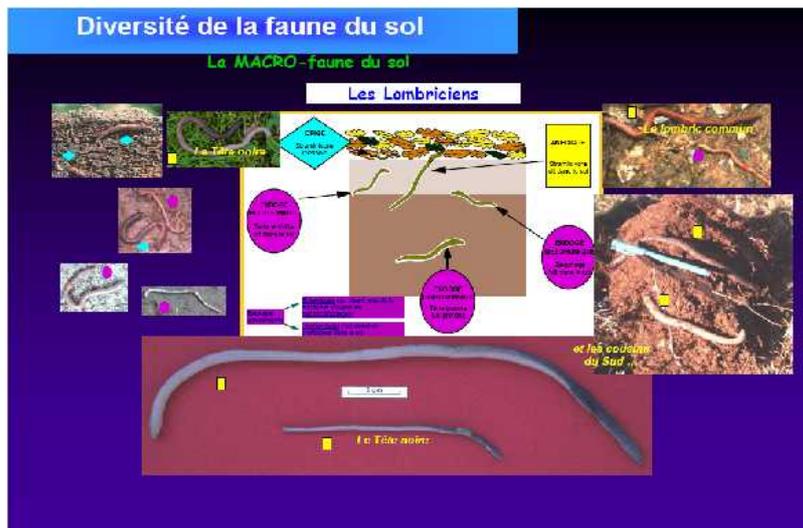
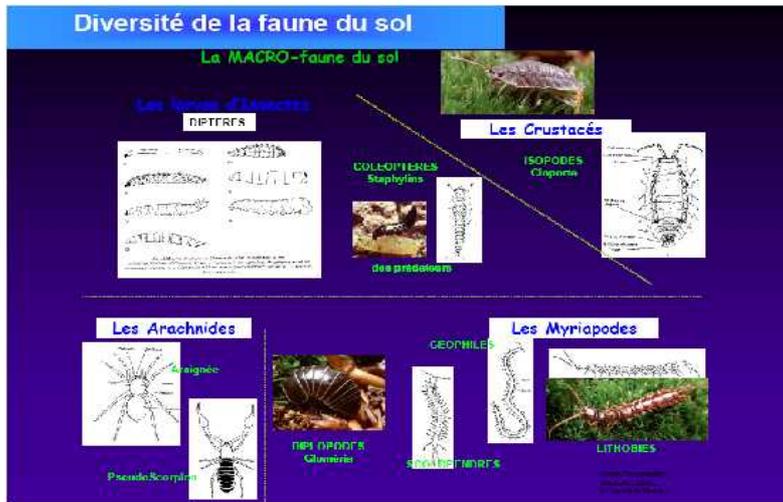
La biologie du sol représente en masse 5% de...5%... donc 0,25% de la masse du sol ; ceci est assez faible en part mais représente tout de même environ 4,5t/ha ( à comparer avec 6 vaches sur une prairie qui travaillent, mangent, respirent!...)



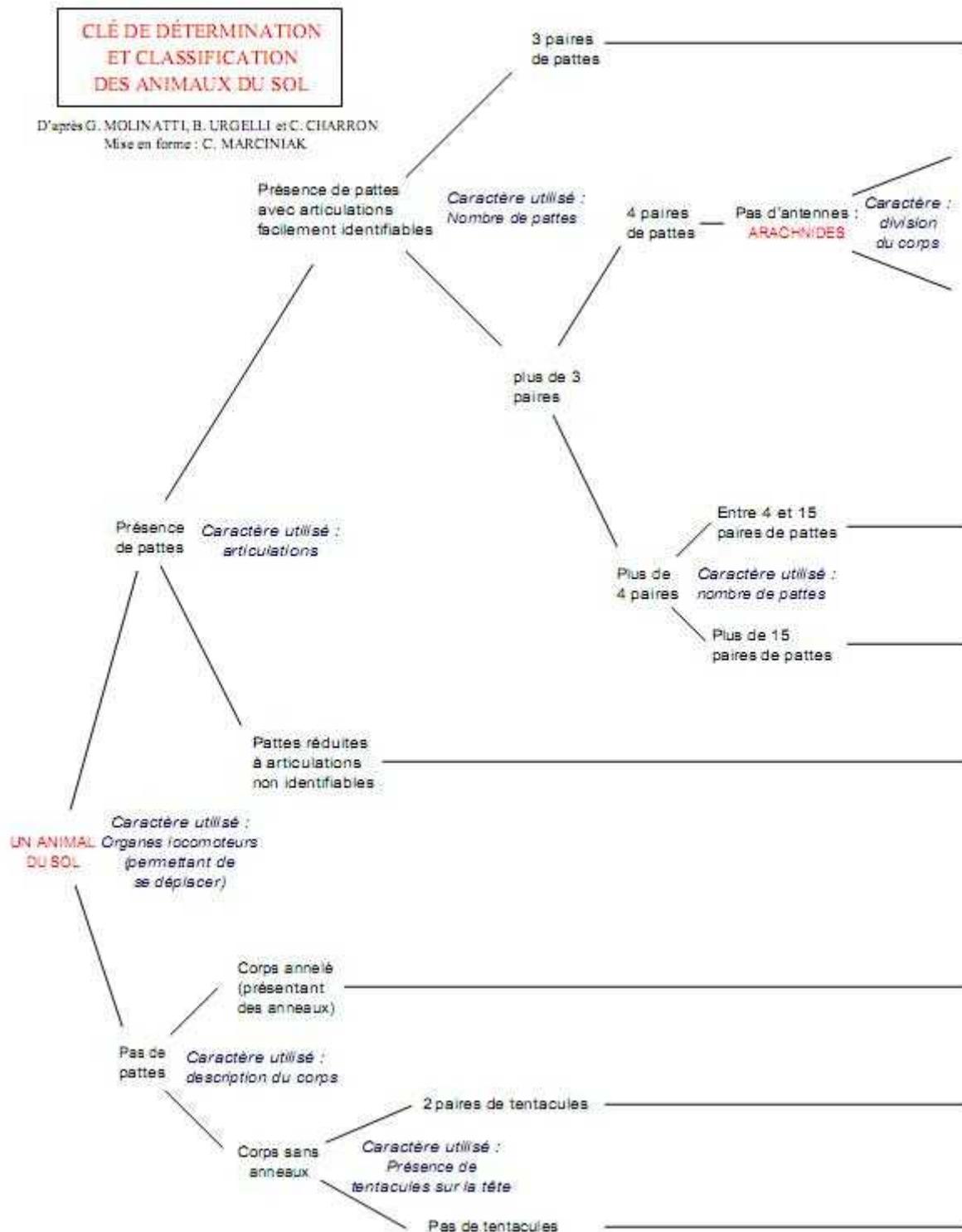
La porosité du sol constitue l'habitat de ces organismes, très diversifiés en nombre d'espèces et nombreux en population. Ainsi, il peut y avoir des milliards de protozoaires (animaux unicellulaires) et de bactéries, des dizaines de millions de nématodes et des centaines de milliers d'acariens dans un mètre carré de couche arable. Certains sont des consommateurs primaires, d'autres des prédateurs, et enfin certains autres des décomposeurs.

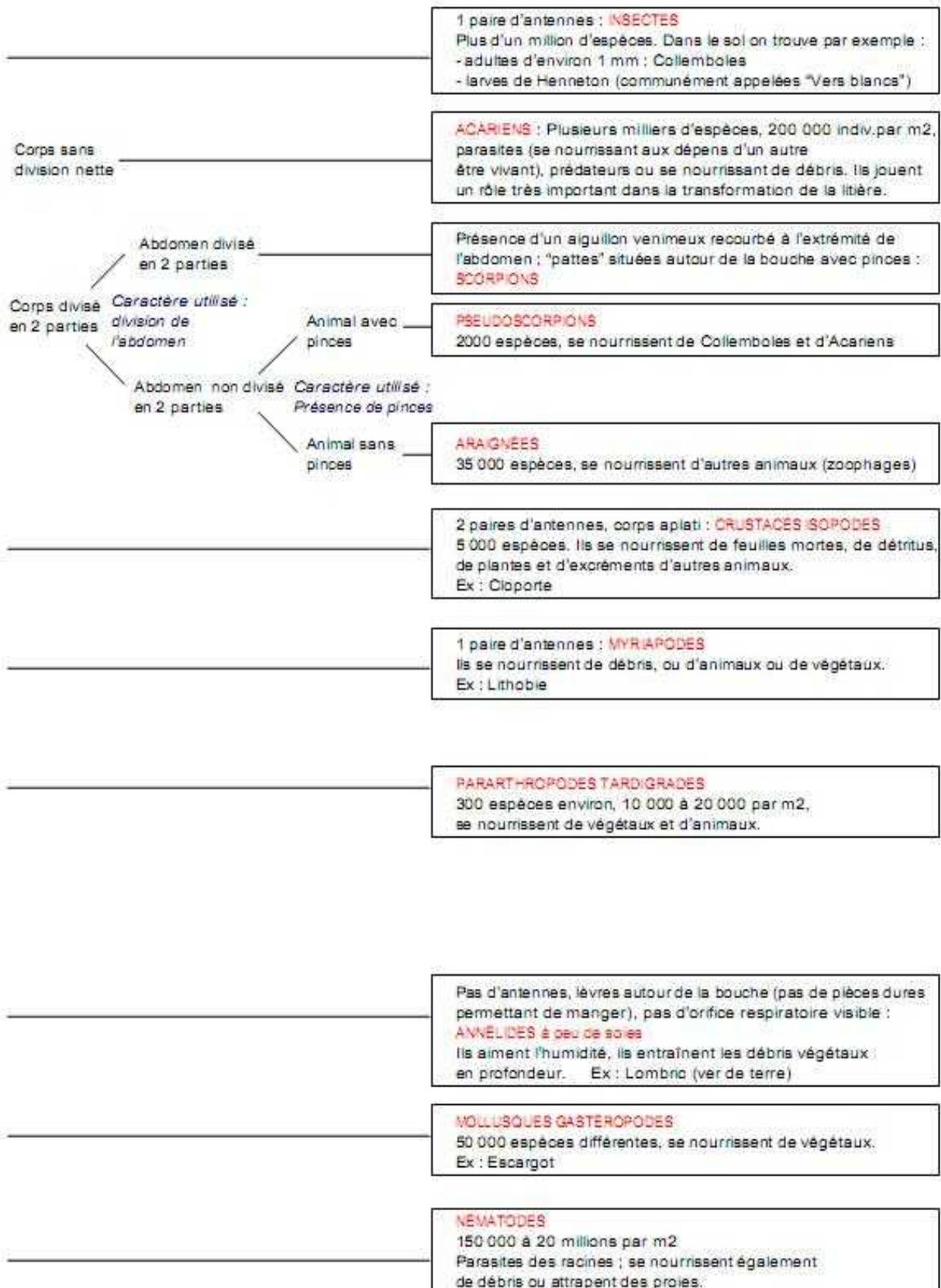


Certains d'entre eux, les lombrics, ont sous nos latitudes un rôle prépondérant dans le fonctionnement du sol ; c'est ce que nous allons découvrir dans la partie suivante.



## 1.5 Clef de détermination simple de la faune du sol

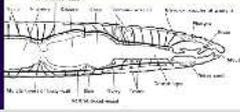




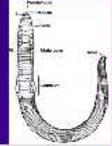
## 2. Les lombrics et le fonctionnement du sol

### 2.1 Biologie et Diversité écologique des lombriciens

#### Biologie des lombriciens



**Section longitudinale de la partie antérieure (24 prosoles) récemment d'un lombricide » type » illustrant la position des principaux organes d'alimentation, de digestion, de reproduction, de circulation sanguine, de locomotion et de coordination.**  
(d'après Hendershott, 1978 et Lee, 1983)



**Microphotographie colorée d'un lombricide » type » d'après Hendershott, 1978 et Lee, 1983.**

En résumé, les lombriciens ont une origine très ancienne. Ils se répartissent sur toute la surface du globe selon différentes familles :

- Les Lumbricoles en régions tempérées.
- Les Cuniculidés en Afrique tropicale et sub-tropicale.
- Les Oligochaetocoles en Amérique du sud et centrale, mais aussi en Afrique du nord et au sud de l'Europe.
- Les Megalocricétidés à l'est et au sud-est de l'Asie et en Asie australe.

Plus d'une centaine d'espèces sont recensées en Europe.



**Diagramme montrant l'importance entre l'existence et la construction du corps pendant les déplacements en avant. Les données ont été faites à partir d'un film des mouvements d'un ver sur lequel une série de repères ont été faits (quatre autres). Les lignes horizontales passent par ces points et montrent l'extension au cours du temps. (d'après W. Litchouse et Lewis, 1943)**

#### Quelques mots sur la reproduction des lombriciens...

Les vers de terre sont hermaphrodites.

La fertilité est assez variable suivant les espèces, par exemple le lombric commun (*Lumbricus terrestris*) produit en moyenne douze cocoons par an alors qu'une espèce comme le ver de fumier (*Eisenia fetida*) en produit une centaine.

Le développement du cocon à l'adulte est également variable suivant les espèces : environ 9 mois pour le lombric commun (*Lumbricus terrestris*) et 45 jours pour un ver de fumier (*Eisenia fetida*).



**Accouplement de 2 Lombriciens sexuellement échangeant des spermatozoïdes**



**Stades de production des cocoons chez les Lumbricoles (d'après Edwards et Luffly, 1977)**



**Développement de l'embryon dans le cocon (Nicolaidou Giori)**



**Cocoons de taille variable, en relation avec la taille de l'espèce.**

#### Diversité écologique des lombriciens

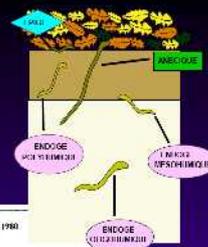
**En France : une centaine d'espèces (3200 espèces au monde) réparties dans des catégories écologiques**

Bouché en 1972 propose la création de 3 catégories écologiques et Lavelle en 1987 propose 3 sous-catégories au sein des endogés.

TYPES ECOLOGIQUES (LEG, 1999) (WILCKE, 1983) (BALUEVA, 1990)	SPECIALISATION TROPHIQUE DES COQUES (LAVALLE, 1981)	CATEGORIES ECOLOGIQUES (BOUCHE, 1971, 1972, 1976, 1980)	
Rica Soaks	Dactylophiles	Sous catégories	Mixtes (sous catégories)
		Curculionides	(soieries)
NO SOIL SPECIES	pédobiontes (= curculionides) mésochthoniques oligotrophiques	stomatopiles	(littorales)
		phyllophiles	(galeries d'insectes arboraux)
autres espèces	hypogastrophiles	épikérogés	(sol superficiel)
			(sol profond)

**Trois catégories principales :**

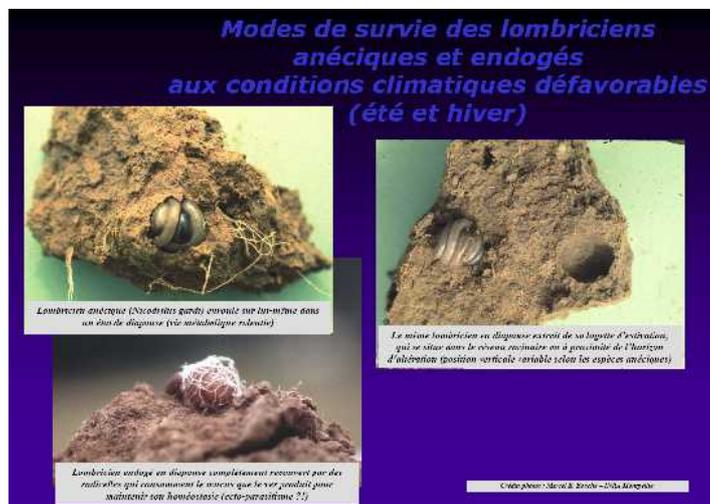
- EPHORES** (surface)
- ANECIOLES** (profondeur)
- ENDOGES** (très profondeurs)



**Caractéristiques des anécioles :**

- Création de lités, parfois très compactes
- Mélange organo-minéral
- Régulation thermodynamique par chaos dans le système du sol
- Galeries profondes (système, dramep)
- Dispense liée à la persévérance





## 2.2 Rôle et influence / propriétés physiques

**TABLE 11.4 Comparative Characteristics of Earthworm Casts and Soils**  
*Average of six Nigerian soils.*

Characteristic	Earthworm casts	Soils
Silt and clay, %	38.8	22.2
Bulk density, Mg/m <sup>3</sup>	1.11	1.28
Structural stability <sup>a</sup>	849	65
Cation exchange capacity, cmol/kg	13.8	3.3
Exchangeable Ca <sup>2+</sup> , cmol/kg	8.9	2.0
Exchangeable K <sup>+</sup> , cmol/kg	0.6	0.2
Soluble P, ppm	17.8	6.1
Total N, %	0.33	0.12

<sup>a</sup>Numbers of raindrops required to destroy structural aggregates.  
From de Vrieschauer and Lal (1981).

### 221. Effets sur la texture et la structure du sol

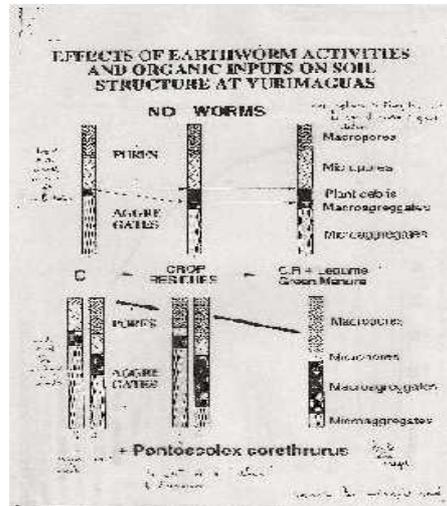
#### 2211 Texture

Les rejets des vers de terre ont généralement une texture plus fine (teneurs en limon et en, argile plus importantes) que celle du sol environnant. Cette différence de texture, entre sol et les turricule, serait due à une ingestion préférentielle des particules fines (limons et argiles) plus riches en matière organique. Actuellement, le processus par lequel les lombriciens sélectionnent ces particules n'est pas encore connu. Cependant, les vers possèdent des cellules sensorielles situées plus particulièrement au niveau du prostomium (extrémité antérieure du ver) (Mill, 1978). Ces cellules sensorielles réceptrices de stimuli tactiles, chimique et lumineux permettraient aux lombriciens de sélectionner les particules à ingérer.

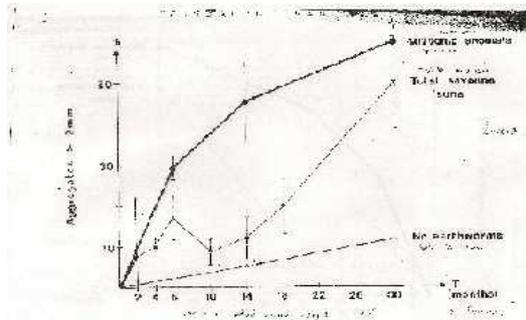
La texture des rejets dépend de la taille des vers : plus ils sont gros, plus la taille des particules de sol ingérées puis excrétées est importante (Lee, 1985). En effet, Bolton et Phillipson (1976) ont comparé la taille maximum des particules minérales dans la partie postérieure du tube digestif d'*Apporectodea rosea*, *Allolobophora caliginosa* et *Octolasion cyaneum* : les résultats obtenus sont 100, 200 et 500 µm respectivement. Ces dimensions sont corrélées au diamètre des individus composant ces espèces (environ 2-3,5 mm, 3,5- 4,5 mm et 6-8 mm respectivement). On observe une préférence des particules fines (limons et argiles), plus riches en matière organique.

## 2212 Structure :

expérience1 *Pontoscolex corethrurus* : Explications protocole ; quelles conclusions ?



Expérience 2 *Millsonia anomala* Explications protocole ; quelles conclusions ?



En plus de ces modifications de texture, la structure du sol est également affectée lors du transit intestinal. Dans le tube digestif des vers, les particules de sol ingérées sont soumises à des traitements divers : mécanique, chimique, enzymatique (Barois et al, 1993). Lors de ce transit, la sécrétion de mucus ainsi que l'apport d'une certaine quantité d'eau favorisent l'activité des micro-organismes présents dans le tube digestif du ver et dans le sol ingéré. Au fur et à mesure du transit, les particules minérales sont réorganisées autour de colonies bactériennes ou de particules organiques, affectant à la fois la microstructure et la macrostructure des particules du sol.

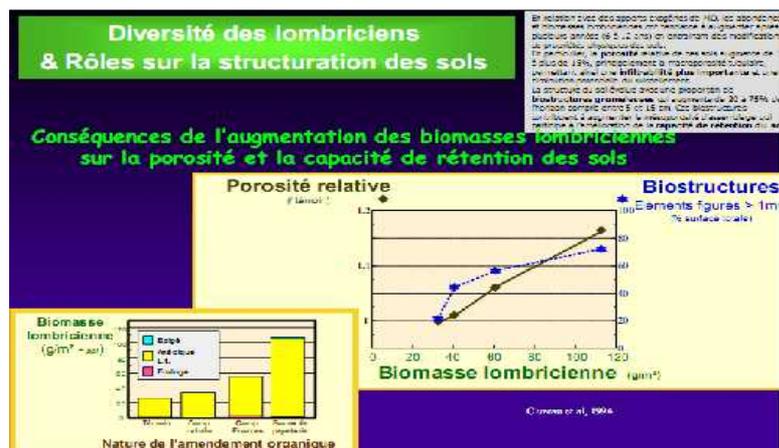
### 222. Effet sur la stabilité structurale du sol

La stabilité structurale et la cohésion des agrégats du sol en général et des turricules en particulier influencent très largement les propriétés hydrauliques du sol et donc sa résistance à l'érosion. En Europe, bénéficiant d'un climat tempéré, les turricules de vers de terre sont plus stables que les macro-agrégats de taille comparable trouvés au champ et ont donc un rôle de stabilisation de la structure des sols (Marinissen, 1994).

La stabilisation des déjections résulte de processus physico-chimiques, biologiques et organiques. Elle dépend essentiellement de la richesse en matières organiques des sols (Swaby, 1950; Lee, 1985; Shipitalo et Protz, 1989) mais aussi de l'activité microbienne dans les turricules (Lee, 1985). Les sols de pâturage étant généralement plus riches en matière organique que les sols de grandes cultures, la structure des turricules y est habituellement plus stable. L'effet du travail purement mécanique des vers ne ferait par lui-même que diminuer la cohésion des agrégats, et donc la stabilité structurale du sol. **Cependant, en favorisant la synthèse de mucus bactérien, de gommés polysaccharides et de composés pré-humiques, et en mélangeant intimement ces composés à la fraction minérale du sol et en y ajoutant parfois des sécrétions calcaires qui contribuent à la floculation des composés argilo-humiques, les vers de terre augmentent la stabilité structurale du sol (Bachelier, 1978).**

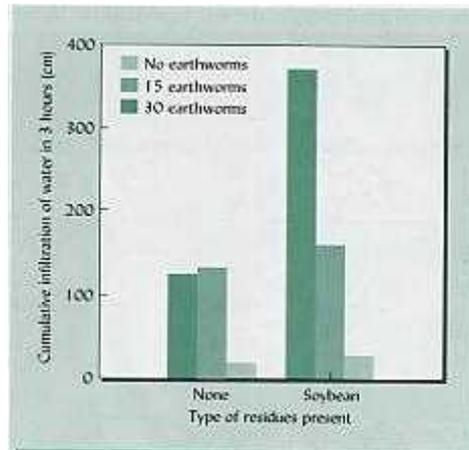
Ainsi, la présence de polysaccharides d'origine microbienne est fortement corrélée à la stabilité des agrégats (Decaëns, 1999). De plus, les résidus des fibres végétales ingérées (Ponomareva, 1953) et les hyphes fongiques ont un rôle mécanique dans la stabilisation des agrégats (Marinissen et Dexter, 1990). En effet, dès 1955, Beuteispacher (in Bachelier, 1978) a montré, grâce à des photographies, la structure nette de colloïdes filamenteux dans les excréta des vers, ainsi que l'enrobage des particules par des substances muqueuses très difficilement oxydables issues des colonies bactériennes.

### 223. Effet sur la porosité du sol



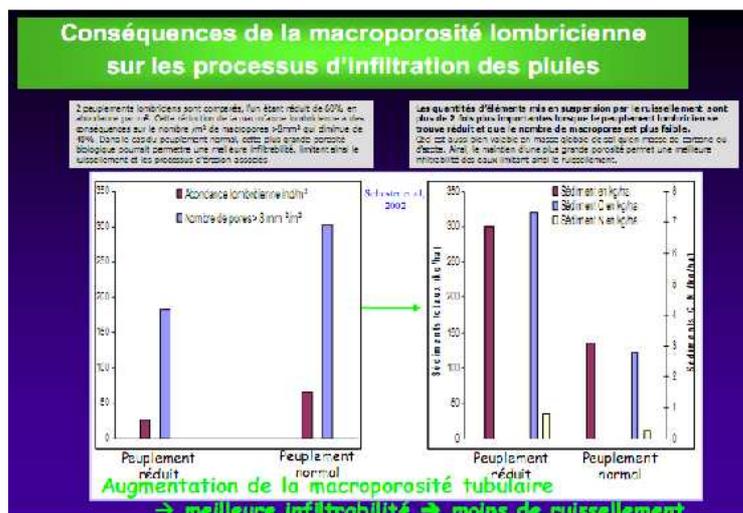
L'activité biologique des vers de terre augmente de façon importante la porosité du sol : de 30-40%, elle peut passer à 60-70% sous leur action (Bachelier, 1978). Les vers, par leurs galeries, peuvent limiter le caractère compact des sols argileux et, en prairie, contrebalancer l'effet du piétinement du bétail. Les structures biogéniques des vers (galeries et déjections) augmentent la macroporosité, mais influent également sur la microporosité, à la fois directement via l'assemblage des déjections (cet assemblage constitue une mésoporosité au niveau des parois de galeries conduisant à la diffusion de l'eau des parois de galeries vers la matrice sol) et, plus indirectement, par la stimulation de la micro- et de la mésofaune dont les activités augmentent la microporosité (Jeanson, 1971).

**L'amélioration de la porosité permet une augmentation de l'infiltration de l'eau. Si les galeries sont connectées avec la surface, elles permettent à l'eau de pluie de s'infiltrer puis de s'écouler dans les galeries et autres structures grumeleuses.** Certaines de ces galeries parcourent l'ensemble du profil de sol, assurant un écoulement de l'eau par gravité et limitent le ruissellement



de surface et donc l'érosion. Selon Lee (1985), beaucoup d'auteurs signalent que l'infiltration de l'eau est de deux à dix fois plus rapide, et parfois plus, dans les sols avec des vers de terre que dans les sols qui en manquent. Mac Credie et Parker (1991) ont mesuré des taux d'infiltration dans un sol brun sableux de l'ouest de l'Australie en présence et en absence de *Aporrectodea trapezoides*. En présence de vers de terre, ils ont montré que les taux augmentent de 122% et de 247%, pour les pores de taille inférieure à 2,1 mm et supérieure à 2,1 mm respectivement (les pores sont différenciés par infiltrométrie).

Ainsi, selon la hauteur de la lame d'eau présente au dessus de la colonne de sol, les pores recrutés ne sont pas les mêmes: une hauteur de lame d'eau importante recrute des «gros» pores (diamètre > 2,1mm), et inversement. Les résultats de Pères (2003) suggèrent qu'un réseau de galeries long et volumineux n'entraîne pas forcément un transfert hydrique plus important qu'un réseau plus court et moins volumineux. Par contre, la continuité des pores contribue de façon importante au bon fonctionnement hydrique du sol.



Les sols dont la porosité est augmentée ont également une meilleure aération car la diffusion gazeuse s'y effectue plus facilement.

### 2.3 Rôle et influence sur la MO et son cycle

En tant qu'ingénieurs de l'écosystème, les vers de terre participent activement à la dégradation

des matières organiques mortes et les mélangent intimement avec la matière minérale provenant de l'ensemble du profil (Lofty, 1974). Par ces activités de bioturbation, ils transfèrent des horizons de surface vers les horizons de profondeurs, des ressources nutritives, utilisables par la microflore et par les racines. Edwards et Heath (1963) considèrent qu'ils sont responsables de plus de 78% de la transformation totale de la litière

### 231. Fragmentation et enfouissement des débris organiques

**Diversité des lombriciens  
& Rôles sur le recyclage de la MO**

... dans la fragmentation et l'enfouissement  
de la matière organique (MO)



C'est grâce à leur action que les vers de terre peuvent enfouir les débris végétaux dans le sol.



Même dans un sol très humide, ces vers de terre utilisent les parties de matière organique comme nourriture.

Les lombriciens anéciques rassemblent en paquet à la surface du sol, tout fragment de végétation morte, à l'automne, les feuilles; puis, ensuite, des matériaux plus difficiles à dégrader ... mais ils vont y arriver ... avec le temps et l'aide de la microflore



Elucidation de la composition chimique de ces matériaux obtenus par les lombriciens, notamment par leur action sur les débris végétaux.



Pour éviter toute confusion, il faut de ces matériaux, et surtout éviter au milieu de débris végétaux, les vers de terre qui se rassemblent que va faire éclater ces matériaux morts, et faire ainsi des trous qui servent à la circulation de l'air et de l'eau. Dans les trous, les vers de terre peuvent également se nourrir de la matière organique qui se trouve dans ces trous. Ils sont très actifs et travaillent de plus en plus à mesure que le temps passe. L'accumulation de matière non décomposée ne dépend pas de la température.

La fragmentation, première étape de la décomposition de la litière, est réalisée essentiellement par les vers de terre, les diplopodes, les isopodes, les larves de diptère, les collemboles et les oribates (Lofty, 1974). Les lombriciens sont capables de consommer (ou de faire disparaître de la surface) une proportion considérable des débris végétaux produits annuellement dans différents écosystèmes (Lofty, 1974) : Raw (1962) a montré que *Lumbricus terrestris* peut supprimer plus de 93% de feuilles tombées en automne dans un verger de pommiers entre octobre et fin février de l'année (le pic d'activité se situant entre octobre-décembre pour l'automne et mars et mai pour le printemps).

De même, Satchell (1967) a calculé qu'une population de *Lumbricus terrestris* d'une forêt mixte du nord-ouest de l'Angleterre a la capacité de consommer la totalité de la litière annuelle en trois mois. Le fait que la litière disparaisse de la surface n'implique pas forcément que toute la litière est ingérée immédiatement : certaines espèces, notamment *Lumbricus terrestris*, introduisent des feuilles ou des fragments de feuilles dans leurs galeries et les consomment au fur et à mesure, quand elles sont partiellement décomposées. La figure ci dessous indique que la disparition de la litière de la surface du sol est beaucoup plus rapide en présence de vers de terre.

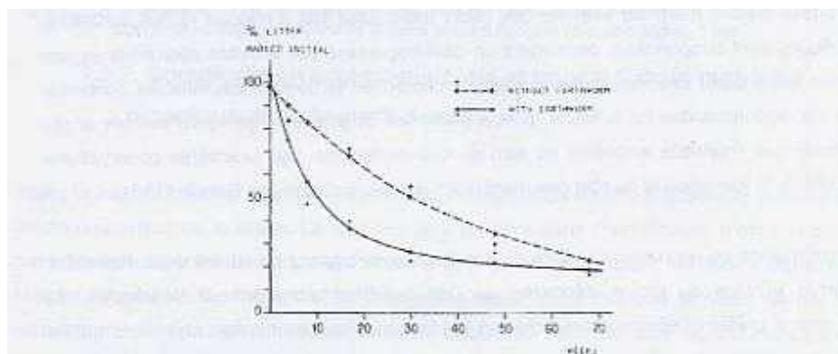


Figure 11.4. Disparition (décomposition et enfouissement) de la litière de *Lolium perenne* marquée au <sup>14</sup>C sans vers de terre ou avec *Nicodrilus caliginosus meridionalis* (d'après Bouché et al., 1987)

Les sols pauvres en vers de terre ont souvent une couche de litière non décomposée en surface

qui se démarque nettement du sol sous-jacent dont la structure est peu grumeleuse. Ainsi, Barley et Kleinig (1964, cités par Bachelier, 1978) ont observé, dans certaines prairies australiennes irriguées et ensemencées avec des espèces végétales exotiques, l'accumulation d'une épaisse litière feuillue et des excréments du bétail, faute d'une faune endémique capable d'incorporer les débris organiques au sol. Une introduction volontaire ou accidentelle d'*Allolobophora caliginosa* et *Microscolex dubius* par les moutons et l'eau d'irrigation a permis l'incorporation au sol du matelas organique de surface

De même, l'immersion en 1944 puis en 1953 des polders de la province de Zeeland (Pays-Bas) a éliminé les populations lombriciennes. Dans une prairie âgée de sept ans implantée sur ces sols, Van Rhee (1963) a observé une litière d'herbe et de racines partiellement décomposées plus épaisse dans les secteurs dépourvus de vers de terre que dans ceux où ils avaient été réintroduits.

Dans les sols cultivés, les résidus organiques des cultures après récolte, les sarments et branches broyés issus des tailles hivernales ou les feuilles mortes tombant à l'automne sont autant de ressources trophiques que les lombriciens anéciques vont rassembler en amas plus ou moins enfouis dans les orifices de galeries lombriciennes et mélangés aux déjections de surface. Au sein de ces petits monticules (ou « midden »), les variations climatiques sont tamponnées, permettant un développement des activités microbiennes, en premier lieu à partir des mucopolysaccharides, composés facilement assimilables contenus dans les déjections des lombriciens, puis à partir des fragments organiques enfouis et réhumectés par l'humidité ambiante au sein de ces monticules. Les premières observations précises de la formation et du rôle des monticules ont été réalisées par Darwin (1881).

Les lombriciens se nourrissent ensuite de ces fragments organiques attendris par l'humidité ambiante et plus ou moins dégradés par les activités microbiennes. Néanmoins, ils s'alimentent préférentiellement des colonies bactériennes ou des hyphes mycéliens qui se sont développées sur ces nouveaux substrats organiques. Au fur et à mesure que les fragments organiques sont dégradés et consommés par les vers, ils sont enfouis progressivement dans les galeries et le cycle réhumectation / dégradation microbienne / consommation lombricienne recommence jusqu'à disparition complète des débris organiques.

### 232. Complexation organo-minérale et transfert de la MO dans le profil de sol

Après la fragmentation et l'incorporation au sol, l'humification constitue le dernier processus de décomposition de la litière. Le rôle des vers de terre dans l'humification n'est pas clair mais presque tous les auteurs s'accordent à dire qu'ils y participent, du moins dans les régions tempérées (Bachelier, 1978). Leur action serait plutôt indirecte et passerait par la stimulation des microorganismes humificateurs séjournant dans leur tube digestif mais aussi par l'association de la matière organique fragmentée avec les particules du sol facilitant l'action de la microflore.

**Diversité des lombriciens & Rôles sur le recyclage de la MO**

... dans le transfert de cette MO au sein du profil de sol via les galeries (= activités de bioturbation)

*George Tenison-Woods et al. (1980) ont démontré que les lombriciens de surface sont les principaux responsables de la formation de monticules de matière organique (d'après Bachelier, 1978).*

*Les lombriciens anéciques sont les principaux responsables de la formation de monticules de matière organique (d'après Bachelier, 1978).*

*Ainsi, au même titre que la mizosphère, l'ensemble de ces activités va participer à la création d'une sphère d'activités privilégiées, la diosphère ...*

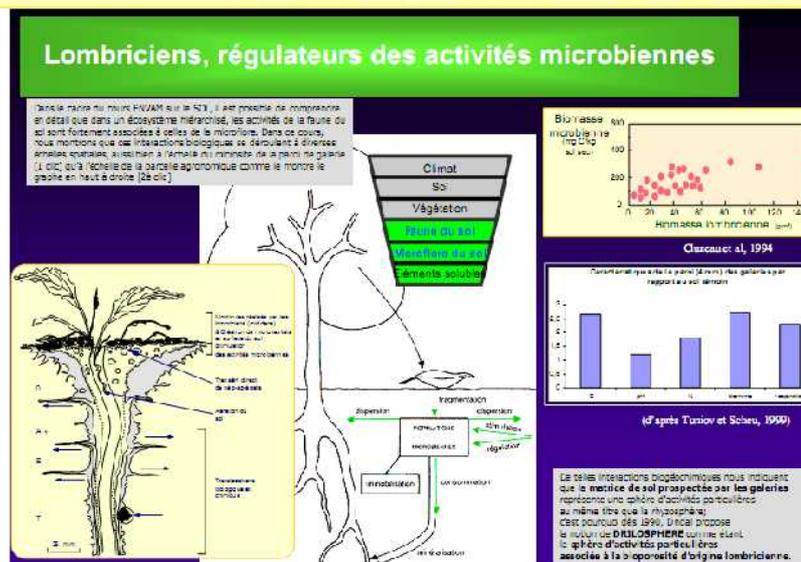
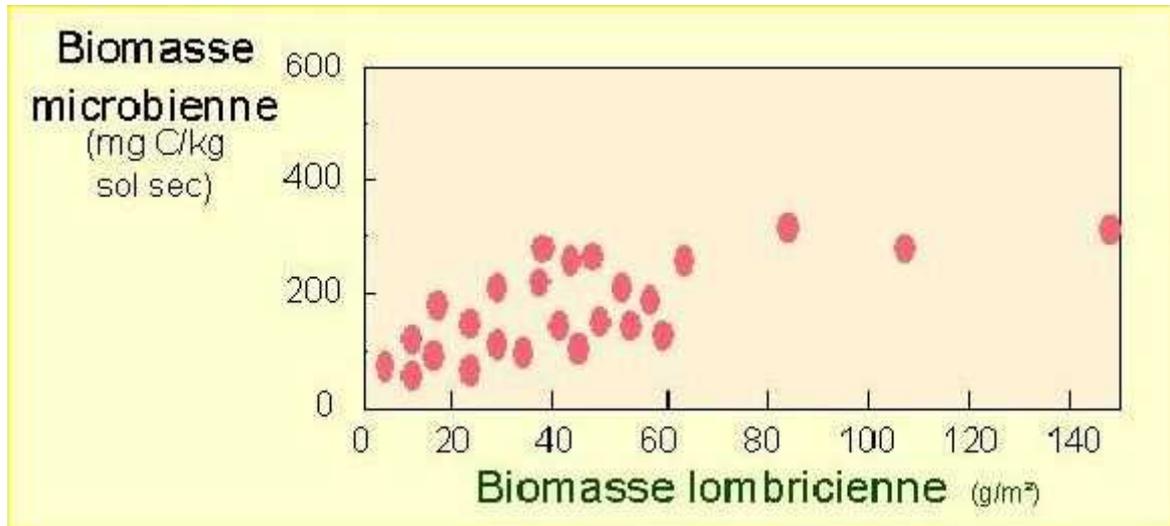
Crédit d'images: © Daniel S. Sorensen - iStock.com



environnant, avec une quantité de nutriments biodisponibles plus importante.

## 2.4 Régulation des activités microbiennes

De nombreux auteurs s'accordent à dire que les vers de terre stimulent l'activité des microorganismes. Il existe en effet une corrélation positive entre la biomasse lombricienne et la biomasse microbienne dans le sol.

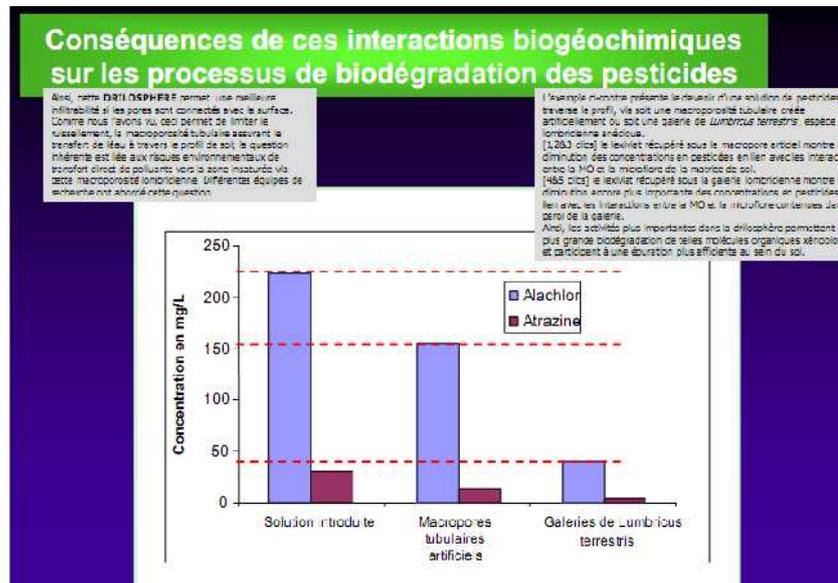


Une des hypothèses les plus répandues dans la littérature (Lee, 1985) est que la stimulation microbienne observée en présence d'invertébrés du sol est sans doute due à l'utilisation de substances nutritives additionnelles (produits de sécrétion et d'excrétion) que les invertébrés produisent.

Les vers de terre exercent une régulation globalement positive des activités microbiennes :

- le passage des micro-organismes dans le tube digestif permet la multiplication exponentielle des bactéries et des actinomycètes mais limite le développement des champignons ;
- en vieillissant, les turricules sont le siège du développement des hyphes mycéliens et des levures ;
- la drillosphère est également un lieu d'activité (micro) biologique intense ;
- ils participent à la dissémination des microorganismes dans le sol.

La stimulation des activités microbiennes et de la biologie du sol en général améliore le fonctionnement global du sol.



## 2.5. Influence sur la productivité végétale

En climat tempéré, la croissance des plantes repose sur différentes propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol qui sont en partie contrôlées par l'activité des vers de terre. Selon plusieurs résultats de recherches, les effets des lombriciens sont généralement positifs vis à vis de plantes, plus rarement nuls ou négatifs. La réponse des plantes semble proportionnelle à la biomasse de vers de terre (essais en N<sup>elle</sup> Zélande sur prairies, travaux de Lee et Van Rhee en grandes cultures).

Quels sont les mécanismes qui peuvent expliquer un tel effet ?

### 251 Stimulation chimique de la croissance des plantes

Les vers de terre, en interaction avec les bactéries, peuvent libérer des vitamines (vitamines du groupe B), protéines et facteurs de croissance, qui ont un effet positif sur la croissance des végétaux.

Les complexes organo-minéraux formés dans le tube digestif des lombrics participent à la fixation d'ions nutritifs utilisables par les plantes ; ainsi l'activité des lombrics permet notamment d'augmenter la quantité de calcium, de potassium et de magnésium échangeables, ainsi que d'oligo-éléments.

### 252 Dispersion des graines

L'ingestion, le transport et la répartition dans le sol de graines par les lombrics avaient déjà été observée par Darwin.. Une fois ingérées, les graines peuvent être excrétées dans les turricules à la surface du sol où les conditions sont favorables à leur germination, ou dans les galeries en profondeur où leur germination est retardée. Seule une faible part des semences sont broyées dans le gésier des vers de terre (10 à 25 %). Divers travaux sont menés pour voir si les vers de terre peuvent 'orienter' le peuplement végétal d'un agrosystème par ces actions sur les semences.

### 253 Distribution et densité des racines

Les vers de terre affectent la distribution des racines dans les sols. En effet, les galeries des

anéciques, tapissées de mucus et de déjections, constituent des voies préférentielles pour le développement des racines :

- d'un point de vue physique : cette bioporosité facilite la progression des racines
- mais aussi chimique et biologique (activité microbiologique intense, plus d'ions minéraux pour la nutrition ...) ; ainsi, les racines développent des radicelles circulaires pour épouser le contour des galeries pour absorber les éléments nutritifs déjà présents ou issus de la minéralisation microbienne.

## 254 Limitation des infections

Diverses études ont montré qu'en affectant directement ou indirectement les populations de bactéries pathogènes, de nématodes phytoparasites et d'insectes nuisibles, les vers de terre contribuent à la santé des racines.

## 255 Effets négatifs des vdt

Quelques effets négatifs sont parfois évoqués :

- En zone tempérée certaines observations ont montré que certains vers de terre peuvent consommer des racines vivantes ; cependant ce phénomène est sûrement peu significatif : des études menées sur les contenus digestifs d'une trentaine d'espèces a révélé que les racines n'en représentent qu'une infime partie (Brown et al. 1999)
- en sols tropicaux, certaines observations relatent des compactations de sols dans des cas d'intenses développement de vers de terre sécrétant un fluide visqueux 'ciment', avec un effet négatif sur la croissance végétale.
- Les vers de terre peuvent aussi être les hôtes de certains parasites (cestodes et nématodes) et en faciliter la dispersion

## 2.6 Conclusion

Les **vers de terre** sont **des acteurs essentiels** du fonctionnement du sol, tant sur le long terme (formation du sol) que sur le court terme (action sur la structure/porosité, dynamique de la MO, libération d'éléments nutritifs...). Ils ont un **impact globalement positif sur la croissance végétale** ; s'ils ont parfois évoqués, les effets négatifs restent très limités...



On a donc tout intérêt dans la **gestion des systèmes de production végétale** à faire en sorte de **favoriser les populations de vers de terre** et éviter de les dégrader ! Nous verrons plus loin cette année comment.....

### 3. La rhizosphère

#### 3.1 Introduction et définition

Nous venons de voir comment les vers de terre modifient le sol ; l'ensemble du volume de sol ainsi modifié par les lombrics prend le nom de drillosphère.

La rhizosphère, désigne quant à elle le volume de sol sous influence des racines de sol. D'une manière pratique, on peut dire qu'il s'agit de la terre 'restant attachée' aux racines quand on déterre une plante....



Ce volume de sol va être le lieu de modifications physiques, chimiques et biologiques de fortes intensités, qui va le rendre différent du sol non rhizosphérique, où elles n'ont pas lieu.; c'est aussi le lieu privilégié des échanges plantes/sol.

D'un point de vue quantitatif, le sol rhizosphérique peut représenter de moins de 1% (en forêt dense, sans étage arbustif et herbacé) à quasiment 100%, en prairie par exemple.

#### 3.2 La rhizosphère, une stratégie évolutive pour la nutrition végétale

Avant de décrire les spécificités de la rhizosphère, voyons un peu quelle est la contrainte pour les plantes de se nourrir à partir de la solution du sol....

Élément	Eau de mer (mM)	Solution de sol (mM)	C <sub>min</sub> (mM)
H <sup>+</sup>	0.0001	0.00001-0.1	—
K <sup>+</sup>	10	0.1-1	0.001-0.002
Ca <sup>2+</sup>	10	0.1-2	0.001-0.005
Mg <sup>2+</sup>	50	0.1-2	—
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	—	1-5	0.001-0.05
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	30	0.1-2	0.001-0.05
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.5	0.0001-1	—
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0.002	0.001-0.005	0.00001-0.0001

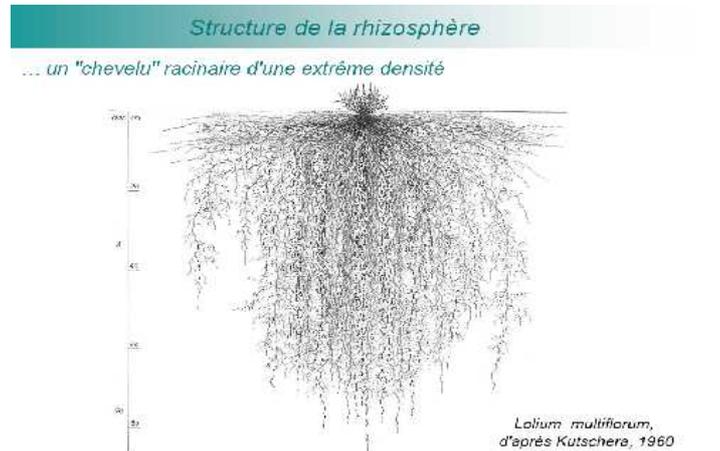
Valeurs de concentrations dans l'eau de mer, dans la solution du sol, et capacité de prélèvement des racines

La solution du sol, comparé par exemple à l'eau de mer, est un milieu peu concentré en ions ; 10 fois, 100 fois moins pour certains. Et pourtant, si on regarde la colonne de droite, on peut voir que les racines ont une capacité de prélèvement à des concentrations minimales encore bien plus

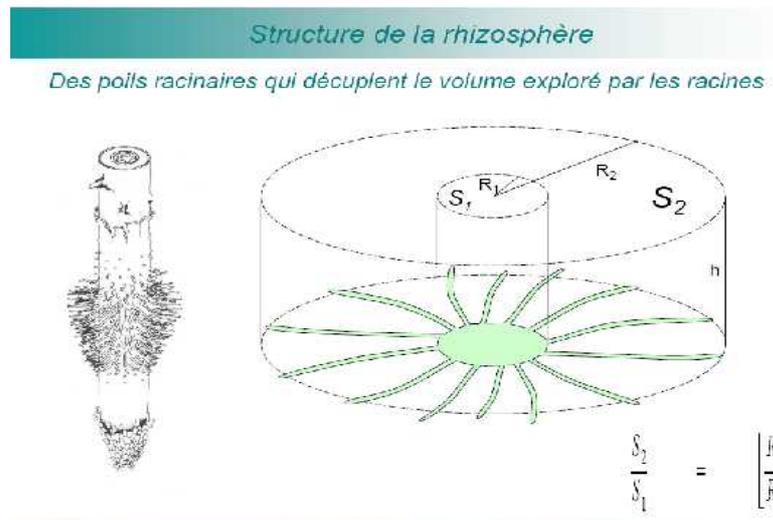
faible...Comment cela est-il possible ? Et bien en regardant de plus près comment fonctionne la rhizosphère, nous allons avoir des éléments de réponses, car les végétaux ont développés de nombreuses stratégies d'adaptation, de coopération pour pouvoir se nourrir dans ce milieu qu'est la solution du sol.

### 3.3 Rhizosphère et biologie,, des adaptations biologiques évolutives

Les plantes ont pour certaines sélectionné une capacité à développer un linéaire de racines important pour augmenter la surface d'échange avec le sol pour effectuer leur nutrition végétale.



Si on regarde un peu plus en détail les racines, la présence de poils racinaires permet de fortement augmenter la rhizosphère (si le poil fait 10 fois le diamètre de la racine, la surface d'échange est 100 fois plus grande!)



### 3.4 Rhizosphère et biologie : des développement de coopération/synergie

#### 3.4.1 Avec les bactéries du sol

La majorité des bactéries du sol sont hétérotrophes vis à vis du carbone : elles sont dépendantes de formes organiques de carbone pour réaliser leur métabolisme (comme nous !). Les végétaux, en sécrétant dans le milieu extérieur des exsudats racinaires (molécules organiques, qui représentent, selon les espèces, entre 5 et 40% du carbone photo synthétisé !), vont 'réveiller' les bactéries qui vont croître et atteindre de fortes populations dans la zone rhizosphérique (jusqu'à 10<sup>10</sup> à 10<sup>12</sup> bactéries par gramme de sol : entre 10 milliards et 1000 milliards !), bien plus que dans le sol

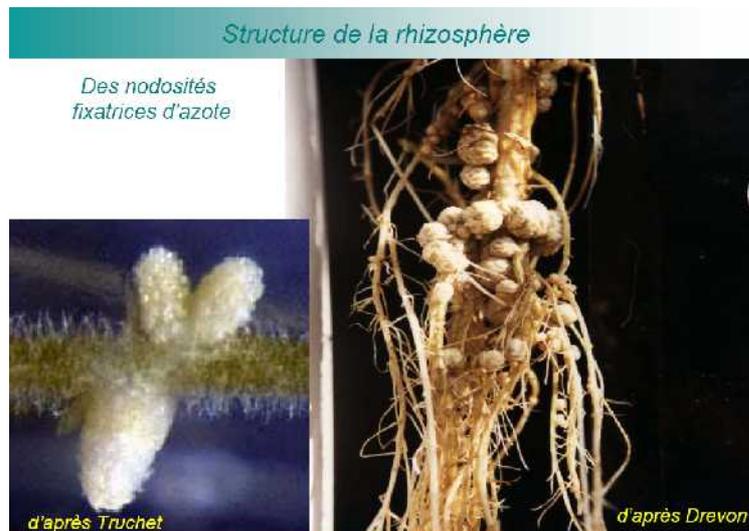
environnant.

Cette sécrétion de produits synthétisés par la plante dans le sol par les racines porte le nom de **rhizodéposition**. Sous le terme exsudats racinaires sont englobés diverses molécules organiques qui diffèrent selon les espèces de plantes (voir ci dessous le tableau 'diversité des exsudats racinaires')



On peut classer en trois grandes catégories les bactéries ainsi stimulées par la rhizodéposition et présentes au sein de la rhizosphère, et qui vont avoir une action bénéfique pour la plante:

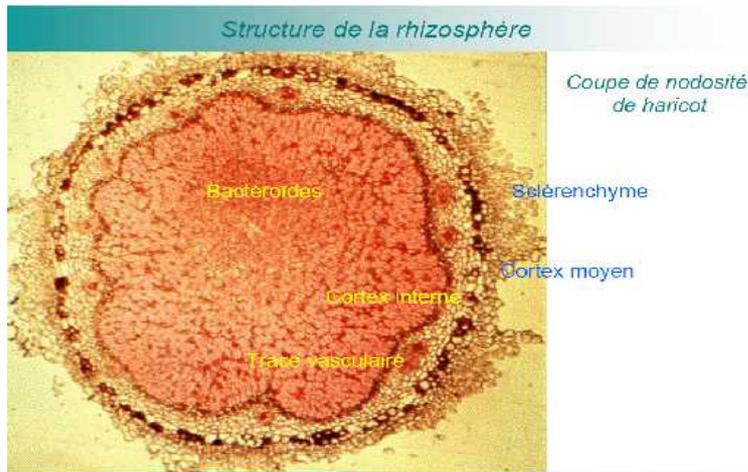
- **La première** est constituée **des bactéries symbiotiques** : c'est le cas bien connu des bactéries des genres *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Sinorhizobium* et *Azorhizobium*. Elles vont permettre la nutrition azotée des végétaux de la famille des *Fabacées* en fixant l'azote atmosphérique  $N_2$ .



Le fonctionnement de l'échange de stimuli qui précèdent la constitution de la nodosité sont connus : les rhizobiums exercent une action stimulante sur la plante en synthétisant des flavanones et chalcones à proximité des racines. Suite à l'accroche des bactéries en limite de zone d'élongation de la racine. Puis elles 'infectent' les poils racinaires après qu'ils se soient recourbés en prenant une forme de crosse, qui évoluera vers la nodosité. La plante répond aux stimuli des bactéries en synthétisant des nodulines, précédant et accompagnant l'infection. Plusieurs gènes vont être impliqués pour accompagner la symbiose, sur plusieurs actions :

- déformation des poils racinaires
- formation du cordon d'infection
- morphogénèse de la nodosité
- formation de la membrane enveloppante
- alimentation énergétique des bactéries

- transport d'oxygène
- assimilation de l'azote

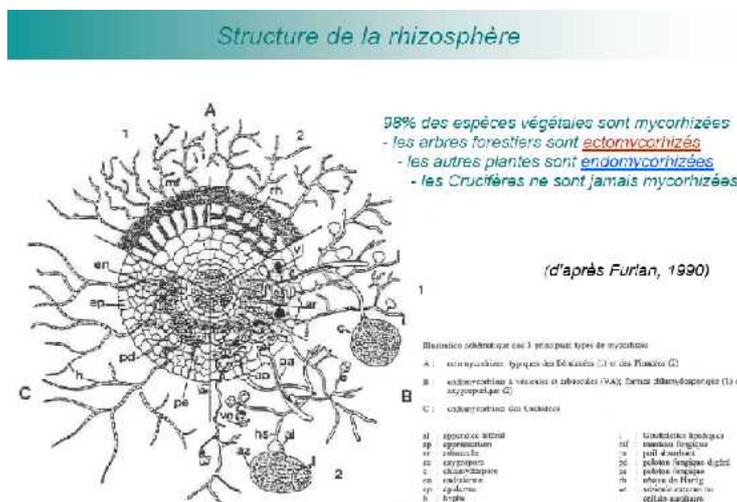


On peut aussi citer dans ce groupe une autre espèce fixatrice d'azote, chez les monocotylédones : *Azospirillum brasilense*.

- la **seconde regroupe les bactéries qui vont stimuler la plante** de manière indirecte (remarque : certains champignons peuvent aussi avoir cette fonction):
  - soit en minéralisant des composés organiques, ces minéraux devenant absorbables par les poils absorbants
  - soit en rendant disponibles des éléments qui l'étaient peu, en sécrétant des acides organiques (ex : solubilisation des phosphates calciques)
  - soit en contrôlant le développement de pathogènes (par production d'antibiotiques, par parasitisme, ou par appauvrissement du milieu en éléments nutritifs)
- enfin, la **troisième catégorie regroupe des micro organismes stimulant la croissance du végétal**, en émettant des phyto hormones (gibbérélines, cytokinines, acide indolacétique...), des vitamines et certains acides aminés.

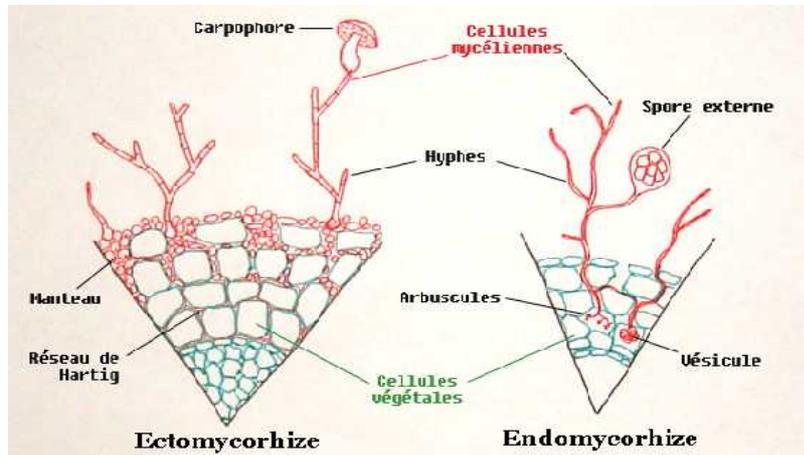
### 3.4.2 Avec certains champignons du sol

Nous venons juste d'évoquer certains champignons de la rhizosphère pouvant stimuler la plante de manière indirecte ; nous allons maintenant voir les champignons s'associant avec les plantes, en symbiose, il s'agit des mycorhizes. On estime que 98% des espèces végétales sont mycorhizées ; la famille des *Brassicacées* ne l'est pas (Choux, colza, moutarde, navet, radis...), la betterave non plus...



### 3.4.2.1. L'association à l'intérieur de la plante

Il existe trois types de mycorhizes ; celles qui nous concernent au premier plan sont les endomycorhizes, qui s'associent aux plantes cultivées. Le terme endo signifie que le champignon pénètre à l'intérieur des tissus végétaux. L'hyphe pénètre les cellules corticales et la progression dans le parenchyme se fait à la fois inter et intra cellulièrement. A l'intérieur des cellules, le champignon forme des suçoirs très ramifiés, les **arbuscules**, enveloppés par une membrane formée par l'hôte. Cette interface est de siège d'échanges actifs.



Des vésicules volumineuses (lieu de stockage des réserves), riches en lipides et en calcium, se différencient le long des hyphes et parfois dans les cellules

L'infection par un champignon à arbuscules et vésicules n'entraîne pas de modification apparente de l'aspect extérieur des racines, ce qui explique que le caractère quasi-universel de ces associations soit souvent méconnu.

### 3.4.2.2 Hors de la plante

Les champignons mycorhiziens vivent en parties à l'intérieur des tissus des végétaux, où leurs mycéliums est en contact étroit avec les cellules vivantes du parenchyme cortical mais aussi à l'**extérieur** où les filaments prospectent un volume incomparablement plus grand que le volume des poils absorbants .



Les hyphes appliquées à la surface des agrégats, sont en contact avec les particules élémentaires du sol et leur faible diamètre leur permet de pénétrer dans les pores les plus fins.

### 3.4.2.3 Les échanges Plantes/Champignons

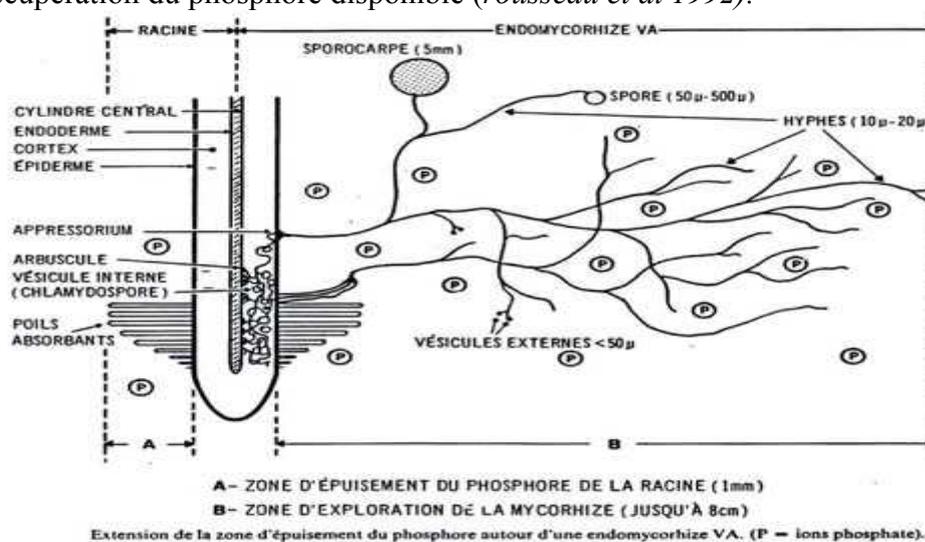
Les champignons reçoivent des plantes des substrats carbonés simples (de 5% à 10% des composés photosynthétisés) et des substrats de croissances. Ils bénéficient d'une situation qui le mets a l'abri des compétiteurs.

Les plantes tirent de l'association des avantages qui se traduisent par une amélioration de leur croissance.

Le bénéfice le plus direct et le plus étudié est l'amélioration de la nutrition phosphatés ; on a montré que des plantes possédant des endomycorhizes avaient un coefficient d'utilisation des engrais phosphatés 3 à 5 fois plus élevé que des plantes témoins non mycorhizées (Blal et al 1990).

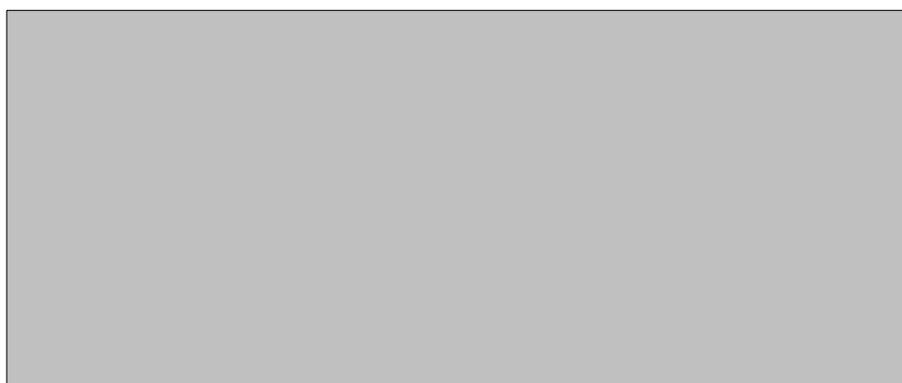
Le phosphates, très peu solubles, est en effet rapidement épuisé dans la solution du sol au voisinages des racines et le relargage, puis la diffusion des ions solubles immobilisés sont rarement assez rapide pour satisfaire la totalité des besoins de la plante.

Les champignons mycorrhizogènes, en explorant un grand volume de sol, permettent une meilleure récupération du phosphore disponible (rousseau et al 1992).



Les mycorhizes peuvent aussi contribuer à la solubilisation des phosphates minéraux insolubles, mais cet effet est négligeable, comparé à la minéralisation du phosphore organique, assuré grâce à leurs enzymes (phytase, phosphatase acide). Le phosphore ainsi extrait du sol est accumulé sous forme de polyphosphates dans les vacuoles des filaments mycéliens, d'où il transporté vers les racines.

En ce qui concerne les autres éléments, les plantes mycorhizées assimilent mieux le zinc, peu mobile comme le phosphore (Kothari et al 1991), mais aussi K, Ca, Mg, Cu, Mn, Fe (voir tableau ci dessous).



Plusieurs auteurs observent une meilleure assimilation de l'azote.

IL semble que la mycorhization améliore aussi l'assimilation de l'eau par la plante en conditions limitantes.

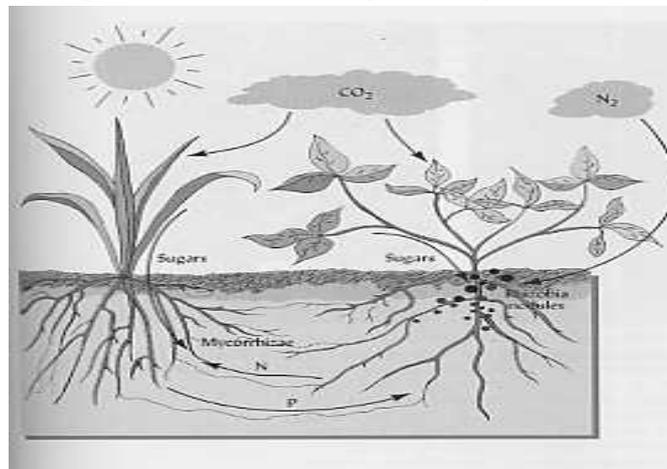
#### 3.4.2.4 Autres effets favorables

La rhizosphère d'une racine mycorhizées n'est pas la même que celle d'une racine non mycorhizées, de sorte qu'il est plus juste de parler de mycorhizosphère.

Aux produits de la rhizodéposition s'ajoute les exsudats propre au champignon ( acides organiques , antibiotiques ). Comme nous l'avions évoqués pour des bactéries et champignons de la rhizosphère, ces sécrétions des champignons mycorhiziens se traduisent souvent par une protection des racines contre un grand nombre de parasites du sol : champignon, bactéries, nématodes.

La structure du sol est, aussi, considérablement modifiée au voisinage des racines mycorhizées. La grande abondance des filaments mycéliens assure un assemblage des particules de sol en agrégats stables et volumineux, ce qui améliore à la fois la circulation des gaz et la rétention de l'eau.

Un autre aspect de la symbiose est la possibilité, pour un champignon, de coloniser à partir de ses hôtes les racines qui se trouvent à proximité. Il se crée des ponts mycéliens multiple qui relie entre elles non seulement des plantes de la même espèce, de genre, de familles différentes.



Grâce à ces connexions, le passage des nutriments d'une plante à une autre est possible.

Ceci a deux conséquences écologiques importantes : d'une part, les matériaux des racines sénescents peuvent être récupérés et réutilisés immédiatement dans les racines en croissance : d'autre part , dans des milieux où la concurrence entre espèces est intense, les plantes peu compétitives peuvent néanmoins subsister grâce au transfert nutritionnel assuré par les ponts mycéliens entre les espèces dominantes et les espèces dominées .

Le maintien d'une grande diversité spécifique demeure ainsi possible, notamment en système prairial( grime et al 1987).

### 3.5 Fonctionnement chimique de la rhizosphère

Nous venons de voir le fonctionnement biologique de la rhizosphère. Mais comment fonctionne-t-elle du point de vue chimique?

#### 3.5.1 Un flux d'ions du sol vers la racine....

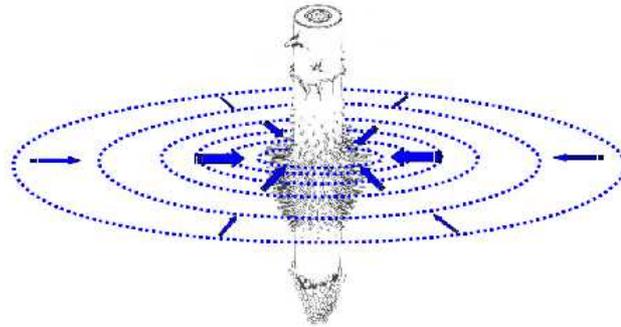
##### 3.5.1.1 ...assuré par le mouvement d'eau

Le système racinaire d'une plante est composée d'autant de terminaisons qui sont des sièges actifs de flux d'eau, dans la zone pilifère. En absorbant de l'eau, la racine crée un point de potentiel

hydrique plus faible à sa proximité, et donc un flux d'eau se crée (rappel : l'eau va toujours du potentiel le plus élevé vers le potentiel le plus faible).

### Fonctions de la rhizosphère

*Des racines qui prélèvent dans le sol l'eau et les éléments minéraux dont la plante a besoin.*



*Une symétrie radiale, donc des flux d'autant plus intenses que l'on s'approche de la racine*

C'est ce flux d'eau qui permet à la plante d'absorber des ions minéraux nécessaires à sa croissance. Les plantes vont les prélever de manière sélective, pour répondre à leur besoin.

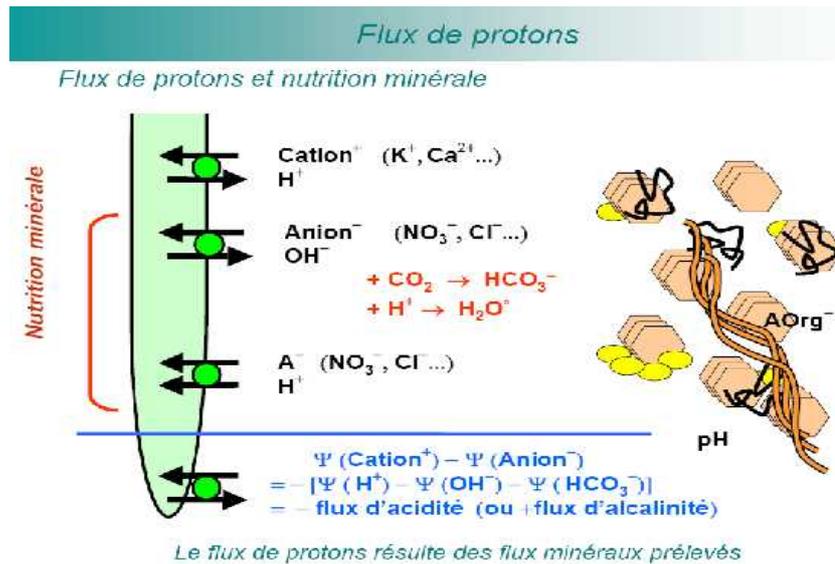
### 3.5.2.2 ...et qui a des conséquences sur le pH de la rhizosphère

18 éléments sont nécessaires à la croissance des végétaux ; si l'on enlève C,H,O qui sont absorbés sous forme de CO<sub>2</sub> et de H<sub>2</sub>O, il reste 15 éléments, que les plantes prélèvent dans le sol sous forme d'ions en solution ; ceux-ci peuvent être soit positifs, soit négatifs :

Pour les positifs :	Potassium	K <sup>+</sup>
	Calcium	Ca <sup>2+</sup>
	Azote (Ion Ammonium)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
	Magnésium	Mg <sup>2+</sup>
	Fer	Fe <sup>2+</sup> , Fe(OH) <sub>2</sub> <sup>+</sup> , Fe(OH) <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup>
	Manganèse	Mn <sup>2+</sup>
	Zinc	Zn <sup>2+</sup> , Zn(OH) <sup>2+</sup>
	Cuivre	Cu <sup>2+</sup> , Cu(OH) <sup>+</sup>
	Cobalt	Co <sup>2+</sup>
	Nickel	Ni <sup>2+</sup> , Ni <sup>3+</sup>
Pour les négatifs :	Azote (Ion Nitrate)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
	Phosphate	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ou H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
	Sulfate	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
	Chlorure	Cl <sup>-</sup>
	Molybdène	MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , HMoO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
	Bore	H <sub>2</sub> BO <sub>3</sub> <sup>-</sup>

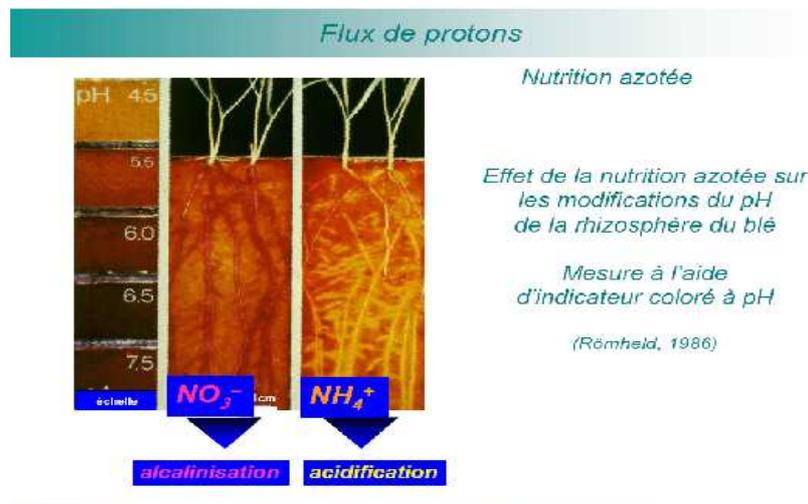
Lorsque la racine absorbe ces ions, elle rejette dans le milieu extérieur des ions H<sup>+</sup> dans le cas de l'absorption de cations et des ions OH<sup>-</sup> (ou HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) dans le cas d'une absorption d'anions, pour équilibrer les charges de part et d'autre de la membrane.

On peut alors distinguer 2 cas : si la plante a absorbé plus de cations que d'anions (bilan cations-anions > 0), il y aura un flux de protons positifs dans le milieu extérieur et donc acidification (baisse du pH)



Au contraire, si la plante a absorbé plus d'anions que de cations ((bilan cations-anions < 0), il y aura un flux de protons négatifs dans le milieu extérieur et donc alcalinisation (hausse du pH)

Comme les ions azotés peuvent être soit des cations ( $\text{NH}_4^+$ ) soit des anions  $\text{NO}_3^-$  et qu'il s'agit du principal élément absorbé en quantité, la forme azotée absorbée détermine soit qu'il y ait acidification, soit alcalinisation.

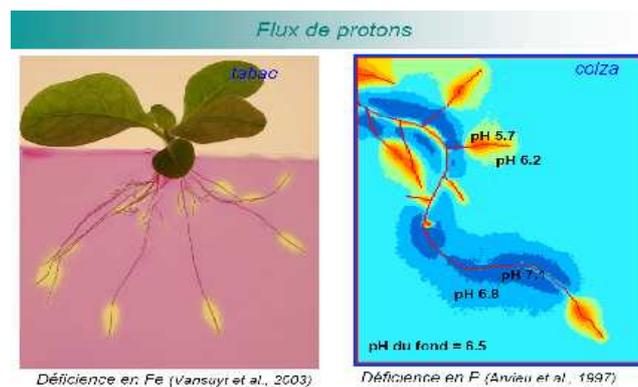


### 3.5.2 Différentes voies pour rendre disponibles les éléments

Nous avons vu qu'un flux d'eau entraîne les ions vers la racine, siège d'une absorption sélective de ces éléments. Or il faut que l'ensemble des éléments se présentent en quantité suffisante pour pouvoir réaliser cette sélection. Le problème est que certains éléments sont présents en quantité très faibles ou sous des formes peu disponibles (passage en solution très lent et difficile). Faisons un point sur les stratégies qu'ont les plantes pour assurer leurs besoins en éléments dans ces conditions :

- ce que nous avons déjà vu :
  - hausse des surfaces d'échanges = poils racinaires
  - associations bactériennes symbiotiques = hausse disponibilité azote

- associations mycorhizienne = hausse disponibilité phosphore, zinc
- stimulation de populations bactériennes minéralisatrices= hausse de la disponibilité d'éléments qui étaient sous forme organique
- stimulation de populations bactériennes sécrétant des acides organiques solubilisant certains ions peu disponibles (ex : phosphore)
- Autres stratégies
  - forte absorption d'un élément dans la rhizosphère et désorption de formes adsorbées de cet élément au sein du complexe d'échange (ex : potassium interfoliaire des feuillettes d'argile)
  - sécrétions parmi les exsudats racinaires d'acides organiques qui, en plus du flux de protons du à l'absorption d'ions minéraux, génèrent une acidité dans la rhizosphère. Celle-ci permet de libérer dans la solution des éléments combinés et peu disponible (ex. du Fer) et doté d'une charge négative, ils peuvent désorber des ions phosphates eux aussi négatifs. Enfin, certains de ces acides organiques vont pouvoir chélater les ions  $Fe^{3+}$ ,  $Zn^{2+}$  et  $Zn(OH)^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ , et les complexes formés restent solubles, et vont pouvoir rejoindre par le flux d'eau la surface de la racine où l'ion chélaté sera séparé du chélatant, puis absorbé.



- chez les graminées, sécrétion d'acides aminés appelés phytosidérophores, puissants chélatant d'ions  $Fe^{3+}$ ,  $Zn^{2+}$  et  $Zn(OH)^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ , qui au contraire des autres chélatants ci-dessus, peuvent pénétrer dans la racine.

### 3.6 Conclusions

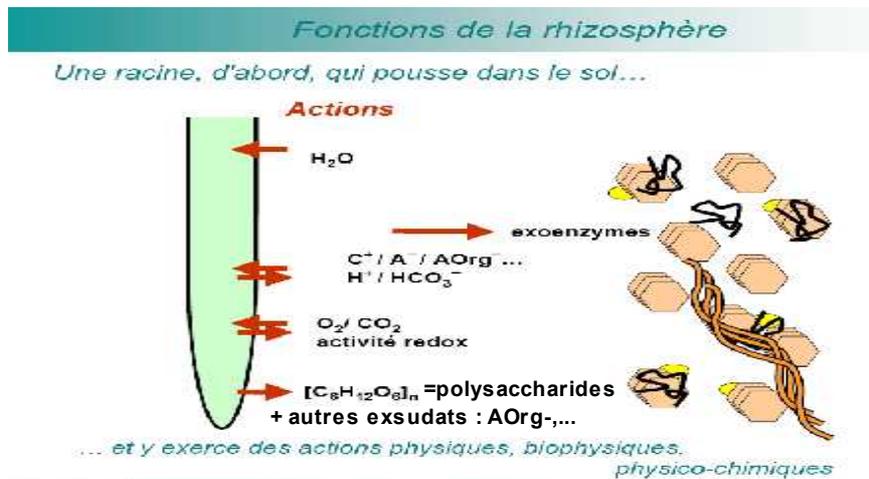
La rhizosphère est donc différente du sol environnant par :

- son pH, souvent plus acide (même si des alcalinisations sont possibles)
- une abondance et une composition des MO différente ( exsudats racinaires, acides organiques)
- une forte biomasse microbienne et fongique
- son potentiel d'oxydoreduction Eh (souvent plus faible)

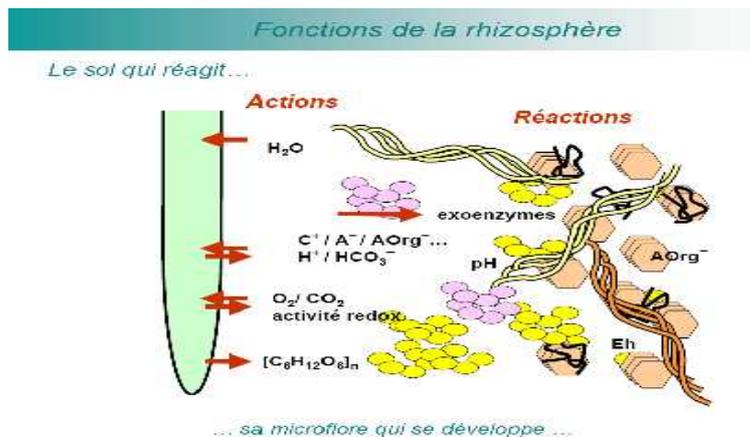
Ces différences sont dues à l'arrivée de la racine ; comme pour les vers de terre, où la drillosphère est différente du sol environnant, la racine mérite son nom d'ingénieur de l'écosystème, au sens où elle influence les populations de microorganismes, les propriétés physiques et chimiques de son environnement.

On peut résumer cela en 3 étapes :

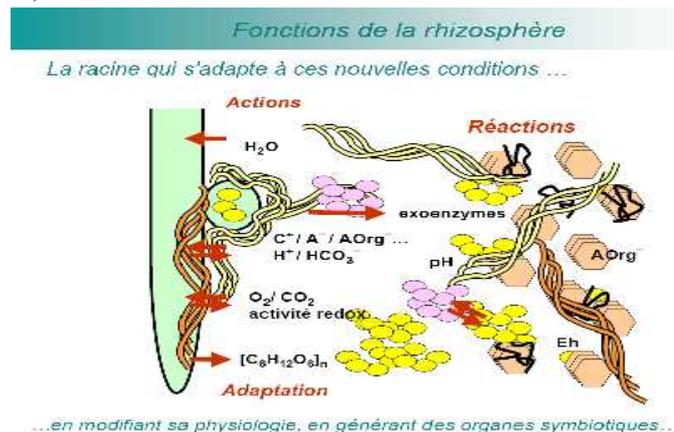
Lorsque la racine arrive dans le sol, elle y exerce des actions physiques, des secretions, et des modifications chimiques



En réaction, le sol 'répond' et la microflore (bactéries, champignons, mais aussi algues et protistes..) se développent



La racine s'adapte à son tour à ces réponses du sol : elle modifie sa physiologie en générant des organes symbiotiques, et va recueillir des avantages de ces modifications d'environnement : flux d'éléments via ces organes symbiotiques (N et P surtout) et flux d'eau enrichi d'une part en éléments nutritifs, pour certains à l'état chélaté et d'autre part en facteurs de croissance (phyto-hormones, vitamines, acides-aminés).



## 4. Bactéries du sol

Nous avons déjà abordé certaines fonctions des bactéries du sol dans les parties précédentes : cycle de la matière organique, rôle au sein de la rhizosphère... Nous allons ici voir les grandes fonctions assurées par ces êtres vivants du sol.

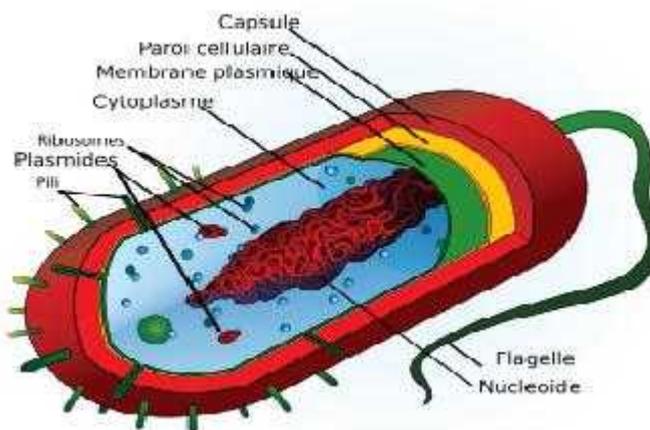
Les bactéries sont des êtres très petits, entre 0,5 et 5  $\mu\text{m}$  : les plus petits sont donc de la taille moyenne des particules d'argile. Elles représentent **le groupe le plus diversifié** des organismes du sol : un gramme de sol contient environ 20 000 différentes espèces.

En conditions satisfaisantes **d'aération du sol**, les bactéries aérobies prédominent. Une microflore anaérobie s'installe pour un potentiel Eh  $< 200\text{mV}$ .

Les bactéries sont aussi sensibles au **pH du sol**. En conditions acides, elles sont moins présentes, alors que les champignons y résistent plus facilement.

Au niveau de leur métabolisme, certaines utilisent du carbone contenu dans des matières organiques, elles sont **hétérotrophes** et utilisent l'énergie issue de la dégradation de ces molécules organiques ; d'autres sont **autotrophes** vis à vis du carbone, c'est à dire qu'elles utilisent le carbone du  $\text{CO}_2$  ou des carbonates  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  pour leur métabolisme, et tirent leur énergie de l'oxydation d'éléments comme l'ammonium  $\text{NH}_4^+$ , le fer, le soufre.

En terme de fonctions, les bactéries sont donc impliquées dans de nombreuses réactions d'oxydoréduction d'éléments dans le sol. D'autres fonctions concernant le cycle de la matière organiques sont 'pilotees' par des bactéries : humification, minéralisation.



### 4.1 Bactéries et oxydoréductions

#### 4.1.1 Dans le cycle de l'azote

Le cycle de l'azote a une grande importance dans les sols cultivés ; cet élément est celui du sol absorbé en plus grande quantité par les végétaux. Nous verrons dans la partie suivante en détail le cycle de l'azote ; il s'agit ici d'aborder des étapes clefs de ce cycle maîtrisées par des bactéries

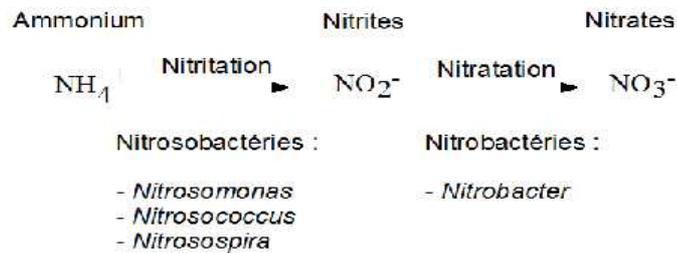
##### 4.1.1.1 Nitrification

L'azote issu de la minéralisation des matières organiques est en majorité de l'ammonium  $\text{NH}_4^+$  ; cette forme azotée peut aussi être apportée sous forme d'engrais. En conditions aérobies, des micro-organismes ont l'oxyder en 2 étapes pour se procurer de l'énergie (bactéries autotrophes).

Cette transformation de l'ammonium en nitrates est très rapide, et si les conditions sont réunies, les sols ne contiennent en général que peu d'ammonium ; cependant, dans la rhizosphère, il y a généralement une chute de l'oxygène disponible par augmentation de la respiration, et les conditions

anaérobies font que la forme ammonium est souvent bien présente.

## La nitrification



Conditions :

- bonne aération
- pH >6
- présence de  $\text{CO}_2$  ou de carbonates  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$

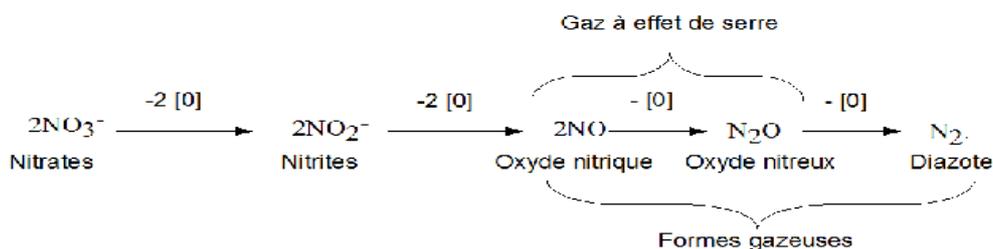
### 4.1.1.2 Dénitrification

La dénitrification, au contraire de la nitrification, est un processus en partie biologique réducteur, en conditions anaérobies. Il est réalisé par des bactéries hétérotrophes du genre *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Micrrococcus*, *Achromobacter* qui réduisent les nitrates en composés gazeux : les oxydes d'azote NO,  $\text{N}_2\text{O}$  parfois même jusqu'au  $\text{N}_2$ . (des bactéries autotrophes, tirant leur énergie de l'oxydation du soufre, peuvent aussi dénitrifier : ex de *Thiobacillus denitrificans*) Cela se traduit par des pertes d'azote depuis le sol jusqu'à l'atmosphère. Les oxydes d'azote volatils NO et  $\text{N}_2\text{O}$  sont des gaz très problématiques. NO contribue fortement à l'effet de serre (pour une quantité identique, 300 x plus que le  $\text{CO}_2$ ) et  $\text{N}_2\text{O}$  contribue à la destruction de la couche d'ozone.

Une partie des engrais azotés utilisés par l'agriculture, qui ont déjà beaucoup consommé d'énergie pour leur synthèse peuvent donc se retrouver (en conditions de sols tassés ou saturés en eau) dans l'atmosphère, participer à l'effet de serre et à la destruction de la couche d'ozone !

Ce processus est utilisé pour dénitrifier des eaux polluées par les nitrates.

## La dénitrification



Conditions (dans le cas des bactéries hétérotrophes):

- aération faible (sols compactés ou sols gorgés d'eau (Hydromorphie))
- pH > 5
- présence de composés organiques

Conditions (dans le cas de *Thiobacillus dénitrificans*)

- aération faible
- présence de composés soufrés réduits
- pH > 5

### 4.1.1.3 Fixation de N<sub>2</sub> atmosphérique

Des bactéries spécifiques peuvent utiliser l'azote gazeux atmosphérique N<sub>2</sub>. On distingue la fixation libre et la fixation symbiotique. Dans la littérature, certains auteurs mettent en avant une troisième voie de la fixation d'azote : la fixation associative au sein de la rhizosphère.

Toutes ces bactéries fixatrices possèdent sensiblement le même complexe enzymatique, en particulier une enzyme Nitrogénase qui leur permet d'oxyder l'azote gazeux.

- **La fixation libre** est effectuée soit par des bactéries hétérotrophes aérobies comme *Azotobacter* ou *Beijerinckia*, ou anaérobies comme *Clostridium*, soit par des organismes photosynthétiques : les algues bleues (*Cyanophycées*). Ces bactéries exigent des composés carbonés organiques, du phosphore et du molybdène, une très bonne aération. Une forte quantité d'azote nitrique (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) déprime la fixation.

La fixation libre est estimée entre 5 et 40 unités d'azote (unité = Kg.ha<sup>-1</sup>)

- **La fixation symbiotique** est due à des bactéries du genre *Rhizobium* principalement qui vivent en symbiose avec les racines des plantes, principalement les *Fabacées*, en formant des nodosités. La plante fournit des composés carbonés aux bactéries et utilise une partie des composés azotés élaborés par les bactéries. Des composés azotés sont aussi exsudés dans le sol. Une culture de trèfle ou de luzerne peut fixer plus de 200 unités d'azote/an. Des espèces tropicales peuvent fixer jusqu'à 500 unités d'azote/an

### 4.1.2 Autres oxydoréductions

Comme l'azote, d'autres éléments peuvent passer d'un état red-ox à un autre, selon les conditions, sous l'action de bactéries ; citons notamment :

- le soufre
- le fer
- le manganèse

Nous reverrons cela dans le chapitre suivant, concernant la chimie du sol ; gardons juste à l'esprit que des états chimiques différents d'éléments sont souvent dus à une action biologique, ici les bactéries en l'occurrence.

## 4.2 Bactéries et cycle de la matière organique

### 4.2.1 Humification

Nous avons vu que pour passer de la matière organique fraîche (résidus de culture, amendement organiques divers) aux molécules organiques humifiées, un cortège d'êtres vivants très divers est en jeu, et pour l'ensemble des bactéries entrent aussi en jeu dans les tubes digestifs notamment, mais aussi dans le sol.

Au niveau de leur action, elles condensent les molécules organiques simples (c'est à dire qu'elles lient les molécules les unes aux autres) en composés de plus en plus 'lourds', qui atteignent des poids moléculaires très importants (acides humiques, humine).

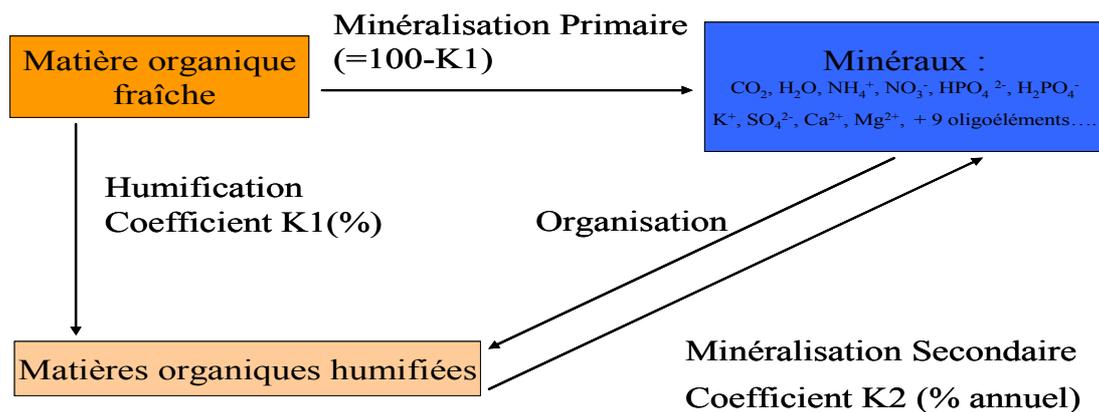
### 4.2.2 Minéralisation/organisation

Les bactéries peuvent aussi dégrader les substances organiques (fraîches ou humifiées) pour se procurer de l'énergie et des éléments : ces derniers passent sous formes de molécules simples, ioniques : on parle de **minéralisation**.

Mais les bactéries utilisent une partie de ces éléments minéraux pour élaborer leurs cellules, tissus et organes. Ce processus est nommé **l'organisation**.

Les 2 processus existent toujours de manière simultanée dans le sol ; leur importance varie selon

les conditions (température, humidité, conditions red-ox, pH...). Si la minéralisation l'emporte, il y a minéralisation nette.



## 5. Biologie du sol et bioagresseurs

Tout n'est pas 'rose' dans le sol ! Parmi les êtres vivants du sol, de nombreux peuvent être nommés des bioagresseurs, c'est à dire qu'ils vont causer des dégâts aux plantes cultivées.

La diversité des bioagresseurs des végétaux cultivés sera abordée par des exposés d'étudiants BTSA TV, par trinôme (10 thèmes cette année, au choix):

### Champignons :

- Fusarioses (*Fusarium roseum* et *Microdochium nivale*)
- Carie (*Tilletia caries*)
- Septoriose
- Aphanomyces
- Sclerotinia

### Insectes :

- Taupin
- Zabres

### Bactéries :

- *Ralstonia solanacearum*
- *Rhizoctonia solani*

### Nématodes

### Limaces

A traiter dans document (max 2 pages) + exposé (5 minutes)

1. Biologie, Cycle+étapes dans le sol
2. Plantes parasitées, Symptômes, incidence économique
3. Moyens de lutte : prophylaxie, moyens agronomiques, auxiliaires, matières actives, lutte biologique