

1. La vie tellurique

Le réseau trophique du sol est fondamentalement la communauté des organismes qui vivent dans le sol. Chaque champ agricole, forêt, prairie ou pâturage possède son propre réseau trophique avec un ensemble unique d'organismes du sol.

Le sol est un milieu oligotrophe, la plus part des microorganismes telluriques (algues, protozoaires, champignons, bactéries) sont impliqués dans de nombreux processus biogéochimiques (A. Richaume *et al.*, 2006). La communauté microbienne tellurique, qui joue un rôle primordial dans les cycles biogéochimiques du carbone, de l'azote et d'autres éléments, exercent également des effets bénéfiques ou délétères sur la croissance et la santé des plantes.

1.1. La diversité microbienne de sol

Il existe une grande diversité des communautés microbiennes dans le sol tant du point de vue de la diversité taxonomique que du point de vue des fonctions. En effet, il est estimé, par exemple, qu'un gramme de sol contient environ 10^{10} à 10^{11} bactéries (Horner-Devine *et al.* 2003), dont 6000 à 50000 espèces de bactéries et plus de 200 mètres d'hyphes de champignons (Curtis *et al.* 2002).

Les agents de la microflore du sol se divisent en quatre groupes : les algues, les champignons, les bactéries filamenteuses ou actinomycètes et les bactéries (Tableau 1).

Certains auteurs incluent également dans la microflore du sol les protozoaires et les virus. (Claude *et al.*, 2008)

1.1.1. **Les algues** n'existent qu'en surface de sol, car elles ont besoin du soleil pour leur photosynthèse, leur activité est limitée pendant la période où le sol est humide. Malgré leur faible nombre (cent mille grammes par gramme de sol), elles ont un rôle important comme source de matière organique et comme fixatrice d'azote en symbiose avec des algues bleues.

1.1.2. **Les champignons** forment un règne à eux seuls, leur importance est telle dans la fertilisation de sol. Ainsi, on peut avoir d'une à deux tonnes de champignons par hectare de sol agricole. Ils représentent les deux tiers de la biomasse microbienne du sol. Leurs rôles sont variés ;

-leur rôle le plus déterminant vient du fait qu'ils sont les seuls organismes sur la terre, à part quelques rares bactéries, à être capable de décomposer la lignine des plantes (est la principale source d'humus dans le sol)

-Pour effectuer ce travail fondamental, les champignons ont besoin d'un sol aéré, car tous les champignons, sauf ceux très particuliers du rumen de bovins, ont besoins d'oxygéné pour vivre. C'est la raison pour laquelle la végétation des marais, qui se décompose en absence d'air au fond de l'eau, donne naissance à la tourbe et non à l'humus.

1.1.3. **Les actinomycètes** sont un peu intermédiaires entre les champignons et les bactéries. De ces premiers, ils ont l'aspect filamenteux et la capacité de sécréter d'antibiotiques ; des secondes, ils ont la possibilité d'effectuer de très nombreuses réactions biochimiques. Leur nombre est d'un à cent millions par gramme de terre, et leur poids total est d'environ une tonne par hectare.

1.1.4. **Les bactéries** nous arrivons enfin au dernier groupe de microorganismes du sol : les bactéries. C'est le groupe le plus nombreux et le plus varié, puisque leur densité peut s'élever de dix millions à un milliard par gramme de sol. Du fait de leur petite taille, leur poids reste inférieur à une tonne par hectare de sol. Ce qui donne aux bactéries une place importante dans le sol, c'est leur extraordinaire variabilité biochimique qui leur permet de transformer toutes les substances du sol et de les faire entrer dans le monde vivant. (Claude *et al.*, 2008)

Tableau1 : Liste de quelques micro-organismes utiles vivants dans le sol
(http://symbiotech.over-blog.com/pages/Les_microorganismes_utiles-5459433.html)

Microorganismes	Leurs Rôle
Actinomycètes	groupe de bactéries appartenant à la flore du sol, qui jouent un rôle important dans la décomposition des matières organiques.
Azotobacter	bactérie aérobie stricte et libre dans le sol qui fixe l'azote atmosphérique chez la plupart des végétaux et le transforme en ammonium (20 à 40 kilos par hectare)
Pseudomonas spp	bactérie aérobie stricte et libre dans le sol. C'est une bactérie rhizosphérique phytoprotectrice des racines (PGPR). Elle crée un bio film adhésif et protecteur (mucilage microbien). Elle a également la capacité de solubiliser le fer.
Rhizobium	bactérie aérobie stricte qui fixe l'azote atmosphérique en association avec des plantes hôtes (légumineuses) et le transforme en ammonium (20 à 40 kilos par hectare).
Mycorhizes (glomus Intraradices et mosseae)	est une association entre les racines des plantes et des champignons. Elle existe chez 95% de toutes les plantes à fleurs et à graines. Dans la nature, elle est essentielle à la survie des deux partenaires. Chez la plante, elle augmente sa capacité d'absorber les minéraux essentiels et sa résistance aux maladies des racines. Et elle permet au champignon de tirer les glucides directement de son partenaire, sans la compétition des autres microorganismes.

1.2. Les microorganismes du sol et les cycles biogéochimiques

Afin de bien illustrer ces capacités biochimiques dans le monde microbien, nous allons décrire les cycles de quelques éléments entrants dans la matière vivante.

1.2.1. Cycle de carbone

Cet élément fondamental (figure 1) qui constitue près de la moitié des corps vivants.

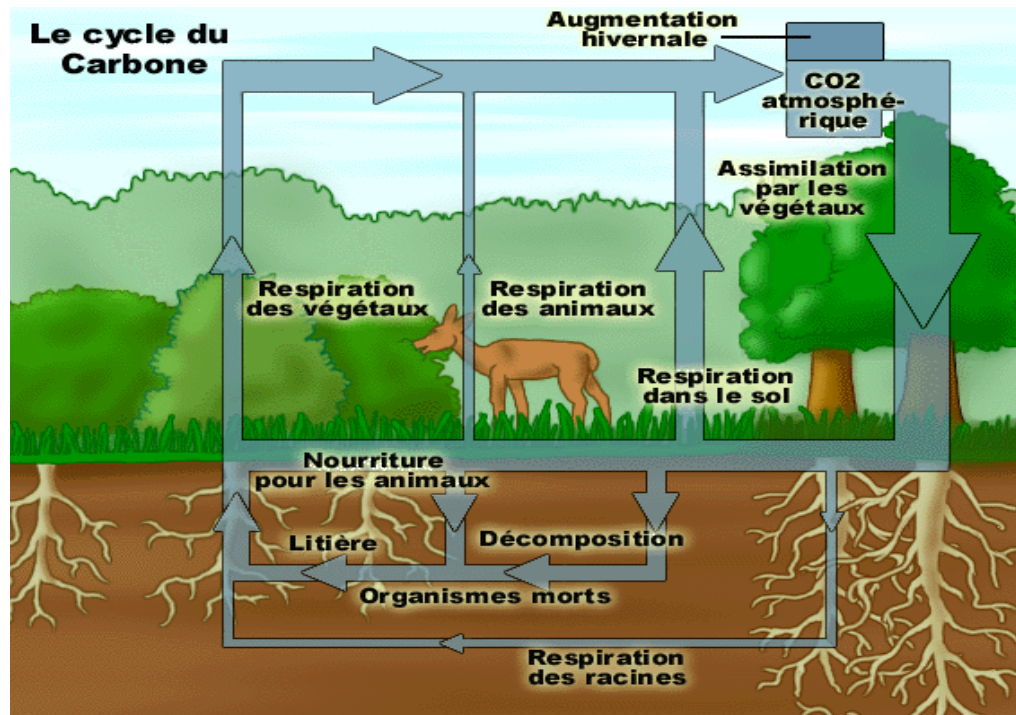


Figure 1 : Schéma du cycle de carbone.

Source : <http://www2.ustboniface.ca/cusb/abernier/Biologie/Ecologie/pg3.htm>.2007

1.2.2. Cycle d'azote

Le cycle montre le rôle des microorganismes dans la circulation de la matière de terre dans le monde vivant (figure2).

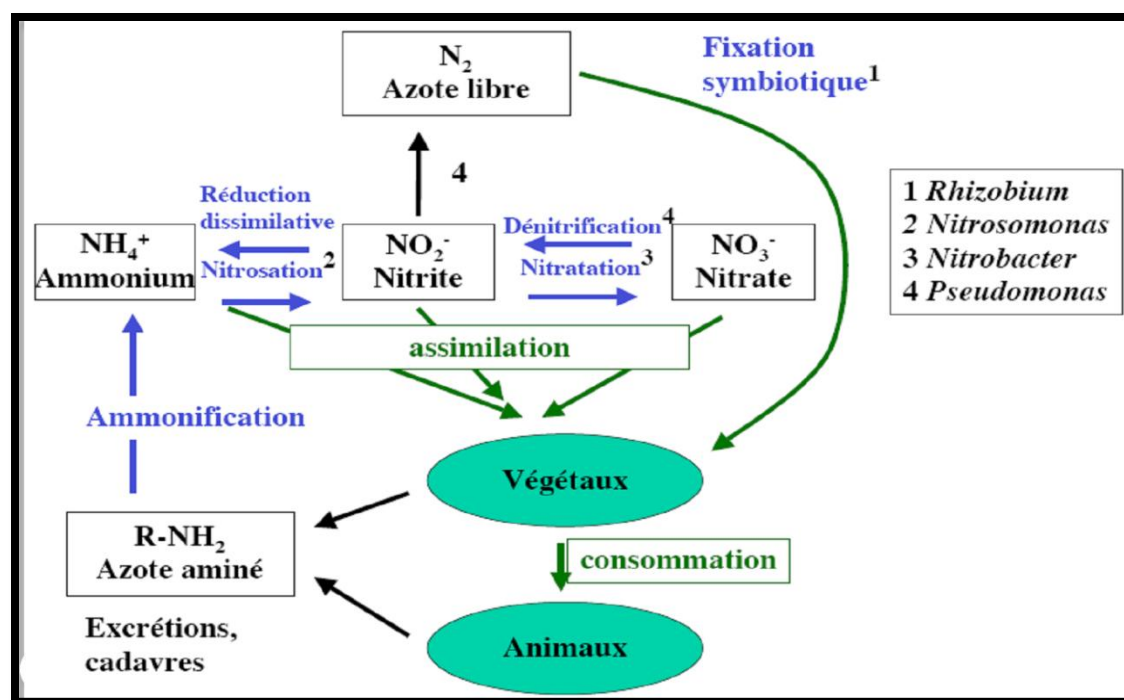


Figure 2 : Schéma du cycle de l'azote (<http://microbiosol.fr.gd/Cycle-Azote.htm>)

1.2.3. Cycle de phosphore

Le troisième cycle que nous décrivons est dominé par les champignons. Il s'agit de celui du phosphore (figure 3).

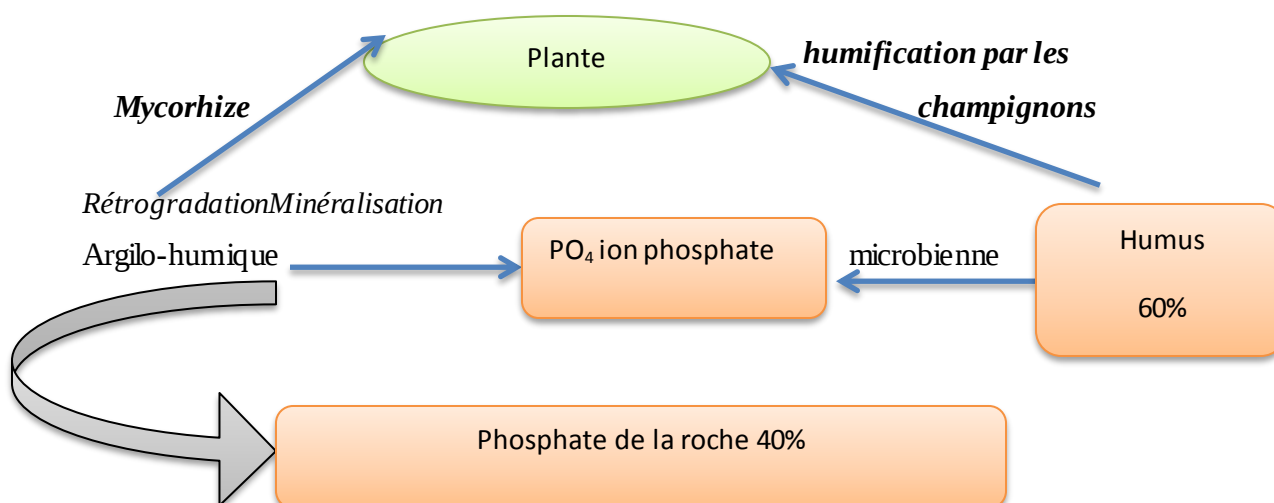


Figure 3 Schéma du cycle du phosphore (Claude *et al*, 2008)

Ces trois cycles biogéochimiques suffisent pour nous montrer le rôle clef joué par ces microorganismes dans ces cycles. On comprend alors l'intérêt pour l'agriculture de favoriser les cycles microbiens pour assurer une alimentation équilibrée à ses plantes.

2. Les interactions plantes-communautés microbiennes de la rhizosphère

Les interactions plante-communautés microbiennes de la rhizosphère pourront être étudiées avec une vision plus globale intégrant tous les partenaires de l'interaction avec leur diversité.

2.1. La rhizosphère

Le terme rhizosphère a été décrit pour la première fois en 1904 par un chercheur allemand Lorenz Hiltner, est le volume de sol entourant les racines et influencé par les matériaux libérés par ces mêmes racines (figure 4). La surface des racines des plantes, ce qu'on appelle le rhizoplane (Prescott, 2007).

Elle est caractérisée par une forte activité microbienne due au renouvellement des composés organiques assimilables issus des exsudats racinaires, des mucilages et des cellules épidermiques mortes. L'interaction plante-microorganismes dans la rhizosphère est un processus clé qui joue un rôle primordial dans le recyclage du carbone dans la rhizosphère et notamment dans la croissance et la santé des plantes. (G. Govaert *et al.*, 2010).

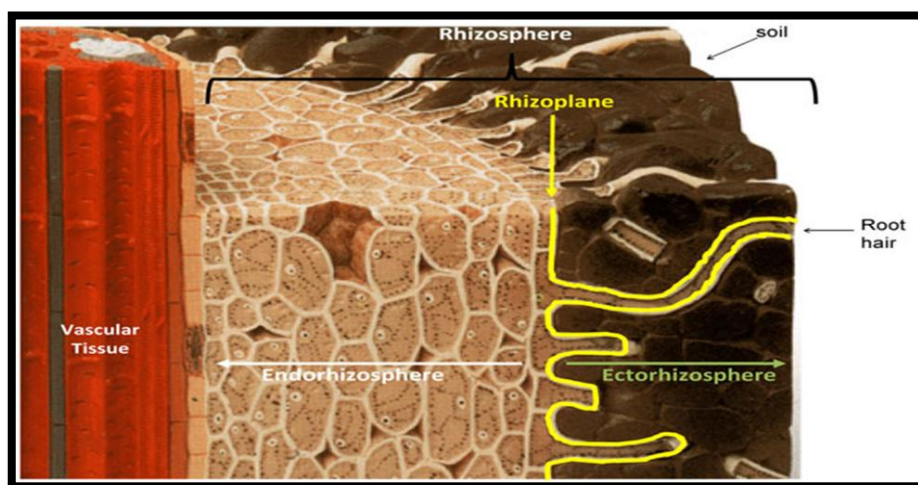


Figure 4 : Section d'une racine montrant la structure de la rhizosphère

(<http://www.nature.com/scitable/knowledge/library/the-rhizosphere-roots-soil-and-67500617>)

2.2. La diversité de rhizobium

Les Rhizobium sont des bactéries du sol, en forme de bâtonnets et non sporulantes, appartenant à la famille des Rhizobiaceae (Jordan, 1962). Ces bactéries présentent la capacité de former une symbiose avec des plantes de la famille des légumineuses (pois, haricot, luzerne, etc.). En condition de carence en azote, les Rhizobium induisent la formation de nodules au niveau des racines des légumineuses. (Prescott, 2007). Ces nodules sont de véritables organes d'échange métabolique entre les bactéries et les plantes. Cette symbiose va permettre aux bactéries de bénéficier d'un micro habitat exceptionnellement favorable au niveau de l'hôte leur procurant un apport en substrats carbonés issus de la photosynthèse. En se référant à la classification de plusieurs auteurs, il y a différents genres de la famille des Rhizobiaceae (Young 2001, Yong *et al.*, 2003, Willems 2006).

Tableau 2 : Exemples d'associations entre rhizobia et légumineuses
(Sawada *et al.*, 2003)

Rhizobia	Plantes hôtes
<i>Sinorhizobium meliloti</i>	Luzerne (<i>Medicago sp</i>)
<i>Rhizobium leguminosarum</i>	
<i>biovar viciae</i>	Pois (<i>Pisum</i>), Vesce (<i>Vicia</i>)
<i>biovar trifolii</i>	Trèfle (<i>Trifolium</i>)
<i>biovar phaseoli</i>	Haricot (<i>Phaseolus</i>)
<i>Mesohizobium loti</i>	Lotier (<i>Lotus</i>)
<i>Sinohizobium fredii</i>	Soja (<i>Glycine</i>)
<i>Rhizobium sp. NGR234</i>	Large spectre et <i>Parasponia</i> (non légumineuse)
<i>Rhizobium tropicii</i>	Haricot (<i>Phaseolus</i>), Faux Mimosa (<i>Leucaena</i>)
<i>Bradyrhizobium japonicum</i>	Soja (<i>Glycine</i>)
<i>Azorhizobium caulinodans</i>	<i>Sesbania</i>

2.3. Établissement des symbioses rhizobiennes

Le genre Rhizobium est un membre remarquable de la communauté de la rhizosphère. Cette bactérie peut aussi établir une association symbiotique avec légumineuses et fixer l'azote au bénéfice de la plante. Rhizobium infecte des légumineuses spécifiques et y forment des nodules (figure 7). La symbiose entre les

espèces *Rhizobium* et les plantes s'effectue avec un hôte spécifique tel que le cas de *Sinorhizobium meliloti* et la luzerne. Ce processus de symbiose implique des molécules secrétées par les plantes. Ces molécules s'appellent lectines et permettant la reconnaissance de l'hôte et la fixation de l'espèce appropriée de *Rhizobium* sur des sites spécifiques des racines (Prescott, 1995). Ces lectines produites par les hôtes permettent l'agglomération des *Rhizobium* (Prescott, 2007). De plus, les *Rhizobium* libèrent des lipopolysaccharides qui pénètrent dans le poil absorbant et dirigent la formation du filament infectieux. Lors du contact de la bactérie avec la racine, le poil aura une forme de crosse et, par conséquent, la bactérie y pénètre et induit la formation d'un filament infectieux par la plante qui s'allonge dans la racine vers la racine. Le *Rhizobium* se propage dans le filament infectieux et infecte les cellules adjacentes de la racine qui subiront par la suite des divisions successives et les nodules apparaissent. Les bactéries se multiplient dans les cellules infectées et se développent en ramifications gonflées, nommées bactéroïdes, qui sont responsables de réduire l'azote atmosphérique en ammoniac. En plus, il y a la production de leghémoglobine et de la noduline dans les bactéroïdes. La noduline formée cause l'élargissement du cortex cellulaire tandis que la leghémoglobine est à l'origine de la couleur rose chez les nodules et permet la régulation de l'oxygène chez les bactéroïdes (Oldroyd *et al.*, 2011 ; Prescott 2007).

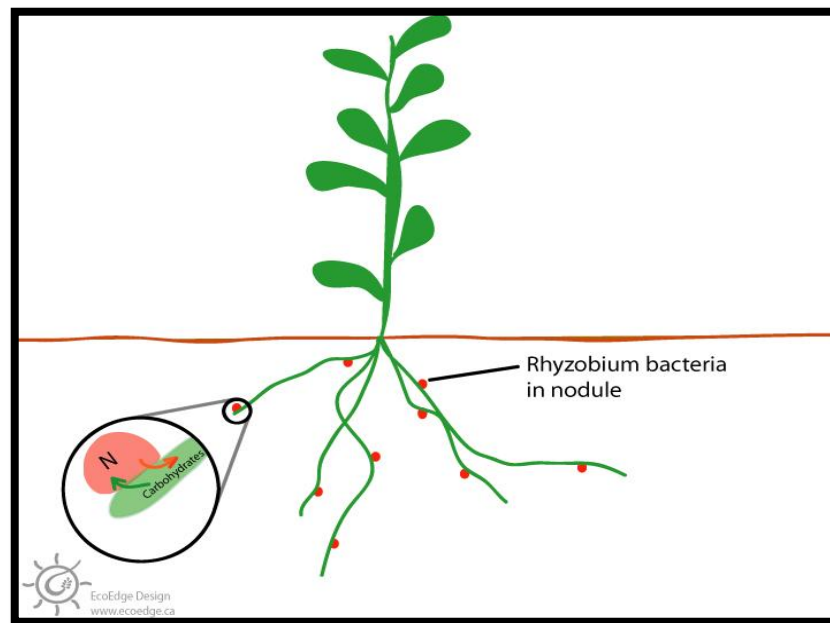


Figure 5 : établissement des symbioses rhizobiennes

source : <http://permaculturetokyo.blogspot.com/2009/02/rhizobium-symbiosis-with-woody-plants.html>

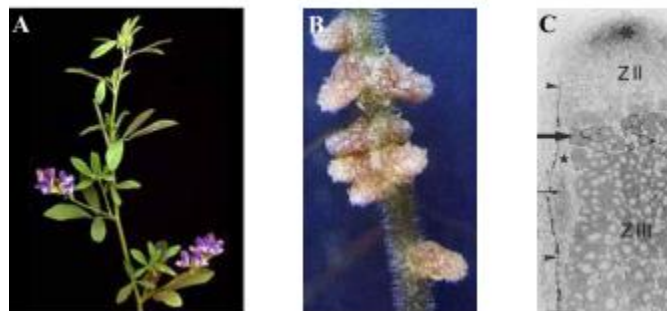


Figure 6 : Les nodules fixateurs d'azote chez les plantes

A-C. La symbiose fixatrice d'azote Rhizobium-Légumineuse, exemple de *Medicagosativa* et son symbionte *S. meliloti*. A. Tige et fleur de *M. sativa*. B. Nodules entiers. C. Section longitudinale d'un nodule.

➤ La formation de nodules racinaire par les rhizobiums :

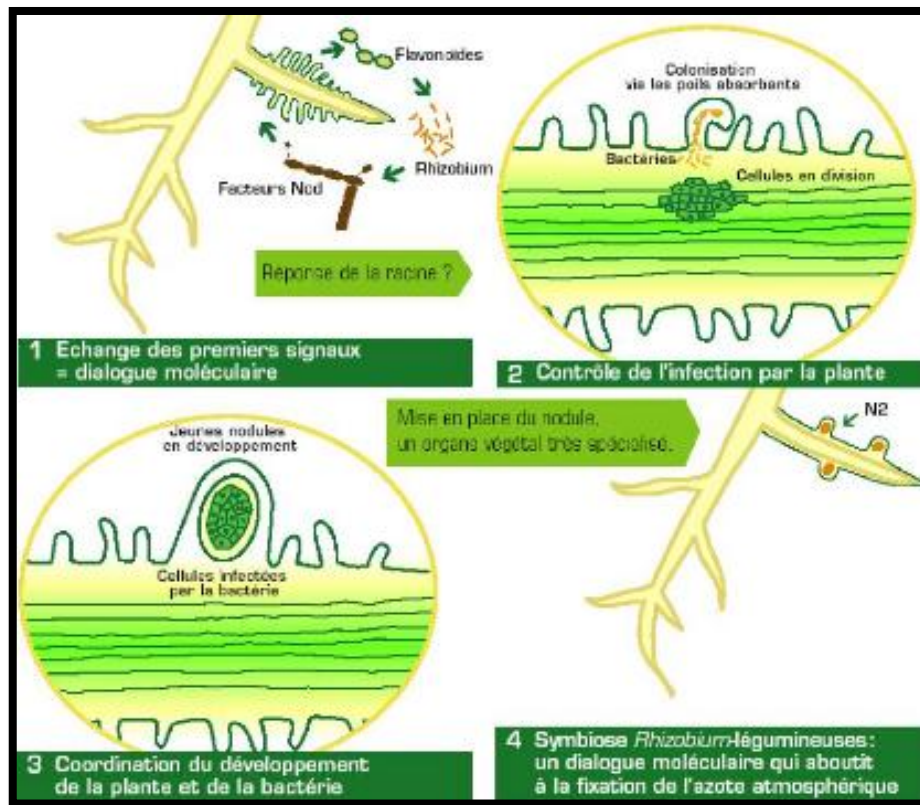


Figure 7: Dialogue moléculaire entre la plante et la bactérie lors de la mise en place d'une association symbiotique fixatrice de l'azote (Journet ; 2004).

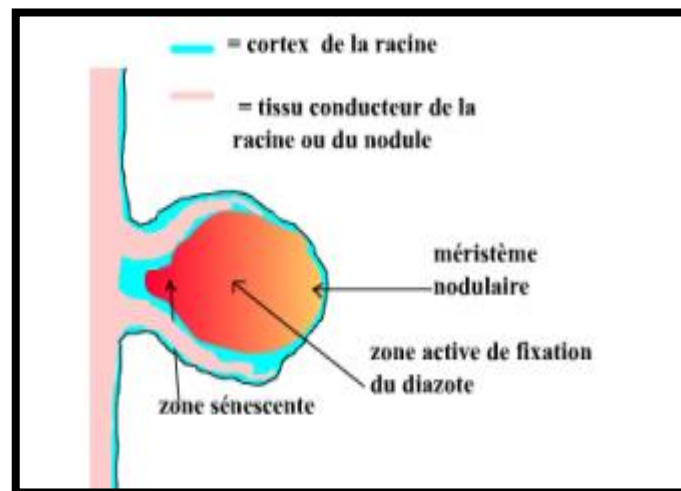


Figure 8: Racine en coupe longitudinale montrant un nodule fonctionnel

Source : http://www.perrin33.com/microbiologie/azote/entree-n_3.php

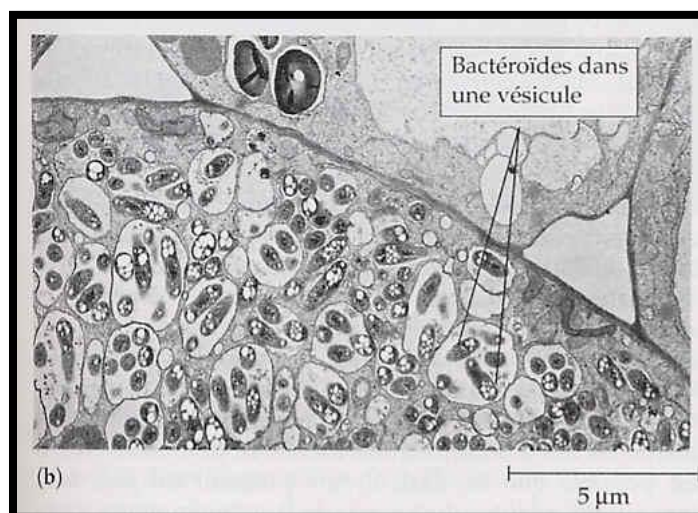


Figure 9 : Schéma montrant nombreux bactéroïdes dans une cellule d'une nodosité racinaire. Source :<http://biosol.esitpa.org/liens/rhizo2003/nodulation.htm>

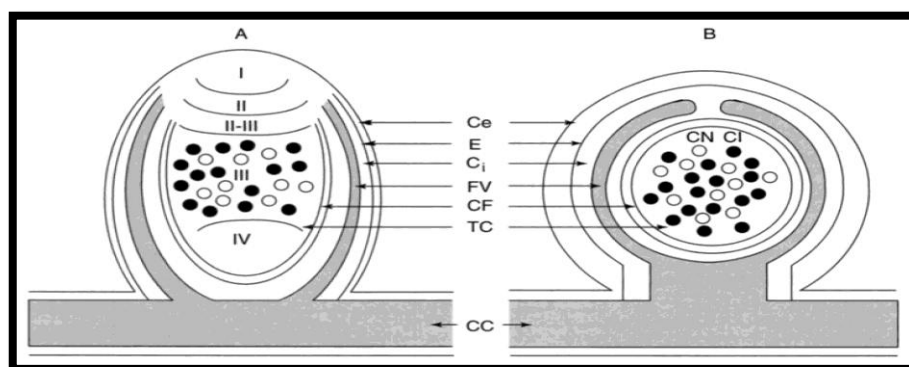


Figure 10: Coupe longitudinale schématique d'une nodosité de type indéterminé (A) et de type déterminé (B). I = zone méristématique, II = zone d'infection, II-III = inter-zone, III = zone fixatrice d'azote. IV = zone de sénescence. Ce = cortex externe, E = endoderme, Ci = cortex interne, FV = faisceau vasculaire, CF = cortex faisceau TC = Tissue conducteur, CC = Cortex conducteur (M.G. Jean-François ; 1997)

2.4. La spécificité symbiotique

L'une des caractéristiques majeures des associations rhizobium-légumineuse est leur spécificité d'hôte. En effet, une espèce de rhizobium donnée n'est capable, en général, d'établir une relation symbiotique efficace qu'avec un nombre limité de partenaires végétaux (tableau 3). De même une espèce de légumineuse ne peut être nodulée que par un certain nombre d'espèces de rhizobium. (G.H. William, 2003).

Cette spécificité serait contrôlée par les lectines de l'hôte qui reconnaissent certains glucides des capsules bactériennes. Les lipopolysaccharides sont un des

composés minoritaires de la membrane bactérienne externe qui jouent aussi un rôle important dans la spécificité rhizobiums légumineuses (Prescott, 1997)

3. Effet de la salinité sur le comportement des isolats

Les principaux facteurs limitant l'activité biologique dans les sols sont le déficit hydrique, la salinité, les températures élevées, les pH extrêmes et les carences en éléments nutritionnels. Les interactions fréquentes entre ces différentes contraintes affectent la croissance et la capacité de survie des micro-organismes dans les sols arides. (E.Cacciari *et al.*, 1998).

La salinisation des sols est le processus d'accumulation de sels à la surface du sol et dans la zone racinaire, qui occasionne des effets nocifs sur les végétaux et le sol; il s'ensuit une diminution des rendements et, à terme, une stérilisation du sol. La salinisation se produit généralement lorsque la quantité d'eau perdue par le sol par évapotranspiration dépasse celle provenant de l'infiltration des précipitations. Pour cette raison, nous avons étudié le facteur d salinité parmi ces facteurs abiotique. (P.Sylvie van, 2009).

Afin de caractériser les différences de comportement physiologiques et microbiologique des souches de rhizobiums isolées dans le sol de la rhizosphère de la plante *M.sativa,L.*

Tableau 3: tableau schématique de quelques effets de l'environnement sur la physiologie des nodules fixant l'azote. (H.Zahran *et al.*, 1998)

Facteurs	Effets
Températures	Sur la fixation de l'azote et /ou son assimilation Diffusion des gaz
Stress hydrique	Effet direct sur les nodules incluant une réduction de la porosité affectant l'assimilation de l'oxygène.
Salinité	Réduction de l'activité de la nitrogénase. L'inhibition de la synthèse leghémoglobine.
L'azote combine	Inhibition par les nitrites formes par la réduction des nitrates dans les bacteroides.