

Chapitre 3 : Diversité et fonctionnalité microbienne dans le sol.

1. Biodiversité du sol

À l'exception de sa structure et composition physicochimique, le sol est considéré comme un carrefour biologique multifonctionnelle pour la croissance des plantes, caractérisé par une biodiversité très élevée, richesse en matière organique et minérale et un régulateur des échanges et des flux dans l'écosystème.

De plus, le sol représente une niche microbienne très importante. Tous les types de microorganismes existent dans les sols. Ce sont soit des eucaryotes (algues et protozoaires), soit des procaryotes (bactéries et champignons). Leur distribution est fonction non seulement de la présence de substrats énergétiques (essentiellement des résidus végétaux) et d'éléments minéraux, mais aussi de nombreux facteurs physiques et chimiques caractérisant chaque sol, notamment la structure, l'aération, le pH, la température et la teneur en eau.

En général, les champignons contribuent pour plus de la moitié de la biomasse microbienne dans le sol. Mais, dans les sols hydromorphes, les algues ont tendance à proliférer en surface et les bactéries anaérobies en profondeur. Les virus sont souvent associés aux argiles à partir desquelles ils peuvent pénétrer dans les racines des plantes par des blessures (**Tableau 1**).

Tableau 1 : Abondance et biomasse des organismes vivants du sol.

Organismes	Nombre approximatif		Biomasse moyenne	
	par gramme de sol sec	par m ²	en kg/ha prof. 20 cm	en % (sans les racines)
Bactéries	10 ⁸ - 10 ¹⁰	10 ¹³ - 10 ¹⁵	1 500	25
Champignons	n.d.	n.d.	3 500	59
Algues	1 000 - 10 ⁵	10 ⁸ - 10 ⁹	10 - 1 000	traces
Protozoaires	10 ⁴ - 10 ⁶	10 ⁹ - 10 ¹¹	250	4
Faune du sol (sans protozoaires)	0,1 - 1 000 selon les groupes	10 - 5·10 ⁶ selon les groupes	1 - 5 000 selon les groupes	12
Racines	n.d.	n.d.	6 000	—
Total	n.d.	n.d.	env. 12 000	100

Les microorganismes du sol y jouent deux rôles essentiels : d'une part, ils sont responsables de transformations chimiques et même physiques qui se déroulent dans les sols ; d'autre part, ils agissent directement ou indirectement sur la nutrition des plantes. En fait, il existe tout un réseau d'interactions complexes entre les microorganismes du sol, les plantes, la faune du sol et la flore.

Les bactéries du sol peuvent participer à la formation de micro-agrégats dans le sol en produisant des polysaccharides, qui constituent l'essentiel de la matière organique humifiée. Les bactéries aérobies peuvent provoquer la consommation d'O₂ dans le sol, en particulier dans les sols aqueux avec peu de diffusion d'air. D'autre part, les bactéries qui fixent l'azote atmosphérique enrichiront le sol de ce minéral, et d'autres solubilisant le phosphate feront que ce dernier soit plus accessible aux racines des plantes et fertiliser le sol.

Les activités des champignons et des bactéries dans le sol affectent l'évolution de la matière organique, affectant ainsi le cycle des émissions de carbone, d'azote et de gaz à effet de serre. Par conséquent, l'étude des communautés microbiennes du sol est essentielle pour comprendre l'évolution et la fonction du sol.

2. Interactions des microorganismes dans le sol

L'interaction est un caractère fondamental du vivant tout comme le métabolisme. Elle prend des formes diversifiées particulièrement chez les microorganismes. Ces derniers interagissent non seulement entre eux mais aussi avec des plantes et les animaux.

Les interactions peuvent être conflictuelle ou bénéfiques :

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

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

-**Neutralisme** : Les deux populations se multiplient sans aucune interaction. Il y a peu d'exemples de neutralisme en microbiologie du sol; en effet il est difficile pour deux microorganismes de se développer de façon indépendante à la même place.

2.1. Interaction bénéfiques

➤ Mutualisme

Les deux populations ont **une influence bénéfique** l'une sur l'autre, éventuellement l'association est nécessaire à la survie des deux espèces. Ce type d'association est fréquent dans le sol, en raison des liens trophiques entre plusieurs groupements fonctionnels: fixateurs d'azotes et bactéries photosynthétiques, sulfato-réductrices et sulfo-oxydantes. Ex: le cas de bactéries thermophiles *Symbiobacterium thermophilum* et *Bacillus*. *Symbiobacterium* ne peut être cultivée sans la présence de *Bacillus* qui lui fournit du CO₂ issue de sa respiration. Le CO₂ permet à *Symbiobacterium thermophilum* de compenser l'absence d'anhydrase carbonique, enzyme responsable de plusieurs processus comme la photosynthèse.

➤ Symbiose

Dans le sol, les bactéries de la rhizosphère (couche de sol fixée aux racines des plantes) fixent l'azote et produisent des composés azotés utilisés par les plantes (exemple de la **bactérie** *Azotobacter* ou *Frankia*). En échange, la plante excrète au niveau des racines des sucres, des acides aminés et des vitamines qui stimulent la croissance des bactéries.

-D'autres bactéries dites **rhizobia** développe une symbiose avec des plantes légumineuses au niveau de nodules sur les racines ou les tiges, ces bactéries fixent à l'intérieur de ces nodules l'azote atmosphérique utilisé par la plante et en échange cette dernière leur assure les sucres, les acides aminés et les vitamines issus de la photosynthèse.

-**Les mycorhizes** sont des associations symbiotiques entre des champignons du sol et les racines des plantes. Il en existe deux principaux types, les ectomycorhizes (externes aux racines) et les endomycorhizes (internes aux racines). La mycorhization des racines améliore l'alimentation hydrique et minérale de la plante.

➤ Commensalisme

L'une des populations est bénéfiquement influencée par l'autre, la seconde n'étant pas affectée. C'est une interaction où un micro-organisme en tire un bénéfice mais l'autre n'en tire aucun. On trouve des exemples de commensalisme entre certaines **algues** qui favorisent la croissance de bactéries sans que leur propre taux de croissance soit modifié par la présence de la bactérie. On peut citer aussi l'exemple de bactérie chimiolithotrophe nitritante *Nitrosomonas* transforme l'ammonium en nitrite alors que la bactérie chimiolithotrophe nitratante *Nitrobacter* transforme le nitrite en nitrate. Par conséquent *Nitrobacter* dépend de ce que *Nitrosomonas* lui fournit alors que le bénéfice que cette dernière tire de la présence de *Nitrobacter* est moins évident.

2.2. Les interactions conflictuelles

➤ Compétition

Les deux populations sont en compétition pour un même substrat ou pour un même habitat. Dans le sol, la compétition peut intervenir au niveau du substrat énergétique, d'ions minéraux nécessaires à la croissance (phosphate, magnésium) ou d'oligoéléments (fer).

➤ Ammensalisme

L'une des populations est inhibée, l'autre non affectée. Un exemple classique est l'inhibition de la croissance d'une espèce par une substance antibiotique sécrétée dans le milieu par une autre. Ces antibiotiques sont en général libérés dans le milieu. Une association de type ammensalisme existe quand les métabolites excrétés par une espèce inhibent la croissance d'autres espèces: c'est le cas

des ions SH^- formés par les bactéries **sulfato-réductrices** qui inhibent la croissance de nombreux microorganismes.

➤ **Parasitisme ou prédation**

Il n'y a pas de frontière nette entre parasitisme et prédation: l'ingestion d'un petit organisme par un plus gros est appelé **prédation**, la destruction d'un gros organisme par un petit est **le parasitisme**.

- Le parasitisme existe entre certaines bactéries dans le sol, par exemple entre les *Bdellovibrio* qui se fixent sur la membrane d'autres bactéries, pénètrent dans leur cytoplasme, s'y multiplient et font éclater la cellule hôte en libérant des bactéries filles.
- Tous les virus sont des parasites obligatoires. La plupart des protozoaires du sol sont des prédateurs de bactéries. Cette prédation joue certainement un rôle dans l'équilibre entre les groupes de microorganismes dans les sols.
- Certaines maladies des plantes sont causées par des champignons et des virus. De nombreuses bactéries foliaires sont phytopathogènes. Exemple : *Erwinia amylovora* responsable de « feu bactérien » sur poirier et pommier.

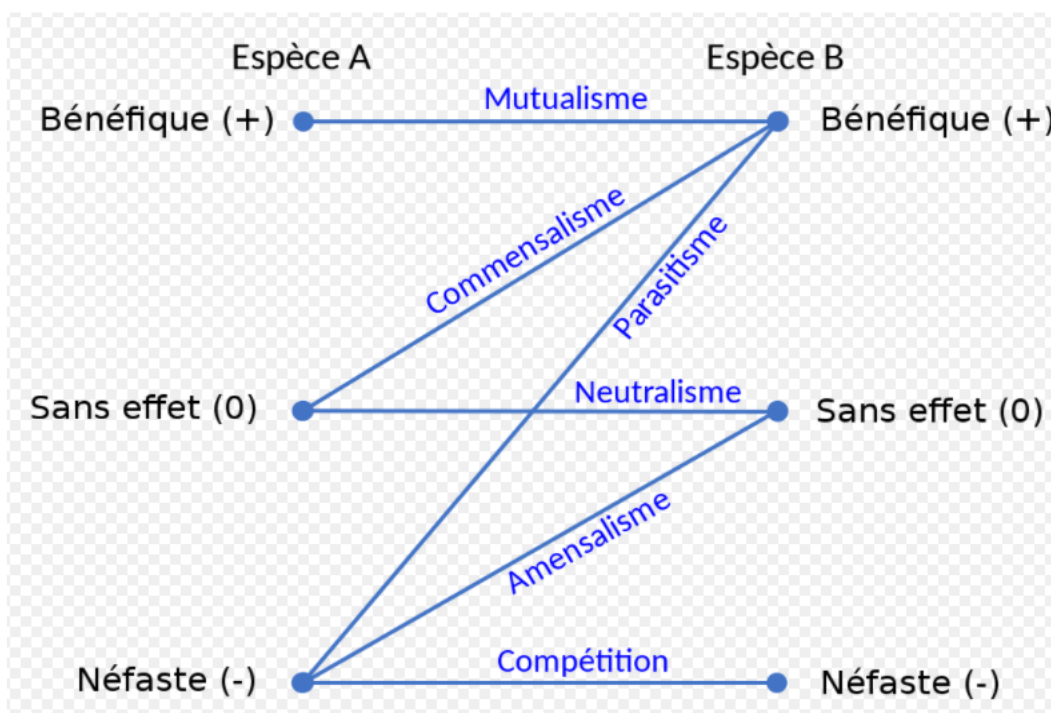


Figure 01 : Interactions biologiques.

3. Implication des microorganismes du sol

Rares sont les microorganismes pathogènes. En revanche, nombre d'entre eux favorisent la croissance des végétaux, assurent la dégradation de polluants, et fournissent des composés d'intérêt tels des enzymes, des antibiotiques ou d'autres molécules (antiviraux, antitumoraux). Parmi les microorganismes bénéfiques, il ya les champignons mycorhiziens, qui entretiennent des relations très intimes avec la plante. Ils apportent à la plante des éléments nutritifs, essentiellement le phosphore, utiles à sa croissance, et d'autre part ils renforcent ses défenses naturelles vis-à-vis de stress d'origine biotique ou abiotique. D'autres microorganismes, en particulier les bactéries du genre *Bacillus* ou *Pseudomonas* qualifiées de « PGPR », sont également capables de stimuler la croissance des plantes et de s'opposer à l'activité d'agents pathogènes.

3.1. Effet des microorganismes de la rhizosphère sur la croissance de la plante

Strictement, la rhizosphère est la région du sol sous l'influence de la racine... C'est le lieu fabuleux où les organismes communiquent entre eux en s'échangeant des molécules signaux ou/et les molécules de croissance (métabolites simples, hormones...), voire des molécules toxiques et d'autres encore.

Les microorganismes de la rhizosphère agissent sur la plante en mettant à sa disposition des molécules organiques absorbables par la racine (acides aminés, auxines, vitamines, antibiotiques) ou en améliorant sa nutrition minérale par solubilisation ou minéralisation d'éléments. Enfin la microflore de la racine modifie le développement du système racinaire, même si des structures spécialisées (nodules, mycorhizes) ne sont pas visibles.

➤ Influence directe des métabolites microbiens

Les plantes absorbent par leurs racines de nombreuses substances organiques, provenant de l'activité de la microflore, des résidus végétaux (éléments solubles de la litière) ou des apports extérieurs (pesticides). Ces composés, bien qu'absorbés en faible quantité, jouent un rôle important en inhibant ou stimulant des activités métaboliques de la plante.

-Les principales substances produites par les microorganismes et susceptibles d'influer sur le développement des plantes sont :

- des auxines, en particulier l'acide indol-acétique (AIA), synthétisé par de nombreuses bactéries;
- des acides aminés qui peuvent être excrétés soit après synthèse à partir de composés minéraux soit après décomposition des protéines;
- des vitamines;
- des antibiotiques qui agissent directement en influant sur le développement ou indirectement en protégeant la racine contre l'invasion par des microorganismes pathogènes.

➤ Influence indirecte sur la nutrition

-Par biodégradation de substances biologiquement actives vis-à-vis des plantes, les microorganismes ont un rôle détoxifiant très important.

-La toxicité de nombreux acides aminés ne peut en général pas s'exprimer dans le sol car ces composés sont très rapidement dégradés par les microorganismes. Les bactéries méthanogènes, en utilisant directement (acétate, formate) ou en contribuant à la dégradation des acides organiques produits par d'autres groupes dans les sols inondés, contribuent à la détoxification de ces sols, certains acides organiques étant inhibiteurs de la croissance des plantes.

3.1.1. Les rhizobactéries (RFCP ou PGPR)

Sont des bactéries qui ont le pouvoir de coloniser la rhizosphère. L'impact des rhizobactéries sur la croissance des plantes peut être bénéfique, neutre ou délétère. Durant les dernières années, l'étude de la biologie de la rhizosphère a mis en évidence un groupe spécial de micro-organismes bénéfiques qui colonisent les racines des plantes, stimulent leur croissance et les protègent contre certains pathogènes. On désigne ces bactéries par le terme rhizobactéries favorisant la croissance des plantes ou RFCP (en anglais : PGPR, acronyme de *Plant Growth Promoting Rhizobacteria*). Elles représentent environ 5% des bactéries vivant dans la rhizosphère. Les PGPR sont généralement des bactéries à Gram négatif. Elles appartiennent à plusieurs groupes taxonomiques: *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Rhizobium*,... . On distingue deux grands groupes de PGPR :

- les phytostimulatrices
- les phytoprotectrices.

• **Les PGPR phytostimulatrices** : elles influencent la croissance des plantes par :

- améliorant la biodisponibilité de certains nutriments par la fixation de l'azote atmosphérique, ou par solubilisation du phosphate.
- synthétisant des phytohormones comme des auxines, cytokinines, gibbérellines.
- Modulant le développement des plantes, grâce à une activité 1-aminocyclopropane-1-carboxylate désaminase, (ACC qui va entraîner une élévation racinaire).

- facilitant la mise en place ou le fonctionnement des symbioses mutualistes entre les racines et les bactéries fixatrices d'azote ou les champignons micorhiziens.

• **Les PGPR phytoprotectrices** : elles favorisent la croissance des plantes en réduisant le niveau de certaines maladies. Pour cela, elles peuvent agir :

- en produisant des antibiotiques délétères pour les pathogènes.
- Par interférence avec des signaux, en détruisant les molécules signal des pathogènes.
- En activant la résistance systémique induite des plantes, qui augmentera la résistance des plantes à l'attaque des pathogènes.
- En contrôlant la croissance des pathogènes par la compétition pour les éléments nutritifs, comme par exemple, la compétition pour le carbone et la compétition pour le fer dont la biodisponibilité dans le sol est très faible.

3.1.1.1. Les différents types des PGPR

a) Les Actinomycètes

Groupe de bactéries appartenant à la flore du sol, qui jouent un rôle important dans la décomposition des matières organiques. Les actinomycètes sont importants en raison surtout de leur rôle dans la fertilisation des sols, synthèse de composés complexes comme les ATB, vitamine et les stérols. Les enzymes sont aussi les plus importants produits des actinomycètes. Certaines sont utilisées à cet effet dans l'industrie alimentaire. Les glycosidases des actinomycètes jouent un rôle important dans la dégradation des biomasses végétales (amylase) et animales (chitinases).

b) Le genre *Pseudomonas sp* : Plusieurs rhizobactéries du genre *Pseudomonas* ont la capacité d'induire une résistance systémique chez la plante, ce qui engendre une protection contre un grand nombre d'agents pathogènes fongiques et bactériens.

c) Le genre *Rhizobium sp* : Les Rhizobia du grec « rhiza » qui signifie racine et « bio : vie », *Rhizobium* signifie donc littéralement organisme vivant dans la racine. Ils sont des bactéries formant une symbiose fixatrice d'azote avec les légumineuses (**Fig. 01**). Après colonisation du système racinaire par des rhizobia compatibles avec la plante hôte, il y a formation **de nodules** ou (**nodosités**), à l'intérieur des quelles les Rhizobia endosymbiotiques fixeront l'azote atmosphérique au bénéfice de la plante. Le développement des nodules sur les racines des plantes hôtes et l'infection des cellules végétales par les Rhizobia est appelé **le processus de nodulation**. Les Rhizobia sont importants pour l'agriculture puisqu'ils favorisent la croissance des légumineuses même en absence d'engrais azotés et contribuent ainsi à l'enrichissement des sols.

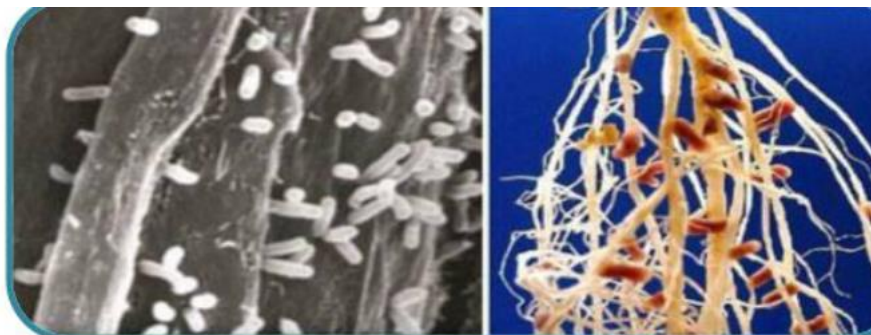


Figure 01 : observation par microscope électronique d'une souche de *Rhizobium sp*.

d) Le genre *Bacillus sp*

-*Bacillus Amyloliquefaciens* : bactérie aérobie stricte et libre dans le sol qui génère une enzyme phythase qui permet de libérer d'avantage de phosphore organique du sol. Elle colonise les racines et ralentit les champignons nuisibles et génère également des auxines (hormone de croissance).

-*Bacillus Megaterium* : une des plus grosses bactéries rencontrées dans les sols. Cette bactérie est capable de produire des endospores (résiste à la sécheresse). Elle est impliquée dans le cycle du

phosphore (minéralisation microbienne du phosphore organique). Elle produit également une pénicilline amidase (antibiotique).

-*Bacillus Radicola* : bactérie aérobie stricte et libre dans le sol qui s'associe au *Rhizobium*. Cette bactérie est productrice de phytohormones ce qui permet de développer le système racinaire du végétal.

-*Bacillus Subtilis* : bactérie aérobie stricte et libre dans le sol. C'est une bactérie rhizosphérique phytoprotectrice des racines (PGPR). Elle crée un biofilm adhésif et protecteur (mucilage microbien).

e) Le genre *Azotobacter sp*

-*Azotobacter* : bactérie aérobie stricte et libre dans le sol qui fixe l'azote atmosphérique chez la plupart des végétaux et le transforme en ammonium. *Azotobacter sp* étant qualifié de PGPR synthétise des substances biologiquement actives telles que les phytohormones (les auxines) stimulant ainsi la croissance des plantes. Ils facilitent également la solubilité de certains minéraux dans le sol et améliorent la biorestauration des sols.

-*Azospirillum* : bactérie aérobie stricte et libre dans le sol qui fixe l'azote atmosphérique chez la plupart des végétaux et le transforme en ammonium. Elle produit des hormones de croissance, l'acide indole-3 acétique (AIA), qui favorise l'augmentation de la surface des racines, entraînant une augmentation de l'absorption de l'eau et des minéraux.

3.1.1.2. Modes d'action des PGPR

- Les modes d'action des PGPR sont regroupés traditionnellement en directs et indirects. Bien que la différence entre les deux ne soit pas toujours évidente.
- Les mécanismes directs sont ceux agissant à l'intérieur des plantes et affectent directement leur nutrition, leur métabolisme et leur développement, tandis que les mécanismes indirects, en général, sont ceux qui se produisent en dehors des plantes et touchent surtout tout ce qui est en relation avec le bio contrôle. Les mécanismes directs comprennent les processus de biofertilisation (nutrition de la plante) et de biostimulation (production des phytohormones de croissance). Les processus de bio contrôle (production des métabolites antifongiques, production de composés volatiles,...) ; constituent des mécanismes indirects, car elle assure un milieu sain pour la croissance de la plante, ce qui assure une bonne croissance de celle-ci.

Certaines souches de PGPR des genres *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Azospirillum*, *Rhizobium* ont récemment été décrites pour leur effet positif sur la croissance des plantes et l'augmentation du rendement de la culture. Les PGPR peuvent favoriser la croissance des plantes hôtes par divers mécanismes :

A. La fixation d'azote (N₂) : Le sol contient de nombreuses espèces de bactéries pouvant transformer l'azote atmosphérique en ammoniac. Plusieurs de ces microorganismes vivent à la surface des racines des plantes ou même dans les tissus de certains végétaux. L'ammoniac est rapidement transformé en nitrates par les bactéries du sol.

B. La résistance aux pathogènes du sol : Certaines souches de PGPR ont la capacité d'excréter des métabolites actifs contre différentes bactéries et champignons. Certaines de ces molécules sont de véritables antibiotiques, ils jouent un rôle important dans l'inactivation des facteurs de germination du pathogène ou la dégradation de leurs facteurs de pathogénicité comme les toxines.

C. La croissance racinaire : Certaines bactéries ont la capacité de produire des substances (régulateurs de la croissance végétale) comme l'AIA, les cytokinines et d'autres, ces régulateurs permettent à la plante de développer un système racinaire (Augmentation du diamètre et de la longueur des racines)

D. L'amélioration de la qualité du sol : Les microorganismes du sol décomposent la matière organique soluble et insoluble et libèrent ensuite des éléments minéraux disponibles pour les plantes.

E. Induction de l'immunité : Certaines PGPR peuvent stimuler le système immunitaire des plantes et leur permettre une résistance contre certains virus, les champignons et même les bactéries

pathogènes. Le phénomène est désigné ISR (Induced Systemic Resistance) ou résistance systémique induite.

F. Augmentation de la biodisponibilité de certains éléments essentiels : Certaines PGPR produisent des sidérophores permettant la chélation du fer pour être ensuite absorbé par la plante ou une enzyme de type phytase permettant la solubilisation des phosphates.

G. Tolérance aux stress : Certaines PGPR produisent des enzymes ACC désaminase (1-aminocyclopropane-1-carboxylate), qui facilitent le développement des plantes en réduisant leur production d'éthylène (Hydrocarbure gazeux incolore). Les PGPR produisant cet enzyme peuvent ainsi soulager la plante de plusieurs stress causés par des infections, l'absorption de métaux lourds, une salinité élevée et même la sécheresse. L'ensemble de ces activités fait des PGPR une alternative biologique et écologique intéressante à considérer par rapport aux différents produits chimiques de synthèse existants.

3.1.2. Les Mycorhizes

C'est une association entre les racines des plantes et des champignons. Les mycorhizes se forment de la manière suivante : le mycélium "explore" le sol à la recherche d'une racine qui lui convient, et une fois qu'il a repéré sa présence grâce aux **hormones végétales sécrétées par la racine**, il développe un **réseau très ramifié de filaments en direction de la racine, et en colonise la surface avant de pénétrer à l'intérieur du cortex racinaire**. La mycorhize est créée et prête à fonctionner : elle est destinée à être le siège d'échanges chimiques entre symbiote (champignon) et hôte (plante).

➤ **Bénéfices pour le champignon**

La plante lui fournit, en quantités importantes, des composés carbonés directement assimilables, essentiels à la vie du champignon, mais qu'il est incapable de synthétiser lui-même (les champignons sont des organismes hétérotrophes, car dépourvus de chlorophylle et n'effectuant pas de photosynthèse) ; La plante apporte également au champignon de petites quantités d'acides aminés et de vitamines.

➤ **Intérêt des mycorhizes pour la plante hôte**

Grâce au mycélium très dense et ramifié qu'il développe autour des racines, le champignon multiplie par 1000 la surface de contact entre le sol et la racine, ce qui décuple du même coup les **capacités d'absorption de l'eau par le système racinaire**. Outre cette interface sol/racine extrêmement importante, les très fins filaments du mycélium peuvent s'insinuer dans les pores les plus petits du sol et en extraire l'eau, chose que les racines, plus épaisses, ne savent pas faire : en cas de sécheresse, ces micropores du sol constituent une réserve d'eau précieuse. Grâce aux mycorhizes, **la plante hôte est donc moins sensible au manque d'eau**.

➤ **Autre avantage décisif pour la plante :**

-le champignon l'aide à **absorber les éléments nutritifs présents dans le sol**, en solubilisant les **minéraux** contenus dans les fragments de roche, mais aussi en fragmentant les matières organiques du sol (humus) et en les rendant ainsi disponibles pour la plante sous forme d'**azote assimilable**.

-Le mycélium offre également une **protection aux racines**, d'une part contre le dessèchement en cas de sol sec, et d'autre part contre les substances toxiques, qu'elles soient d'origine naturelle (métaux lourds et aluminium issus de la dégradation de certaines roches, substances sécrétées par d'autres espèces de plantes concurrentes ou dues à la pollution (dioxines, hydrocarbures, métaux lourds, etc.). Le champignon a ainsi une action détoxifiante sur le sol dans l'environnement direct des racines.

-Le champignon sécrète des **régulateurs de croissance** (l'équivalent des hormones pour les végétaux) qui accroissent le développement du système racinaire : plus dense, plus ramifié, il permet ainsi une meilleure croissance de la plante. Enfin, le réseau des filaments du mycélium **stabilise la structure du sol** autour des racines, ce qui implique notamment une meilleure rétention de l'eau et des éléments nutritifs par le substrat de culture.

3.2. Implication des organismes du sol dans la protection des cultures (lutte biologique).

3.2.1. Définition de lutte biologique

Est une méthode de lutte contre les nuisibles tels que:

- les ravageurs des cultures (insectes, acariens, nématodes, etc.),
- les maladies (fongiques, bactériennes, virales, etc.),
- les mauvaises herbes (plantes adventices) au moyen d'organismes vivants antagonistes, appelés agents de lutte biologique (qui appartiennent au groupe des auxiliaires des cultures).

Elle se base sur l'utilisation de prédateurs (nématodes, arthropodes, vertébrés, mollusques), parasitoïdes, agents pathogènes (virus, bactéries, champignons, etc.), herbivores (ou phytophages), sans faire appel à des pesticides.

L'intérêt pour la lutte biologique a augmenté avec la connaissance des effets néfastes des pesticides chimiques sur les écosystèmes et la santé humaine. Les lois environnementales visent à réduire l'utilisation des pesticides dans l'agriculture conventionnelle. Une augmentation de la demande pour les produits biologiques rend également la lutte biologique de plus en plus populaire. La lutte biologique est l'un des composants de la lutte intégrée contre les ravageurs, maladies et mauvaises herbes, qui associe tous les moyens de lutte disponibles, chimique, biologique, mécanique, thermique, etc. et qui vise non pas à éliminer les ravageurs, mais à maintenir leur population en dessous d'un seuil économiquement supportable.

3.2.2. Les acteurs de la lutte biologique

➤ La cible:

- insectes ravageurs
- insectes vecteurs
- adventices
- pathogènes des plantes
- Vertébrés

➤ Les agents ou auxiliaires :

Différents modes d'action :

- prédateurs
- pathogènes
- parasitoïdes
- compétiteurs

Différents types d'organismes :

- micro-organismes
- Invertébrés
- vertébrés

3.2.3. Les différentes stratégies

On distingue trois stratégies de lutte biologique :

- la lutte classique** (acclimatation d'agents auxiliaires introduits): lâcher intentionnel d'organismes vivants comme agent de lutte biologique, afin qu'ils se multiplient et contrôlent la cible pour une longue période.
- la lutte augmentative** (traitements répétitifs par des agents auxiliaires):La lutte biologique par inondation vise à **augmenter artificiellement les populations de parasites par des apports extérieurs**. L'organisme antagoniste doit être lâché ou inoculé (en grand nombre) à chaque fois que l'effectif du ravageur croît dangereusement, on est dans le cas de la lutte biologique inondative.

c) **Conservation** (promotion des agents auxiliaires existants): La lutte biologique par conservation des auxiliaires vise à **faciliter leur multiplication spontanée par un aménagement judicieux de leur environnement.**

-**Différents types d'actions :**

- diminuer leur mortalité
- favoriser la reproduction
- rendre le site attractif
- améliorer leur efficacité

3.2.4. Utilisation des micro-organismes

Comprennent les bactéries, les champignons et les virus. Ils tuent ou affaiblissent leur hôte et sont relativement spécifiques à l'hôte. Diverses maladies microbiennes des insectes sont naturelles, mais peuvent également être utilisées en tant que pesticides biologiques.

a) Les bactéries

Production de toxines provoquant la mort de la cible. **Exemple** : La bactérie *Bacillus thuringiensis* produit des cristaux protéiniques qui diffusent des toxines dégradant le tube digestif des chenilles, entraînant un arrêt de l'alimentation et ainsi leur mort. La bactérie peut alors s'alimenter.

Les bactéries utilisées pour la lutte biologique infectent les insectes par leur tube digestif, ce qui rend difficile leur utilisation pour le contrôle des insectes "suceurs" comme les pucerons et les cochenilles. *Bacillus thuringiensis* est l'espèce bactérienne la plus largement utilisée pour la lutte biologique, avec au moins quatre sous-espèces utilisées pour contrôler les insectes nuisibles tels que les lépidoptères, les coléoptères, et les diptères. La bactérie est disponible en sachets de spores séchées qui sont mélangées avec de l'eau et pulvérisées sur les plantes vulnérables, tels que les Brassica et les arbres fruitiers. *Bacillus thuringiensis* est également intégrée dans certaines cultures génétiquement modifiées, dans le but de les rendre résistantes aux ravageurs ciblés.

b) Les champignons

Les champignons utilisés pour lutter contre les insectes sont connus comme les champignons entomopathogènes.

c) Les virus

Les virus d'insectes sont des organismes pathogènes obligatoires qui se reproduisent uniquement dans un insecte hôte. Ils peuvent fournir un moyen de lutte efficace et durable d'une espèce d'insectes nuisibles. Certains virus sont disponibles dans le commerce, mais beaucoup d'autres sont naturellement présent dans les systèmes agricoles et forestiers, Les baculovirus sont spécifiques à certaines espèces d'insectes hôtes et se sont révélés être utiles dans la lutte biologique. Par exemple : le virus spécifique à la spongieuse (*Lymantria dispar*) (en anglais : ***Lymantria dispar* multicapsid nuclear polyhedrosis, LdMNPV**) peut agir comme régulateur naturel des populations de ce ravageur des forêts de feuillus et a été utilisé pour traiter de grandes zones forestières en Amérique du Nord sévèrement attaquées. Les larves sont tuées par le virus ingéré, et laissent des particules virales sur le feuillage qui infectera d'autres larves.