

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie Département
Sciences de la Nature et de la Vie



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en : biologie
Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie
Filière : Science Biologiques
Spécialité : Microbiologie Appliquée
Thème :

Le Rôle des Micro-organismes dans la conservation des sols

Présenté Par :

- 1) KAMBOUZ Faiza
- 2) ZENASNI Amina

Devant le jury composé de :

Dr KHOLKHAL Fatima zohra	MCA UAT.B.B (Ain Témouchent)	Président
Dr CHERIF Nadjib	MCB UAT.B.B (Ain Témouchent)	Examineur
Dr. BOUGHALEM Mostafia	MCA UAT.B.B (Ain Témouchent)	Encadrant

Remerciements

*Je tiens à remercier dans un premier temps **ALLAH** et toutes les personnes qui nous ont aidées lors de la rédaction de ce mémoire.*

*Je voudrais remercier, ma directrice de mémoire Madame **Mostafia BOUGHALEM**, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils. Nous lui devons l'expression de notre profonde gratitude.*

*Nous adressons toutes nos reconnaissances à Mme **Fatima KHOLKHAL** et Mr **Najib CHERIF**, qui nous ont fait l'honneur de présider notre jury. Nous leur exprimons notre haute considération.*

*Sans oublier tout le personnel du département des sciences biologiques, de la faculté des sciences de la nature et de la vie, **Université Belhadj***

Bouchaib - Aïn Temouchent-

Merci à tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre ont contribué à la réalisation de ce travail, et qu'on ne peut citer individuellement.

Dédicace :

A mon père : Hamid

Les mots me manquent pour exprimer ce que je ressens, combien sont grands les sacrifices par toi consentis ! Mon vœu le plus cher est que tu trouves dans ce travail. L'accomplissement de tous tes rêves, de tes sacrifices et de tes prières. Que Dieu te bénisse.

A ma mère : Nadia

Ce travail te fait honneur est le fruit d'énormes sacrifices consentis. Tu nous a toujours soutenus même dans le moment de découragements ou nous étions sûrs de ne rien valoir. Trouve ici l'expression de ma profonde gratitude et mon amour.

Que le Dieu tout puissant te donne longue vie.

A mes chères sœurs Zineb et Meriem vous dépensez pour moi sans compter. En reconnaissance de tous les sacrifices consentis par tous et chacun pour me permettre d'atteindre cette étape de ma vie.

Avec tout ma tendresse.

A toute ma famille, mes amis et mes connaissances.

Vous de près ou de loin contribuez à ma formation.

AMINA

Dédicace :

*Ce travail est dédié à mon père **Kambouz Youb**, décédé trop tôt, qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études.*

Tout l'encre du monde ne pourrait suffire pour exprimer mes sentiments envers un être très cher. Tu es toujours été mon école de patience, de confiance et surtout d'espoir et d'amour. Tu restes pour moi ma référence, la lumière qui illumine mon chemin.

A ma mère : Zoulikha

La personne la plus chère à moi, celle qui s'est donné tant de mal pour bien nous éduquer, qui s'est battue pour voir ses enfants réussir vous m'avez aidé et soutenu pendant de nombreuses années avec à chaque fois une attention renouvelée. Puisse Dieu, tout puissant vous combler de santé, de bonheur et vous procurer une longue vie.

Merci maman je te dois tout.

A mon frère : Nasreddine

A tous les moments d'enfance passés avec toi mon frère, en gage de ma profonde estime pour l'aide que tu m'as apporté. Tu m'as soutenu, réconforté et encouragé. Puisse nos liens fraternels se consolider et se pérenniser encore plus.

A mon fiancé : Mohamed

Pour l'amour et l'affection qui nous unissent. Je ne saurais exprimer ma profonde reconnaissance pour le soutien continu dont tu as toujours fait preuve. Tu m'as toujours encouragé, incité à faire de mon mieux, ton soutien m'a permis de réaliser le rêve tant attendu.

A mes amies : Amina et Sabrina

Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des sœurs et des amies sur qui je peux compter. En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

A toute ma famille de près et de loin, tous mes amis, mes connaissances contribué à ma formation.

Faiza

Abstract:

The soil is home to a great diversity of microbial communities which interact with each other and which, in the rhizosphere, also interact with the roots of plants. This cooperative way of life plays an important role in soil conservation.

Microorganisms are essential in key soil functions. They are necessary for the mineralization of organic matter and contribute to a better structure of the soil; they help break down organic pollutants and improve soil fertility.

In addition, to understand the evolution of the sanitary condition of a soil. Knowledge of its components appears to be decisive. This task requires a good understanding of the soil micro flora, which serves as links between animals and plants, playing a key role in sustaining life on earth.

Keywords : microorganismes, soil, conservation, interaction, environnement.

Résumé :

Le sol héberge une grande diversité de communautés microbiennes qui interagissent entre elles et qui, dans la rhizosphère, interagissent aussi avec les racines des plantes. Ce mode de vie coopératif joue un rôle important dans la conservation du sol. Les microorganismes sont essentiels dans les fonctions clés du sol. Ils sont nécessaires pour la minéralisation de la matière organique et contribuent à une meilleure structure du sol ; Ils participent à la dégradation de polluants organiques et à l'amélioration de la fertilité des sols.

Par ailleurs, pour comprendre l'évolution de l'état sanitaire d'un sol. La connaissance de ses composantes apparaît comme déterminante. Cette tâche nécessite une bonne compréhension de la microflore tellurique qui sert de liens entre les animaux et les plantes, en jouant un rôle clé dans le maintien de la vie sur la terre.

Mot clés : microorganismes, sol, conservation, interaction, environnement.

ملخص:

التربة هي الموطن لتنوع كبير من المجتمعات الميكروبية التي تتفاعل مع بعضها البعض، تتفاعل أيضاً مع جذور النباتات. تلعب طريقة الحياة التعاونية هذه دوراً مهماً في الحفاظ على التربة. الكائنات الحية الدقيقة ضرورية في وظائف التربة الرئيسية. إنها ضرورية لتمعدن المواد العضوية وتسهم في بنية أفضل للتربة؛ أنها تساعد في تكسير الملوثات العضوية وتحسين خصوبة التربة. بالإضافة إلى ذلك، لفهم تطور الحالة الصحية للتربة. يبدو أن معرفة مكوناته أمر حاسم. تتطلب هذه المهمة فهماً جيداً للنباتات الدقيقة في التربة والتي تعمل كحلقات وصل بين الحيوانات والنباتات، وتلعب دوراً رئيسياً في الحفاظ على الحياة على الأرض.

الكلمات المفتاحية: الكائنات الحية الدقيقة، التربة، الحفظ، التفاعل، البيئة.

Liste d'abréviation

M.O.S : Matière organique du sol.

M.O.P.I : Matière organique particulière incluse.

M.O.A : Matière organique apportée.

C.O.S : Carbone organique du sol.

M.O.P : Matière organique particulière.

Liste des photos

Photo 01 : Morphologie des acariens.....	10
Photo 02 : Morphologie des collemboles.....	11

Liste des tableaux

Tableau 01 : Fréquence des divers genres d'actinomycètes dans le sol.....	06
Tableau 02 : Mécanisme microbiens intervenant sur la mobilité d'élément minéral dans les sols.....	07
Tableau 03 : Exemple de biotransformation des produits par les divers microorganismes présent dans les sols.....	33
Tableau 04 : La famille des nitrobactériaceae.....	34

Liste des figures

Figure 01 : Structure d'une macro agrégat selon le modèle hiérarchique.....	17
Figure 02 : Cycle du carbone du sol.....	30
Figure 03 : Cycle d'azote	37
Figure 04 : Cycle de phosphore.....	42

■ Sommaire :

<u>Introduction</u> :	- 1 -
<u>1. Le sol</u> :	- 2 -
<u>1.1. Définition</u> :	- 2 -
<u>1.2. Caractéristiques générales des phases des sols</u> :	- 3 -
<u>1.2.1. La phase solide du sol</u> :	- 3 -
<u>Endoparasites migrants</u> :	- 13 -
<u>1. Endoparasites sédentaires</u> :	- 13 -
<u>2. Ectoparasites</u> :	Erreur ! Signet non défini.
<u>1.2.2. La phase liquide</u> :	- 15 -
<u>1.2.3. La phase gazeuse</u> :	- 16 -
<u>2. La matière organique</u> :	- 16 -
<u>2.1. Rôle de la matière organique du sol sur la formation et la stabilisation des agrégats</u> :	- 16 -
<u>2.2. Mécanismes de désagrégation du sol et tests de stabilité structurale</u> :	- 18 -
<u>2.3. Modèles de mise en place de l'agrégat et de la stabilité structurale en interaction avec les matières organiques apportées au cours de leur décomposition</u> :	- 18 -
<u>2.4. Modalités de la décomposition des matières organiques apportées</u> :	- 20 -
<u>3. Rôle de la qualité du sol dans le fonctionnement des écosystèmes</u> :	- 21 -
<u>4. fertilité du sol et production alimentaire</u> :	- 24 -
<u>5. Les influences des microorganismes sur le cycle du carbone, de l'azote et du phosphore dans le sol</u> :	- 24 -
<u>5.1 Dynamique du carbone organique des sols et processus de stabilisation</u> :	- 25 -
<u>5.2 Cycle biogéochimique du carbone organique</u> :	- 25 -
<u>5.3 Les différents réservoirs du carbone organique du sol et les processus de stabilisation du carbone organique</u> :	- 25 -
<u>5.3.1. Matière vivante : organismes du sol</u> :	- 26 -
<u>5.3.2. Matières organiques mortes</u> :	- 27 -
<u>5.3.3. Evolution du modèle conceptuel de la dynamique du carbone organique</u> :	- 29 -
<u>5.4. Description de cycle de carbone</u> :	- 29 -
<u>6) Cycle de l'azote</u> :	- 31 -
<u>6.1 APPORTS</u> :	- 31 -
<u>6.1.1 Fertilisants inorganiques et organiques</u> :	- 31 -
<u>6.1.2 Fixation biologique</u> :	- 32 -
<u>6.2 Transformations internes</u> :	- 32 -
<u>6.2.1 Minéralisation et immobilisation</u> :	- 32 -

Introduction :

Le sol est un milieu fragile et très complexe, trop longtemps considéré comme un simple support de l'agriculture. C'est un milieu vivant, interface entre la biomasse, l'atmosphère et l'hydrosphère. Le sol joue un rôle prépondérant dans le déterminisme de la qualité des eaux, de l'air et de la chaîne alimentaire. C'est aussi un milieu de transit, de stockage et de transport de nombreuses substances, quelle que soit leur nature, organique ou inorganique, résultant de processus naturels ou d'activités domestiques (Calvet R., 2000). La microflore du sol est formée de Bactéries protozoaire et aussi des individus végétaux (pédoflore) et les animaux (pédofaune). Les microorganismes ont une importance considérable dans les cycles biogéochimiques comme par exemple dans ceux du carbone ou du phosphore avec un rôle fondamental dans la fixation de l'azote atmosphérique, fonction qui a beaucoup été étudiée depuis plusieurs dizaines d'années (Vitousek, 1991). Ils jouent un rôle important dans ces cycles en conditionnant l'efficacité et les mécanismes de l'utilisation de la matière organique du sol (Bowles et al, 2014, Huang et al, 2014). Ils participent à la structuration du sol, notamment par la production de molécules organiques qui contribuent à la cohésion du sol. Ainsi, ils permettent une meilleure aération et un passage de l'eau.

C'est dans ce sens que nous avons conduit cette étude, qui s'intéresse aux interactions qui s'établissent entre les espèces fongiques et bactériennes pour contribuer à la stabilisation des agrégats du sol.

A la suite d'une pollution du sol, il faudra en prévoir la réhabilitation (Remise en état), qui définit comme l'ensemble des opérations effectuées en vue de rendre un site apte à un usage donné. Cette opération englobe à la fois les opérations de traitement de dépollution, celles de confinement et de traitement des déchets sur un site pollué en vue de permettre un nouvel usage.

1. Le sol

1.1. Définition :

Les sols constituent l'élément essentiel des biotopes continentaux. Leur ensemble, dénommé pédosphère, résulte de l'interaction de deux compartiments biosphériques, l'atmosphère et les deux couches superficielles de la lithosphère. C'est l'altération des roches mères, due à des forces chimiques et biologiques, qui donne naissance au régolite (manteau superficiel de débris), lui-même transformé en ce que l'on appelle sol. Les cinq principaux facteurs impliqués dans la formation du sol sont la roche mère, le climat, la topographie, l'activité biologique et le temps. Le sol a de nombreuses fonctions, il est un milieu biologique dans et sur lequel se développent des organismes vivants. Ce développement dépend de la qualité de ce sol ou fertilité (quantité de carbone, d'azote, capacité d'échange ionique, etc.). Il est aussi un acteur déterminant du cycle de l'eau (stockage et régulation) et de la qualité de cette eau (source de pollution, capacité de rétention des polluants mais aussi biodégradation de ceux-ci). Mais le sol joue aussi un rôle prédominant dans tous les cycles biogéochimiques (Atlas R. M. & Bartha R., 1992). Est un milieu poreux constitué d'un ensemble de 5 fractions différentes : les minéraux solides, la matière organique, la fraction vivante, la phase gazeuse, et la phase liquide. Des transferts de matière et d'énergie ont lieu en permanence, non seulement entre ces divers compartiments, mais aussi entre chacun d'eux et le milieu extérieur : échanges gazeux, échanges de température, chutes de pluie, évaporation, drainage, apports de résidus animaux et végétaux... Ainsi, Le sol est, par son fonctionnement et son organisation, un véritable système écologique dynamique). Il est le milieu commun à l'ensemble des écosystèmes terrestres (forestiers, prairiaux, agricoles...) et participe activement à leur fonctionnement. (Di Castri, 1970 ; Lavelle, 1987).

Le sol aussi définit comme le support des activités humaines. Parmi ces activités, certaines sont polluantes et entraînent des dommages, notamment aux fonctions écologiques du sol

1.2. Caractéristiques générales des phases des sols :

1.2.1. La phase solide du sol :

Elle est constituée par des minéraux et des matières organiques en proportions variable. On pourrait considérer que les organismes vivants du sol font partie de la phase solide, puisqu'ils ne sont ni gazeux ni liquide. Nous ne le ferons pas en raison de leur importance dans le fonctionnement du sol de sorte que nous associerons la phase solide à des constituants non vivant, c'est-à-dire à l'ensemble constitué par les minéraux et les matières organiques mortes.

La nature des minéraux du sol est déterminée à la fois par les roches sur lesquelles ils se sont formés et par les processus de pédogénèse. (La France agricole, 1^{er} édition 21 aout 2003).

- La fraction minérale :

Les constituants minéraux du sol sont primaire, hérités directement de la roche mère, ou secondaire issu de la transformation chimique des précédent et réunis alors dans le complexe d'altération. Celui-ci comporte des sels (ex : carbonates de calcium, ou de magnésium) ou des silicates (ex : micas et argiles), (Gobat, 2003).

- La fraction organique :

Concernant l'humus (Constituant organique), Il contient les produits de décomposition partielle des végétaux, ainsi certaines matières végétales comme la lignine ou les acides humiques (Jerome et al, 2004).

- **Microflore du sol :**

La microflore du sol est formée de bactéries (*Archaeobactéries et Eubactéries*), de champignons (levures et moisissures), d'algues et de protozoaires (Bousseboua H., 2005).

- **Les bactéries :**

Les bactéries sont des protistes inférieurs ou procaryotes, et une structure cellulaire élémentaire sans mitochondries ni appareil de Golgi. Les bactéries aérobies du sol participent essentiellement dans les réactions d'oxydation de la matière organique alors que celles anaérobies assurent les réactions de réduction au cours de fermentations. Les hétérotrophes peuvent être saprophytes, elles minéralisent la matière organique morte (nécro masse), d'autres sont appelées « humifiantes ». En fonction des propriétés du sol, tous les types physiologiques bactériens sont représentés : autotrophes et hétérotrophes, mésophiles, thermophiles et psychrophiles, aérobies et anaérobies. Les bactéries du sol sont à dominante GRAM positif, avec comme groupes principaux : les *Corynébactéries*, les Actinomycètes, les *Mycobactéries* et les *Nocardiformes*. Les genres les plus communément isolés sont *Arthrobacter*, *Pseudomonas*, *Achromobacter* et *Bacillus*, dans les couches aérobies alors que les bactéries du genre *Clostridium* sont dominantes dans les conditions anaérobies. Les variations du potentiel nutritionnel du sol favorisent l'apparition de bactéries autotrophes qui sont capables de tirer leur énergie et leurs matériaux de construction essentiellement à partir de substances minérales. Dans le sol, un nombre considérable de ces dernières jouent un rôle important, en particulier dans les cycles biogéochimiques. Parmi celles intervenant dans le cycle de l'azote, on peut citer les bactéries nitrifiantes (*Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*), nitriques (*Nitrobacter*) et réorganisatrices qui utilisent les nitrates pour synthétiser des molécules organiques azotées. Certaines bactéries dénitrificatrices respirent les nitrates en anaérobiose en libérant le N₂. (Vitousek, 1991)

○ **Les champignons :**

Tous les sols contiennent une microflore abondante. La biomasse fongique est sans doute très variable suivant les cas mais on peut l'évaluer entre 120Kg/ha et plus d'une tonne dans les sols normaux. Leurs activités métaboliques sont multiples et fondamentales à l'équilibre écologique des sols. De nombreux travaux indiquent la prédominance de : *Mucor*, *Trichoderma*, et *Aspergillus*, alors que *Rhizopus*, *Fusarium*, *Zygorhynchus*, *Cephalosporium*, *Cladosporium* et *Verticillium* sont couramment isolés (Noumer, 2008).

○ **Les levures :**

Les levures sont peu nombreuses dans le sol et l'on doit recourir pour les mettre en évidence, il faut donc admettre que le sol renferme une population propre composée de levure variable aussi suivant la végétation qu'il porte. Cependant les lois de leur répartition ou de leurs éventuelles fluctuations saisonnières sont encore imparfaitement connues. Les levures sont

nombreuses dans les sols riches en matière organique fraîche ou peu décomposée et peut-être plus encore dans les litières forestière. (Dommergues et Mangeot, 1970).

- **Les algues :**

Les algues du fait de leur caractère phototrophe possèdent pour la microbiologie du sol une signification très différente de celle des bactéries ou des champignons Les algues peuvent se contenter de faible intensités lumineuses , ce qui leur permet d'avoir un comportement autotrophe actif à plusieurs millimètre au-dessous de la surface , particulièrement dans les sols riche en particules de quartz translucides (La lumière peut diffuser jusqu'à plus de 2 cm dans certains sols) (Dommergues et Mangeote,1970).

- **Les protozoaires :**

Plusieurs espèce du sol se montrent très ubiquistes et se retrouvent dans des conditions climatiques très différentes. Ils ont une préférence pour les sols acides, cependant, il existe des espèces exclusivement calcicoles (Davet, 2003).

- **Les actinomycètes :**

Les *actinomycètes* constituent l'ordre des *actinimycétales*. Ce sont des bactéries filamenteuses, septés, ramifiées, prenant généralement de Gram positive, le mot actinomycètes provient de deux substantifs grecs (actino) et (mycète) et signifie champignons a rayon ou champignons rayonnants expression utilisée pour désigner en anglais(Ray fungi).Elles croissent en l'espace de quelques jours a quelques semaines. Elles sont abondamment distribuées dans la nature. Les actinomycètes sont importants en raison surtout de leur rôle dans la fertilisation des sols, synthèse des composés complexes comme les antibiotiques les vitamines, etc. *Les actinomycètes* n'ont pas de membrane nucléaire, elles possèdent des organites flagellaires rassemblant à ceux des bactéries. Elles sont pour la plupart, sensibles au lysozyme et aux agents antibactériens ; le diamètre de leurs hyphes est plus petit que celui les champignons.

Certains actinomycètes sont capables de se développer a des températures élevées et de produire des enzymes actives dans des conditions acides, d'autres sont des symbiotes de plantes (Ensign et al, 1993).

○ **Classification des actinomycètes :**

Les actinomycètes appartiennent au règne des procaryotes (organismes cellulaires sans noyau), la division des *Firmicutes* (Bactéries Gram positif) et à la classe des *thallobacteria* (ramifiées) contenant l'ordre des *Actinomycetales* ; cette classification a été décrite par Bergey's (1989), dans Manuel Systematic Bacteriology (1986,1989).

Durant les 30 dernière années, cette classification a évolué en fonction du développement des connaissances, cela a été marqué des nouveaux critères de classification, ou sont regroupés en quatre périodes (Goodfellow et Williams, 1983).

○ **Classification dans la nature :**

Les actinomycètes sont adaptés à divers milieux écologiques (sols, les eaux douces, ou salines et dans l'air). Toutefois, ils sont abondants dans les sols alcalins et les sols riches en matière organique ou ils constituent une part importante de la population microbienne (Loqman, 2009). (Tab 1).

Tableau1 : Fréquence des divers genres d'Actinomycètes dans le sol

Genre	Pourcentage
Streptomuces	95,34
Nocardia	1.98
Micromonospora	1.4
Thermomonospora	0.22
Microellobosporia	0.04

○ **Importance des actinomycètes :**

Dans le domaine agronomique

Les actinomycètes sont considérés comme des biofertilisateurs des sols, ils possèdent d'autres potentiels intéressants tels que leur implication dans le processus de recyclage. En effet, ces microorganismes sont aussi utilisés en bio remédiation(le recyclage des nutriments). Ils sont aussi capables de dégrader des hydrocarbures chlorés ainsi que des composés organiques complexes. D'autres genres d'actinomycètes forment des interactions symbiotiques avec les racines de certaines plantes ou sous forme de nodule pour fixer l'azote et le transformer en éléments assimilable par les plantes(Frankia) (Fickers et al, 2008).

○ **Influence des microorganismes :**

Nous recensons dans ce paragraphe les principaux processus non spécifiques et spécifiques de solubilisation et d'in solubilisation microbienne des éléments en traces. La solubilisation peut se faire par dissolution d'une phase porteuse d'un élément,, tandis que l'in solubilisation peut résulter de la formation de sulfures métalliques insolubles par l'action de bactéries sulfato-réductrices.

La prise en compte des phénomènes biologiques dépasse le cadre de notre étude, aussi nous présentons seulement un inventaire de ces phénomènes. (tab2)

Tableau 2 : Mécanismes microbiens intervenant sur la mobilité d'éléments minéraux dans les sols (Bonneau et Souchier, 1994, Académie des sciences, 1998).

Solubilisation
1-Productio d'acides et de composés complexant : dissolution de silicates, phosphates, carbonates, oxydes, sulfures.
2-Réduction du fer et du manganèse : dissolution d'oxyhydroxydes et d'éléments associés.
3-Oxydation du fer et du soufre : dissolution des sulfures et d'éléments associés.
4-Modification des conditions de milieu (ph, eh)
In solubilisation
1-Réduction des sulfates : formation de sulfures métalliques insolubles.
2-Oxydation du fer et du manganèse : Co précipitation avec des oxyhydroxydes.
3-Biodégradation de complexes organométalliques solubles : précipitation du métal.
4-Bioaccumulation et bio sorption par des cellules vivantes ou des constituants cellulaire : formation de complexes organo-minéraux insolubles.
In solubilisation
1-Méthylation : cas de l'arsenic, du mercure, du sélénium, de l'antimoine.
2-Réduction : cas du mercure.

Organismes vivants du sol :

Des milliards d'individus végétaux et animaux vivent dans le sol. Ils sont dénommés pédoflore pour les végétaux et pédofaune pour les animaux. En guise d'exemple, dans 1 g de sol on dénombre jusqu'à 1 milliard de bactéries et 1 à 3 m d'hyphes de champignons (Ranjard, 2013). On considère qu'un quart de la biodiversité mondiale réside dans les sols mais elle est encore insuffisamment connue. A l'œil nu, on voit des vers de terre, des mille-pattes, des scarabées et des fourmis. Avec un microscope on peut observer des collemboles, des nématodes, des champignons et des bactéries.

La microfaune :

Elle regroupe principalement des microorganismes ayant besoin d'eau liquide pour vivre. On trouve des protozoaires grands consommateurs de bactéries, ils induisent le maintien de la jeunesse des populations de bactéries, celle-ci devant se reproduire pour pallier à cette prédation. On peut aussi observer des Métazoaire, essentiellement des Nématodes (vers ne présentant pas de segmentation), qui interviennent dans la première phase de décompositions des végétaux en les brisants, ce qui facilite ensuite l'action des bactéries et des champignons. Ils participent aussi au brassage des horizons, activant la remontée des éléments minéraux vers la surface (Gobat et al, 1998, Martins et al, 2015).

La macrofaune :

On la repère sans difficulté à l'œil nu d'autant plus que de par sa taille qui varie (4 à 80mm) elle occupe surtout les couches superficielles , regroupe les vers de terre ,certains mollusques ,arachides ,crustacés et myriapodes , les vers de terre ou lombric ont un rôle primordial dans le brassage des différents horizons ,ils ingèrent de la terre qu'ils rejettent ailleurs apportant des éléments organiques vers le bas .Leur activité permet aussi d'améliorer l'aération de la perméabilité des sols

Enfin leur biomasse importante constitue une réserve d'azote pour le sol (Nadama ,2006 ; Machado et al. 2009).

La mégafaune :

Cette classe regroupe les vertèbres qui ont une taille dépassant 80mm de longueur. Ils agissent sur le sol par creusement de leurs galeries, reptiles, mammifères fouisseurs tels que les campagnols, les chiens de prairie, les marmottes, aussi les amphibiens semblables à des vers de terre, et des reptiles apodes et fouisseurs (Gobat et al, 1998, Peres, 2003)

La méso faune :

C'est une classification morpho-métrique qui distingue les individus appartenant à la faune du sol selon leur taille et leur relation vis-à-vis de l'eau. Cependant, Il existe d'autres classifications des invertébrés selon leur durée de vie dans un sol et une autre selon leurs préférences alimentaires.

La plus utilisée et fiable est la taxonomie qui identifie avec un maximum d'exactitude morphologique. Ainsi la méso faune fait partie de la faune du sol, celle-ci joue un rôle intermédiaire entre la macrofaune et la microfaune, le plus souvent composés de trois espèces qui jouent un rôle important dans le bio fonctionnement des agro systèmes, composées des nématodes, acariens et collemboles (Pelosi, 2008).

Les nématodes (Némathelminthes) :

Ils vivent dans des eaux pelliculaire et interstitielle en zone d'enracinement et matière en décomposition, leur taille varie de 0.2 à 4 mm. Avec une abondance de 100 à 1000 ind /g de terre, ce sont des phytophages et carnivores .Ils peuvent être des ravageurs ou des auxiliaires (pelosi, 2008).

Les Arachnides :

Ce groupe d'invertébrés appartient à l'embranchement des arthropodes et au sous-embranchement des Chélicérates. La classe des arachnides comporte 11 ordres dont 5 seulement sont présents en zone tempérée : Acariens, Aranéides, Opilions, Pseudo-Scorpions et Scorpions. Les acariens ont un rôle important sur le fonctionnement du sol. Les Aranéides et les Opilions évoluent en surface du sol, ce sont des prédateurs généralistes, efficaces contre les ravageurs des cultures (Pérès et al. 2010).

Les Acariens :

Les acariens sont les Arachnides les plus représentés dans le sol. Le groupe est extrêmement diversifié, aussi bien en ce qui concerne la morphologie que la biologie ou les régimes alimentaires de ses représentants. Ils occupent principalement les premiers centimètres des sols, mais des espèces ont été déjà signalées dans horizons profonds bien structurés (Linder et Hohn, 2011).



Photo1 : Morphologie des acariens

Les acariens présentent des adaptations morphologiques à l'absence de lumière et à la faible porosité, ces acclimatations sont représentés par une dépigmentation, ils portent moins de soies, leurs appendices sont plus courts, leur taille est réduite. On rencontre deux ordres principaux dans le sol. Les *Oribates*, essentiellement saprophages, participent très activement à la dernière étape de fragmentation de la matière organique. Les *Gamasides* sont surtout des carnivores, prédateurs d'autres microarthropodes et de petits vers. Cependant, l'intérêt agronomique de ces invertébrés est la micro fragmentation et le brassage des matières organiques, la dispersion et la régulation de la microflore, en plus de la régulation des populations de la microfaune et la méso faune (Bachelier, 1979 ; Pérès et al. 2010).

Les collemboles

Les collemboles sont répartis dans tout le sol et présentent des adaptations morphologiques à la profondeur. Ils possèdent plusieurs organes spécifiques dont le plus visible est la furca, une sorte de levier post-abdominal permettant le saut. La furca est très réduite, voire absente, chez les espèces les plus caractéristiques des sols profonds.



Collembole

Photo2 : La morphologie des collemboles (Jansens et Dethier, 2005).

La plupart des espèces se nourrissent de microorganismes, stimulant ainsi la croissance des champignons dans le sol et régulant la microflore. Ils contribuent également à la fragmentation de la matière organique. Ils se nourrissent de microorganismes en stimulant ainsi la croissance des champignons avec une régulation de toute la microflore du sol. Leur abondance peut atteindre 200 000 ind/m² en milieu humide (Jansens et Dethier, 2005). Cependant, ils interviennent dans la fragmentation et le brassage des matières organiques mais peuvent devenir nuisibles.

Impact de la méso faune sur les agro systèmes :

Rôle biologique des nématodes :

Les nématodes représentent l'un des taxons les plus abondants parmi les invertébrés du sol (plusieurs dizaines de millions d'individus par mètre carré). Ce sont des bio-indicateurs de choix pour le suivi de la qualité biologique des sols (Pelosi, 2008).

Ils ont un impact significatif sur les processus du sol, notamment par l'influence qu'ils ont sur la biomasse et sur les populations microbiennes. Les nématodes jouent également un rôle biologique essentiel dans la minéralisation. Ils produisent du mucus, substrat organique très énergétique qu'ils mélangent dans leurs tubes digestifs avec du sol ingéré et de l'eau. Le sol

ingéré contient des particules minérales et organiques, mais aussi de la microflore. Les conditions sont alors idéales pour les bactéries (chaleur, humidité et matière organique fragmentée) qui récupèrent leurs capacités enzymatiques et digèrent la matière organique. La production de mucus demande un gros investissement énergétique, qui leur permet de récupérer les produits de la digestion effectuée par les bactéries réactivées. Le système de digestion extrêmement performant de ces animaux leur permet, en fin de compte, de déployer l'énergie nécessaire au creusement de leurs galeries ou à la construction de leurs édifices. Les micros prédateurs qui consomment la microflore ont un rôle de régulation des populations, mais aussi de stimulation. En effet, sous l'influence de cette prédation, la multiplication des bactéries et autres éléments de la microflore augmente (Nadama, 2006).

Apparence, structure et cycle biologique :

Les nématodes phyto parasites sont le plus souvent des vers ronds en forme d'aiguille de taille variant de 0,25 à plus de 1 mm, certains atteignant 4 mm. Bien que généralement de forme effilée de la tête et à la queue, ils existent avec une très grande variabilité de formes et de tailles. Chez quelques espèces, les femelles perdent leur forme effilée au fur et à mesure de leur croissance, jusqu'à devenir des femelles adultes élargies, en forme de poire, de citron, de rein ou sphériques. Comme les autres animaux, les nématodes possèdent des systèmes circulatoire, respiratoire et digestif. Les nématodes phyto parasites diffèrent des autres nématodes qui s'alimentent sur des bactéries et des champignons par la présence d'une structure spécialisée : le stylet. Ce stylet est utilisé à la fois pour injecter des enzymes dans les cellules et les tissus végétaux des plantes et pour en extraire le contenu, d'une manière très semblable aux aphidés (pucerons) sur les plantes (Auclerc, 2012).

Leurs cycle de développement est typiquement divisé en 6 : le stade œuf, 4 stades juvéniles et le stade adulte. La durée de chacun de ces stades et du cycle biologique complet diffère selon les espèces et dépend de facteurs comme la température, la teneur en eau et la plante hôte. En conditions favorables sous les tropiques, de nombreuses espèces ont des cycles de développement très courts avec plusieurs générations par saison. Cela peut conduire à des développements très rapides de populations à partir de seulement une (auto-fertilisation) ou deux individus, par ailleurs, les nématodes peuvent survivre à des conditions défavorables comme la saison sèche ou les hivers froids. Certaines espèces survivent mieux à différents stades, par exemple les espèces du genre *Heterodera* survivent mieux sous formes d'œufs à l'intérieur de kystes, le genre *Ditylenchus* au quatrième stade juvénile et le genre *Anguina* au second stade juvénile (Coyne et al. 2010).

- Les types des nématodes :

Les nématodes phytoparasites peuvent être séparés en deux groupes, les nématodes des parties aériennes, ceux qui s'alimentent sur les parties aériennes des plantes, et les nématodes des parties racinaires, ceux qui s'alimentent sur les racines et tubercules souterrains.

Ils peuvent également être regroupés selon leur comportement alimentaire et leur mobilité en trois groupes principaux :

Endoparasites migrants

Ce sont des nématodes mobiles qui s'alimentent à l'intérieur des tissus racinaires des plantes.

1. Endoparasites sédentaires

Décrit comme nématodes qui arrivés sur un site nourricier, cessent d'être mobiles et s'alimentent sur ce site nourricier.

2. Ectoparasites

Définit comme des nématodes qui s'alimentent à la surface des tissus racinaires des plantes. (Coyne et al.2010).

Symptômes d'attaques des nématodes

Le plus grand défi lorsqu'il s'agit de reconnaître les nématodes comme responsables des dommages observés sur une culture tient au fait que la plupart d'entre eux ne produisent pas de symptômes spécifiques et faciles à identifier. En effet, les attaques de nématodes sont le plus souvent non spécifiques et facilement confondues avec des symptômes d'origines abiotique ou biotique. Par exemple les symptômes de chlorose peuvent être dus à une déficience en azote mais aussi à la présence de nématodes, de la même manière une faible croissance peut être causée par un manque de fertilité du sol ou de stress hydrique mais également par la présence de nématodes. Il est fortement recommandé de rechercher la présence de nématodes lorsque les cultures souffrent de pertes de récolte et montrent l'un ou l'autre plusieurs symptômes. Les symptômes d'attaques de nématodes sont observables sur les parties aériennes comme sur les parties souterraines (Institut national de la protection des végétaux, 2001)

➤ **Symptômes sur les parties aériennes**

Les symptômes se divisent en deux catégories : ceux qui sont causés par des nématodes des parties aériennes qui attaquent le feuillage et ceux qui sont causés par des nématodes du sol attaquant les racines (Coyne et al, 2010)

➤ **Symptômes causés par les nématodes des parties aériennes**

Sont des symptômes spécifiques associés à des nématodes plus aisés à diagnostiquer, ils comprennent :

- 1) Formation de galle, ou gonflement anormal des grains ou des feuilles des stries sur feuille, blanchissement et décoloration des feuilles (particulièrement sur climat tempéré).
- 2) Nécrose interne de la tige, association avec un anneau rouge.
- 3) Nécrose de l'inflorescence

➤ **Symptômes causés par les nématodes des racines**

Les nématodes des racines sont la cause à des degrés divers, de défauts de croissance des parties aériennes, mais ces symptômes ne sont pas suffisants pour diagnostiquer un problème nématologique. La plupart de ces symptômes peuvent être le reflet ou confondus pour d'autres problèmes comme une alimentation insuffisante en eau ou une déficience de l'absorption minérale. Ils comprennent :

- Chloros (jaunissement) ou toute autre coloration anormale du feuillage
- Croissance inégale et réduite
- Feuillage fin et peu fourni
- Réduction de la taille des fruits et des graines

➤ **Symptômes sur parties souterraines**

Sont dus aux nématodes et sont parfois suffisamment spécifiques pour autoriser le diagnostic d'un problème nématologique. Les symptômes comprennent :

- Formation de galles
- Lésions sur les racines
- Nécrose sur les racines et les tubercules, pourrissement et mort des racines
- Racines déformées (Pelosi, 2008).

Le rôle des microorganismes du sol :

Les microorganismes du sol sont essentiels à la santé de notre planète. Nous commençons à peine à réaliser combien leur présence joue un rôle important dans la santé des humains aussi. Ces organismes fournissent de multiples services qui assurent la continuité des fonctions vitales de notre planète.

Ces services comprennent :

- La décomposition rapide
- La purification de l'eau
- La destruction des toxines
- Favoriser une zone tampon contre la sécheresse
- La séquestration du carbone
- L'atténuation de l'érosion et de la compaction du sol
- La suppression de pathogènes et de maladies
- Et beaucoup d'autres...

1.2.2. La phase liquide :

Elle est composée d'eau dans laquelle sont dissoutes des substances solubles provenant de l'altération des roches et de la décomposition des matières organiques.

La phase liquide du sol n'est pas de l'eau pure mais est une solution dont la composition est complexe et très variable. On la désigne souvent par l'expression 'solution du sol'. Elle contient de très nombreuses substances dissoutes organiques et inorganiques, ionisées et non ionisées dont la nature et la concentration dépendent de plusieurs phénomènes. Certains entraînent une augmentation des concentrations et sont appelés des phénomènes sources. D'autres, au contraire, entraînent une diminution des concentrations et sont appelés des phénomènes puits.

D'une façon générale, la solution du sol est difficile à décrire et à étudier en raison de sa très grande variabilité spatiale et temporelle de sorte qu'il n'existe pas de composition type. On peut cependant donner quelques indications générales en distinguant deux grandes catégories de soluté (Sposito, 1989).

1.2.3. La phase gazeuse :

La phase gazeuse du sol est encore appelée (atmosphère du sol), sa composition est souvent voisine de celle de l'air mais elle peut être très variable dans l'espace et dans le temps, Elle dépend principalement de deux facteurs la proximité de l'atmosphère c'est-à-dire la profondeur dans le sol et l'activité biologique. (La France agricole, 1^{er} édition, 21 aout 2003).

2. La matière organique :

Les êtres vivants sont à la fois constitués de molécules minérale et organique, la matière organique est donc caractéristique des êtres vivants quand ne trouve pas dans le monde interne, elle est combustible, elle se compose de 4 types d'atomes chimique : le carbone, l'hydrogène, l'oxygène et l'azote.

La matière organique influence la stabilité structurale par plusieurs mécanismes. Elle joue le rôle de liant entre les particules et modifie les propriétés hydriques du sol. Certaines études montrent une relation directe entre la teneur en carbone total et la stabilité structurale (par exemple Dutartre et al. 1993 ; Le Bissonnais et al. 2002). Ce n'est pas toujours le cas, selon le type de sol ou le test de mesure de la stabilité structurale utilisé, suggérant ainsi que la relation n'est probablement pas linéaire et dépend de la nature des interactions particules de sol – matière organique (Le Bissonnais, 1996).

2.1. Rôle de la matière organique du sol sur la formation et la stabilisation des agrégats :

La matière organique du sol (M.O.S.) est un des facteurs importants de l'agrégation des particules solides dans le sol. Dans les sols non calcaires ou qui contiennent des teneurs faibles d'oxydes de fer et aluminium, elle est même le facteur principal de cohésion des agrégats entre eux .Elle intervient à différents niveaux d'organisation de la structure sous des formes différentes en fonction du niveau d'échelle considéré .Dans un modèle proposé par Tisdall et Oades (1982) pour des sols rouges bruns australiens et généralisé par la suite, différents types de matières organiques ont été décrites :

1/ des agents agrégeant transitoires, comme par exemple des polysaccharides, qui peuvent être décomposés rapidement par les micro-organismes du sol ;

2/ des agents agrégeant temporaires, comme les racines et les hyphes mycéliens

3/ des agents agrégeant persistants, comme des composés humiques associés à des cations métalliques. Dans ce modèle, les agents persistants sont associés à la cohésion des micro-agrégats ($< 250 \mu\text{m}$). Les agents transitoires et temporaires permettraient de regrouper ces micro-agrégats pour former des macro-agrégats ($> 250 \mu\text{m}$) (figure 1).

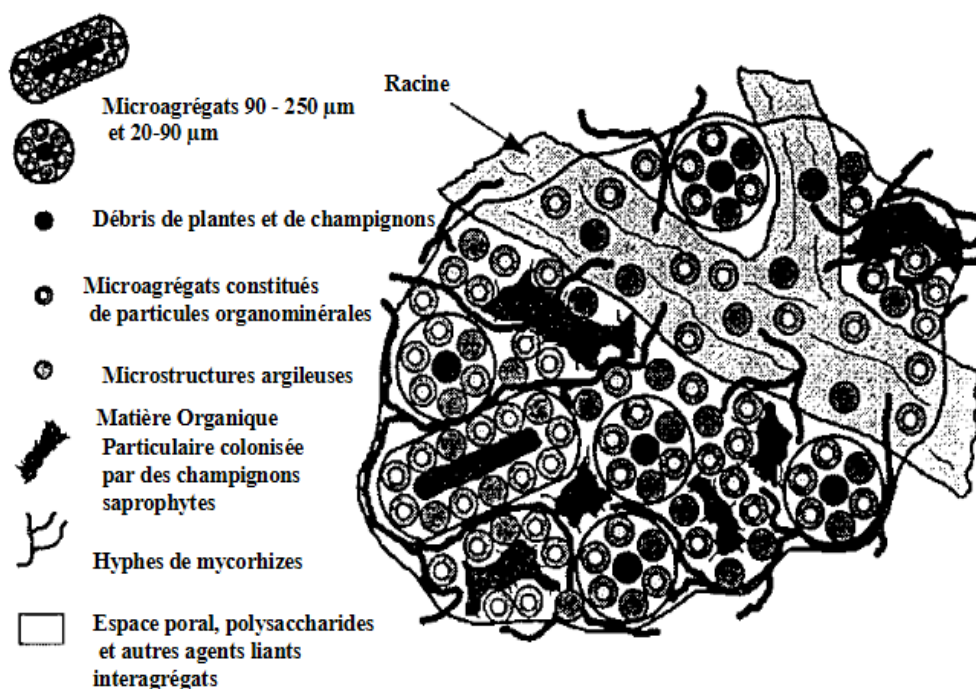


Figure 1 : Structuration d'un macro-agrégat selon le modèle hiérarchique (adapté de Jastrow et Miller, 1997)

Compte tenu du type de liaison des structures entre elles, la stabilité des micro-agrégats est considérée comme très importante (la dispersion par ultrasons est souvent nécessaire pour désagréger ces particules). En revanche, les macro-agrégats peuvent être désagrégés par des contraintes physiques liées à des pratiques agricoles ou par des pluies. C'est à cette échelle qu'une grande partie de la qualité physique du sol se joue. L'état structural influe sur l'ensemble des facteurs et des conditions physiques qui conditionnent la germination, la levée des cultures et l'enracinement. La résistance à la désagrégation amenant à la battance et à l'érosion se situent aussi à l'échelle du macro-agrégat. D'autre part, les macro-agrégats stables

séquestrent plus de carbone que les micro-agrégats ou les macro-agrégats instables (Elliot, 1986 ; Cambardella et Elliot, 1993, Puget et al. 1995). Cette échelle du macro-agrégat est donc plus sensible à la désagrégation mais néanmoins très importante dans la hiérarchie de la structure du sol. L'apport de matières organiques correspond à l'entrée d'un grand nombre de molécules carbonées dans un sol. Celles-ci peuvent modifier la stabilité structurale soit directement, par action physico-chimique directe avec les particules de sol (facteurs abiotiques), soit indirectement, au cours de la décomposition de la matière organique apportée par les micro-organismes du sol (facteurs biologiques).

2.2. Mécanismes de désagrégation du sol et tests de stabilité structurale :

Le Bissonais proposait une revue des mécanismes associés à la désagrégation et des méthodes permettant d'évaluer la stabilité structurale. Quatre processus peuvent être identifiés

A/ L'éclatement, correspondant à la désagrégation par compression de l'air piégé lors de l'humectation. L'intensité de l'éclatement dépend du volume d'air piégé, donc de la teneur en eau initiale des agrégats et de leur porosité

B/ La désagrégation mécanique sous l'impact des gouttes de pluie. Elle intervient principalement lorsque le sol est saturé en eau. L'énergie cinétique des gouttes d'eau n'est plus absorbée mais transformée en force de cisaillement. La désagrégation mécanique peut aussi être provoquée par le passage d'outil de travail du sol.

C/ La microfissuration par gonflement différentiel. Ce phénomène intervient suite à l'humectation et la dessiccation des argiles, entraînant des fissurations dans les agrégats. L'importance de ce mécanisme dépend en grande partie de la teneur en argile des sols.

D/ La dispersion physico-chimique. Elle correspond à la réduction des forces d'attraction entre particules colloïdales lors de l'humectation. Elle dépend de la taille et la valence des cations (particulièrement du sodium) pouvant lier les charges négatives dans le sol. C'est le mécanisme de désagrégation le plus efficace, car il concerne les particules élémentaires et décuple les autres mécanismes (Bresson et Boiffin, 1990)

2.3. Modèles de mise en place de l'agrégat et de la stabilité structurale en interaction avec les matières organiques apportées au cours de leur décomposition :

Guckert et al. (1975) proposaient une élaboration des unités structurales stables en deux étapes :

A/ une phase agrégative, directement liée à l'activité des micro-organismes, des corps microbiens et filaments mycéliens, ainsi que certains produits de leur métabolisme comme les polysaccharides ;

B/ une phase de stabilisation, où ils considéraient une évolution secondaire par biodégradation, une minéralisation partielle des molécules carbonées préalablement formées ainsi qu'une incorporation dans des composés humiques et un renforcement des mécanismes d'adsorption et des liaisons avec les particules minérales

Cette vision dynamique de l'évolution de la structure peut être mise en parallèle avec le modèle hiérarchique décrit par Tisdall et Oades, (1982), où les éléments considérés dans la phase agrégative étaient décrits respectivement comme des agents agrégeant temporaires et transitoires .Golchin et al. (1994) précisèrent ce modèle pour les micro-agrégats en caractérisant la matière organique associée par fractionnement granulométrique. Il apparaissait que la Matière Organique Particulaire incluse à l'intérieur des agrégats (M.O.P.I), composée de fragments végétaux en cours de décomposition, se trouvait être au centre d'agréats stables dans un premier temps. Puis, ces agrégats devenaient de moins en moins stables à mesure que la teneur en composés protéiques et en carbohydrates diminuait.

Dans le cas des macro-agrégats, un modèle analogue peut être proposé, si ce n'est qu'elles M.O.P.I. sont plus jeunes encore que dans les micro-agrégats (Puget et al. 1995). Six et al. (2000) proposaient ce type de modèle avec des modalités de travail du sol et de non travail du sol.

Dans ce modèle, l'apport de matière organique fraîche est à l'origine de la formation de macro-agrégats. Les matières organiques apportées deviennent le centre d'une zone très favorable au développement des micro-organismes. L'activité biologique générée par la présence de la matière organique exogène permet de former de nouveaux agrégats et déconsolider les agrégats existant. Cette notion de noyau où se situe la décomposition, ou résidu de la sphère, est confirmée par la forte hétérogénéité spatiale et la petite échelle à laquelle se fait la décomposition, de l'ordre de quelques millimètres (Gaillard et al. 1999), soit à l'échelle du macro-agrégat. La décomposition de la M.O.A. induit une augmentation de la biomasse microbienne, le développement d'hyphes mycéliens et la sécrétion de molécules capables d'agréger les particules solides à l'échelle du macro-agrégat. Dans la suite de la dynamique de décomposition, le modèle propose une évolution à l'échelle du micro-agrégat, avec des P.O.M.I plus petites. La désagrégation induite dans le modèle par le travail du sol ou

plus généralement par les diverses contraintes physiques existant en conditions naturelles redistribue le spectre de taille des agrégats, en brisant notamment les macro-agrégats dont la stabilité est réduite suite à la baisse de l'activité biologique. Dans ce modèle récent, on peut considérer que les phases d'agrégation et de stabilisation proposées par Guckert et al. (1975) se retrouvent aux différentes échelles du modèle hiérarchique et à différents pas de temps. Dans tous ces modèles, l'activité biologique liée à la décomposition des produits organiques est à l'origine de l'évolution de la stabilité de la structure.

2.4. Modalités de la décomposition des matières organiques apportées :

La décomposition des matières organiques apportées est définie comme le processus de séparation de matériaux organiques apportés dans le sol en leurs constituants de base (Paul, 1992). La majeure partie de cette décomposition est réalisée par des micro-organismes hétérotrophes. Les différentes modalités influençant la décomposition de la matière organique apportée (M.O.A.) sont liées à l'activité de ces micro-organismes :

A/ les conditions du milieu : la température, l'humidité, la disponibilité en O₂ le pH du sol (Parr et Papendick, 1978) sont des facteurs qui influencent directement ou indirectement l'activité microbiologique dans le sol. La disponibilité en azote minéral dans le sol est aussi importante. Les micro-organismes ont un ratio C/N relativement faible (C/N entre 8 et 12) et on a souvent besoin d'une source d'azote minérale extérieure pour utiliser le substrat C du produit organique de façon optimale.

B/ le contact entre la matière organique apportée et les particules de sol : ce contact détermine la colonisation par les micro-organismes, la diffusion des composés solubles et les transferts de nutriments et d'oxygène. La surface de contact est déterminée par les caractéristiques physiques initiales des M.O.A. et le degré "d'intimité" entre le sol et la M.O.A. La compaction améliore significativement la minéralisation de la M.O.A., tant que le système reste aérobie. Ce paramètre peut être particulièrement important lorsque les matières organiques sont posées à la surface du sol.

C/ Les caractéristiques du sol : la texture, la structure et le fond géochimique du sol modifient les conditions de décomposition. Cependant, les caractéristiques intrinsèques du sol ont un effet relativement faible sur la décomposition d'une M.O.A. en conditions contrôlées et optimisées (Ladd et al. 1993 ; Abiven et al. soumis).

D/ la qualité intrinsèque de la matière organique apportée.

Ce paramètre correspond aux caractéristiques intrinsèques et initiales (au moment de l'apport) des M.O.A. vis à vis de sa décomposabilité par les micro-organismes. Ces caractéristiques sont d'ordre chimique (labile / récalcitrant) ou physique (taille et forme des particules). (Heal et al. 1997).

La décomposition des matières organiques apportées est un phénomène discontinu dans le temps, mais aussi réparti de façon très hétérogène dans l'espace. Les microorganismes responsables de la décomposition occupent généralement moins de 5% de l'ensemble de

L'espace disponible dans le sol. Ils sont particulièrement présents autour des matières organiques récemment apportées, le résidu sphère (Parkin, 1987 ; Petersen et al. 1996) et dans la rhizosphère observaient une activité biologique particulièrement importante dans les quelques millimètres autour d'une paille en début de décomposition. Le volume de sol concerné était d'autant plus important (jusqu'à 6mm autour de la M.O.A.) que la décomposition était importante. Les différents microorganismes vivent dans des microhabitats qui se répartissent à l'intérieur de la porosité du sol principalement en fonction de leur taille (Nannipieri et al. 2003). La vitesse de décomposition des produits apportés au sol est différente le long du gradient de porosité (Strong et al. sous presse).

3. Rôle de la qualité du sol dans le fonctionnement des écosystèmes :

Le sol est un milieu vivant beaucoup plus complexe que l'air ou l'eau ; son rôle est essentiel dans la production de biomasse et dans le cycle biogéochimique des éléments, et ces caractéristiques fonctionnelles peuvent être altérées par les dégradations et les pollutions anthropiques. Les conséquences peuvent alors affecter les autres composantes des écosystèmes terrestres (plantes, animaux, hommes), mais également des écosystèmes aquatiques. L'eau est en effet un facteur important de la formation et du fonctionnement des sols. Ceux-ci vont en retour déterminer la qualité des eaux de surface et des nappes phréatiques. Ce paragraphe introduit le concept de "santé des écosystèmes" et sa relation avec la santé des sols. Son objectif est de prendre conscience de l'enjeu environnemental majeur de la santé des sols dans les problèmes de fonctionnement des écosystèmes.

Les deux concepts d'"écosystème" et de "santé" sont très ambigus. Le concept d'écosystème souffre du manque de limites concrètes et définitives. Le concept de santé souffre quant à lui de jugements de valeur implicites qui intègrent les intérêts de l'homme dans les schémas d'évaluation de l'état d'un système fonctionnel). La dynamique complexe qui caractérise la

plupart des écosystèmes (variabilité spatiale et temporelle) est une difficulté supplémentaire qui contribue à l'ambiguïté du problème. L'évaluation de la santé des écosystèmes doit tenir compte de trois considérations majeures). Premièrement, l'écosystème doit être affranchi de tous signes de dysfonctionnement. Ces syndromes peuvent par exemple inclure pour un écosystème terrestre, une perte des nutriments du sol, une diminution de la diversité spécifique accompagnée ou non d'une modification de la composition des communautés au profit d'espèces opportunistes, une réduction de la productivité de l'écosystème. Deuxièmement, les multiples interactions et transferts de flux (matière et énergie) qui définissent un écosystème doivent s'autoréguler, et donc fonctionner sans l'intervention de l'homme. Troisièmement, l'écosystème ne doit pas être perturbé par les sous-systèmes le Composant (atmosphères, eau, sol).

Le sol joue un rôle essentiel dans le cycle des éléments via les processus d'altération des roches et les processus de décomposition de la matière organique. Il est une matrice dans laquelle les plantes puisent leurs nutriments et conditionnent en retour sa formation et l'évolution de ses propriétés abiotiques et biotiques. Le sol peut ainsi être considéré comme une véritable interface dans l'environnement et comme une composante majeure de la santé des écosystèmes. Ceci dans la mesure où les perturbations affectant les propriétés édaphiques influencent nettement les conditions définies par Rapport et précisées plus haut. La santé des écosystèmes, basée sur leur aptitude à fonctionner naturellement, est donc fortement dépendante de la santé des sols. Il est dès lors essentiel de considérer les facteurs qui influencent l'évolution et la transformation des sols, dans les processus de fonctionnement des écosystèmes. (Rapport et al. 1985).

Tableau 3 : Exemples de biotransformations produits par les divers microorganismes présents dans les sols (modifié d'après Stengel, 1998 et Prescott et al. 2003).

PROCESSUS	REACTIONS
Microorganismes aérobies	
Respiration aérobie	$(CH_2O) + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$
Nitritation H ₂ O	$NH_4^+ + 3/2 O_2 \rightarrow NO_2^- + 2H^+ + H_2O$
Nitratation	$NO_2^- + 1/2 O_2 \rightarrow NO_3^-$
-Microorganismes anaérobies facultatifs	
Réduction catabolique des nitrates	$C \text{ organique} + NO_3^- \rightarrow NO_2^- + CO_2$
Dénitrification CO ₂	$C \text{ orga} + NO_3^- \rightarrow N_2O, N_2 + CO_2$
Réduction du Fer, du manganèse	$C. \text{ orga} + Fe^{3+}, Mn^{4+} \rightarrow Fe^{2+}, Mn^{2+} + CO_2$
Fermentations	$C. \text{ orga} \rightarrow \text{acides organiques (acétate, butyrate)}$
Microorganismes anaérobies stricts	
Réduction des sulfates CO ₂	$C \text{ orga (ou } H_2) + SO_4^{2-} \rightarrow S^{2-} \text{ (ou } H_2S) + CO_2$
Réduction du CO ₂ CH ₃ CO ₂ ⁻ + H ⁺	$H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4, CH_3CO_2^- + H^+$
Dé méthylation	$CH_3CO_2^- + H^+ \rightarrow CO_2 + CH_4$

Réduction du proton

Acides gras, alcools + H⁺ H₂ +CO₂ + CH₃CO₂⁻ +H

4. fertilité du sol et production alimentaire :

La fertilité du sol correspond à la capacité du sol à supporter et soutenir la croissance des végétaux, notamment en rendant l'azote, le phosphore, le soufre et d'autres nutriments disponibles pour l'assimilation par les plantes. Ce mécanisme est facilité par

- 1) le stockage des nutriments dans la MOS
- 2) le recyclage des nutriments de la forme organique à une forme minérale disponible pour les végétaux et
- 3) des mécanismes physiques et chimiques qui contrôlent l'absorption des nutriments, la disponibilité, le déplacement et les éventuelles pertes vers l'atmosphère et l'eau. Les sols gérés représentent un écosystème hautement dynamique. Ce dernier favorise les fonctions du sol et la fourniture en services éco systémiques. En général, la fertilité et le fonctionnement des sols dépendent des interactions entre la matrice minérale du sol, les végétaux et les micro-organismes. Ceux-ci sont responsables de l'accumulation et de la dégradation de la MOS et ainsi de la préservation et de la disponibilité des nutriments dans le sol. Finalement, un cycle équilibré des nutriments dans les sols doit être maintenu pour entretenir les fonctions du sol (FAO et ITPS, 2015).

5. Les influences des microorganismes sur le cycle du carbone, de l'azote et du phosphore dans le sol :

Un cycle est une suite de phénomènes se renouvelant dans un ordre immuable

. Au cours de leur croissance et leur métabolisme, les microorganismes interagissent les uns avec les autres dans le cycle des nutriments tels que le carbone, l'azote, le phosphore, le soufre, le fer et le manganèse. Le cycle des éléments nutritifs est appelé aussi cycle biogéochimique lorsqu'il est appliqué à l'environnement (Prescott et al. 2002). Dans les cycles biogéochimiques, les éléments sont oxydés et réduits par des microorganismes pour répondre à leurs besoins métaboliques. Sans les cycles biogéochimiques, la vie sur terre cesserait d'exister (Tortora et al. 2010). Tous les cycles biogéochimiques sont liés et les

transformations de ces nutriments ont des répercussions au niveau planétaire. Des composants gazeux importants se produisent dans les cycles de carbone et de l'azote. Ainsi, les microorganismes du sol ou aquatiques peuvent souvent fixer des formes gazeuses de carbone et d'azote.

5.1 Dynamique du carbone organique des sols et processus de stabilisation :

Si Carbone Organique du sol(COS), à un instant t, représente le bilan entre les entrées et les sorties de COS, la quantité correspondante de COS stockée et la durée de ce stockage dépendent de divers processus de stabilisation du COS, entrant dans son cycle biogéochimique dans les sols.

5.2 Cycle biogéochimique du carbone organique :

Le cycle de COS correspond à l'entrée de carbone organique dans le sol, à sa transformation et à sa dissipation. De nombreux processus sont en jeu :

- 1) la déposition (Addition de COS à la fraction organique du sol),
- 2) l'altération (.la conversion du COS d'une structure chimique en une autre différente, résultant d'attaques enzymatiques ou de réactions chimiques),
- 3) L'assimilation (Incorporation du COS dans les tissus des organismes décomposeurs) et enfin iv) la minéralisation qui correspond à la conversion du COS en CO₂, via la respiration des organismes du sol (Baldock et Skjemstad, 2000). La somme de ces processus aboutit à la notion de décomposition du COS (Baldock et Skjemstad, 2000).

5.3 Les différents réservoirs du carbone organique du sol et les processus de stabilisation du carbone organique

Le concept de réservoir de COS est basé sur la prédisposition du COS à être dégradé par l'activité microbienne. Ce concept traduit les formes des MOS en jeu dans la dynamique de COS et dans sa réponse suite à des changements environnementaux ou face aux différents modes de gestion des sols. La MOS est constitué :

- a) de matière vivante (biomasse racinaire vivante, macroorganismes, microorganismes) qui peut atteindre jusqu'à 15% du COS total.

b) De matière organique morte, qui peut représenter jusqu'à 98% du COS total (Calvet et al. 2015 ; Shibu et al. 2006). Il est d'usage de scinder cette MOS morte en deux réservoirs : le réservoir labile ; le réservoir stable.

5.3.1. Matière vivante : organismes du sol :

Plusieurs milliers d'espèces vivantes peuvent être répertoriées dans les sols, allant des microorganismes, invisibles à l'œil (bactéries, champignons, protozoaires) jusqu'à la mégafaune. Les fonctions assurées par les microorganismes sont majeures : s'ils ne représentent que 2 à 3% du COS, ils sont à la base d'environ 60-80% de l'activité biologique dans les sols, associée aux processus de régulation des cycles des nutriments et de la décomposition des résidus organiques (Calvet et al., 2015; Van-Camp et al., 2004). Les microorganismes les plus étudiés sont les champignons et bactéries. On estime qu'un gramme de sol sec contient 10⁹ bactéries et 10⁶ champignons, ce qui représente une biomasse respective de 300 à 3000 kg.ha⁻¹ et de 500 à 5000 kg.ha⁻¹ (Sylvia et al. 2005 ; Van-Camp et al. 2004). La diversité de ces communautés est le reflet de leur complexité. Elle englobe :

- 1) la variabilité génétique au sein des taxons (espèces).
- 2) le nombre de taxons (richesse).
- 3) l'abondance relative des taxons.
- 4) les groupes fonctionnels au sein de la communauté.

Tardy et al. (2015) ont montré que les richesses bactérienne et fongique expliquaient 49,9% (respectivement 32,2 et 17,7%) de la dynamique du COS, dans des sols de friches agricoles. Ils ont également mis en évidence l'influence du mode de gestion des sols sur le degré de cette contribution : après l'incorporation de résidus de cultures dans ces mêmes sols, cette valeur atteignait 77,7% (dont 77% expliquée par la richesse fongique). L'étude des communautés microbiennes est donc primordiale dans l'étude de la dynamique du COS. Enfin, notons que la biomasse microbienne a un turnover considérablement supérieur à celui

du réservoir stable (de 0,2 à 6 ans) et est affectée par les mêmes facteurs que ceux de la fraction labile (Stevenson, 1994).

5.3.2. Matières organiques mortes

Le réservoir labile

Le réservoir labile comprend la litière végétale broyée ainsi que la fraction non protégée par la fraction minérale et facilement dégradable par les organismes vivants. La taille de ce réservoir dépend de la nature biologique et des quantités d'intrants organiques, ainsi que des facteurs influençant l'activité microbienne de décomposition, tels que le climat (température, humidité ; Stevenson, 1994). Les résidus végétaux sont présents :

- Dans la litière constituée de matières macro organiques à la surface du sol ;
- Dans le sol sous forme de «matières organiques particulières» (MOP) : fragments de tissus végétaux retrouvés à différents stades de décomposition, mais où des structures cellulaires sont encore reconnaissables. La taille des MOP est variable (du micromètre à quelques dizaines de millimètres) ; les grosses molécules sont seulement mélangées à la fraction minérale, alors que les plus petites peuvent être protégées temporairement par les agrégats (et intègrent alors le réservoir stable, tant qu'elles sont protégées). La quantité de MOS contenue dans cette fraction dépend de nombreux facteurs tels que la quantité d'intrants organiques, le pH, la température, la texture et l'humidité, c'est-à-dire les facteurs qui influencent directement l'activité microbienne (Six et al. 2002 ; Stevenson, 1994). La composition de ces MOS est la même ou très voisine de celles des végétaux dont elles sont issues. Elle dépend donc fortement de la nature des couverts végétaux et de leur composition. Cette fraction est caractérisée par un turnover rapide dans les sols (<20ans), et sert de source de nutriments pour les plantes. La taille de ce réservoir est généralement inférieure à celle du réservoir stable, néanmoins, il peut représenter entre 10 et 30% de COS dans certains sols, ce chiffre étant très variable (Shibu et al. 2006 ; Stevenson, 1994).

Le réservoir stable

La stabilité biologique, décrite par Baldock et Skjemstad (2000), correspond à «la capacité du carbone organique à résister aux attaques enzymatiques grâce à une hausse de leur résistance

correspondant à une stabilité accrue». Le réservoir stable, selon la littérature, à une taille supérieure à celle du réservoir labile (Song et al. 2012). Les principaux mécanismes impliqués dans la stabilisation de la Matière Organique du Sol(MOS) sont :

- La récalcitrante chimique (aussi appelée préservation sélective) qui correspond à la protection de la MOS grâce à sa propre composition, lui conférant une résistance à la biodégradation. C'est notamment le cas des matières organiques carbonisées (charbons), constituées de mélanges hétérogènes de macromolécules biologiques altérées par la chaleur et stabilisées pendant 500 à 10000ans (les charbons appartiennent à la catégorie des MOP, étant donné qu'ils ont une structure cellulaire visible).

- La protection physique qui correspond à l'effet positif de l'agrégation sur la stabilisation de la MOS : les agrégats représentent des barrières physiques entre les microorganismes et la MOS. Cette protection physique est plus précisément due à :

1/la compartimentation des MOS à l'intérieur des agrégats, qui deviennent alors moins accessibles pour les microorganismes et leurs enzymes, qui se trouvent en dehors des pores,

2/la réduction de la diffusion d'oxygène au sein des macrospores mais surtout des micropores,

3/ une compartimentation des microorganismes. L'inaccessibilité physique des MOS aux microorganismes peut aussi être permise par une disposition de la MOS à l'intérieur de phyllosilicates, par des phénomènes d'hydrophobicité, ou par encapsulation à l'intérieur de macromolécules.

- La stabilisation physico-chimique (interaction avec les surfaces –minérales ou organiques – et avec les ions métalliques) est définie comme la résultante de l'interaction chimique et physico-chimique entre la MOS avec des surfaces minérales (i.e., argiles et particules limoneuses), ainsi qu'avec d'autres MOS ou encore avec des ions métalliques. Les MOS sont donc protégées de la minéralisation grâce à ces interactions intermoléculaires, qui comprennent, par exemple, les échanges de ligands, la formation de ponts cationiques, des interactions faibles, la complication avec des métaux (Chenu et Stotzky, 2002 ; Lützow et al. 2006).

Il est donc nécessaire de connaître la taille et la proportion de ces réservoirs labiles et stables, pour avoir une idée de la dynamique du COS.

5.3.3. Evolution du modèle conceptuel de la dynamique du carbone organique :

Pendant longtemps, le modèle de stabilisation de la MOS reposait sur le phénomène d'humification, c'est-à-dire, la condensation de la MOS en de grandes et sombres macromolécules aromatiques, riches en C et en N et résistantes à la décomposition (les substances humiques). Les quantités de CO₂ émises par les sols, selon ce concept, reposaient donc sur la qualité des MOS (Lehmann et Kleber, 2015). Depuis 2010, grâce à l'évolution des méthodes d'analyses, ce modèle est remis en question et est remplacé par de nouveaux modèles, qui reposent principalement sur l'accessibilité de la MOS aux microorganismes du sol. Un modèle, combinant différents concepts émergents, a été proposé par Lehmann et Kleber (2015) et est présenté dans la figure 6. Il est ainsi admis au sein de la communauté scientifique, que la récalcitrance chimique dans le sol (que l'on supposait jusqu'alors très importante pour la stabilisation de la MOS), ne joue un rôle qu'à court terme sur la stabilité du COS (de l'année à la décennie ; Derrien et al. 2016). Ce sont les mécanismes de protections physique et physico-chimique qui prédominent car ils impliquent la matrice minérale du sol et se développent à une échelle de temps supérieure (plusieurs décennies). Les termes «humification» et «substances humiques» sont désormais abandonnés dans les modèles de dynamique et de stabilisation du COS. Ils sont toutefois conservés pour se référer aux concepts traditionnels qui reposent sur des méthodes de fractionnement encore utilisées aujourd'hui.

5.4. Description de cycle de carbone :

Le carbone peut être présent sous formes réduites, tels que le méthane (CH₄) et la matière organique (carbone organique), et sous des formes oxydées comme le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de carbone (CO₂) et le calcaire (CaCO₃). Les agents réducteurs tels que l'hydrogène, et des agents oxydants tels que l'oxygène, influent sur le déroulement des réactions biologiques et chimiques faisant intervenir le carbone (Prescott et al. 2010). Le cycle biogéochimique primaire est le cycle du carbone. La quantité de carbone dans les réservoirs de la terre doit être maintenue en équilibre avec la quantité de carbone recyclée. Les sédiments et les roches de la croûte telles que le calcaire (CaCO₃), ou dissouts dans les océans sous forme d'ions carbonates (CO₃²⁻), sont de loin le plus grand réservoir de carbone sur

terre (Tortora et al. 2010 ; Mardigan et al. 2012). La vitesse de décomposition de ces sédiments et roches en carbone et en dioxyde de carbone (CO₂) est si lente que le flux de ce réservoir est insignifiant sur une échelle de temps (Mardigan et al. 2012). Tous les organismes, y compris les plantes, les microorganismes et les animaux, contiennent de grandes quantités de carbone sous forme de composés organiques, tels que la cellulose, les amidons, les graisses et les protéines (Tortora et al. 2010). Les phototrophes et chimio lithotrophes anaérobies produisent également des composés organiques en excès, mais dans la plupart des environnements les contributions de ces organismes à l'accumulation de matière organique sont insignifiantes par rapport à celui des phototrophes aérobies. Les composés organiques sont dégradés biologiquement en CH₄ et CO₂. Le dioxyde de carbone, dont la plupart est d'origine microbienne, est produit par d'autres formes d'aérobies et par la respiration. Le méthane est produit dans les milieux anoxiques par les méthanogènes qui réduisent le dioxyde de carbone avec l'hydrogène ou par la séparation d'acétate.

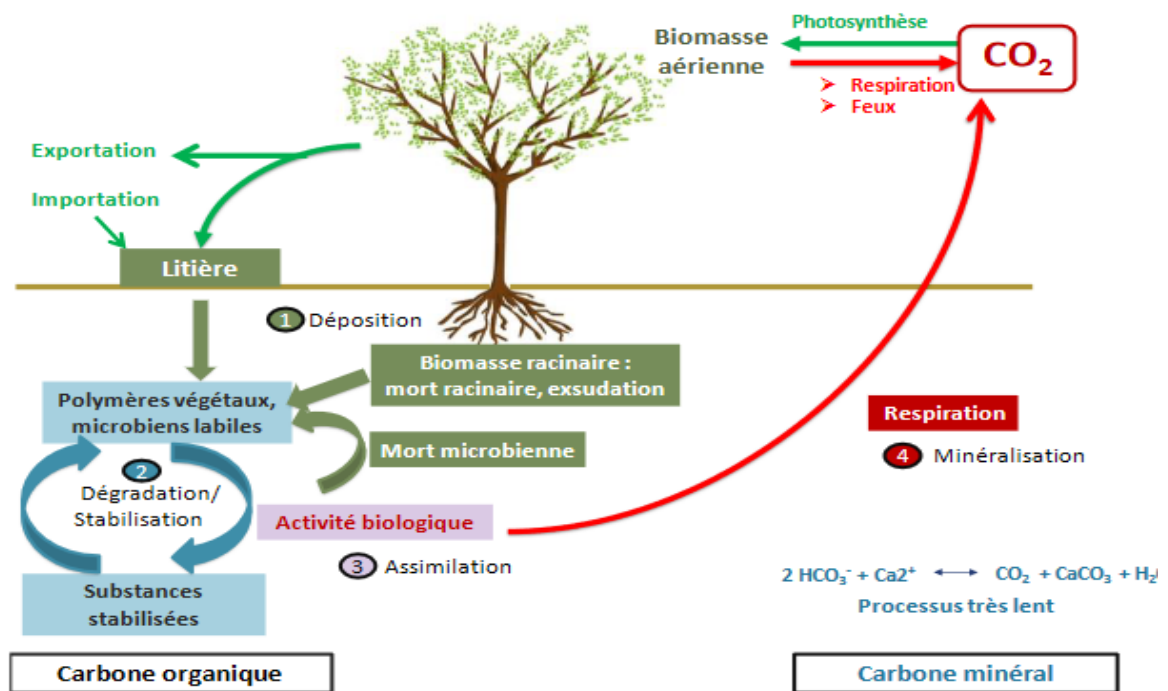


Figure 2 : Cycle du carbone du sol (adapté d'après Chenu et al. 2014 ; Lehmann et Kleber, 2015)

6) Cycle de l'azote :

On peut diviser l'azote du sol en deux grandes catégories, l'azote organique et l'azote inorganique. L'azote organique est lié à la matière organique du sol et se retrouve sous forme de protéines, de biomasse et d'acides nucléiques (Paul et Clark, 1988). Une partie de cet azote, la litière, est facilement accessible aux microorganismes et décomposée rapidement. Une seconde partie, l'humus stabilisé biologiquement et physiquement, est plus résistant à l'attaque des microorganismes et se décompose plus lentement. Entre la litière et l'humus, il y a une gradation des disponibilités et des vitesses de décomposition. L'azote inorganique se retrouve sous différentes formes : l'ammonium (NH_4^+), les nitrites (NO_2^-), les nitrates (NO_3^-), l'ammoniac (NH_3) et l'azote gazeux (N_2O ou N_2).

Les différentes formes de l'azote correspondent aussi à différents états d'oxydation (Paul et Clark, 1988), et dans le sol les transformations d'un état à l'autre se font par l'intermédiaire de processus biochimiques. L'enchaînement de ces processus est appelé le cycle de l'azote du sol.

6.1 APPORTS :

6.1.1 Fertilisants inorganiques et organiques :

Les apports d'azote par les fertilisants sont très importants en termes de quantité. Habituellement, les fertilisants sont disponibles sous forme inorganique (produite industriellement) ou organique (principalement des fumiers et des lisiers). L'azote ajouté sous forme inorganique est immédiatement disponible pour les plantes alors que la plus grande partie de l'azote ajouté par fertilisants organiques doit être transformée en azote inorganique avant d'être assimilable par les plantes. Les quantités à appliquer et les dates d'épandage sont fonction de la culture, du type de sol et du climat.

6.1.2 Fixation biologique :

La fixation biologique est le passage de l'azote gazeux (N₂) en azote organique sous l'action des microorganismes du sol. La fixation est symbiotique lorsqu'elle est réalisée par des bactéries, comme le Rhizobium, qui vivent en association avec les plantes de type légumineuse. Elle est non-symbiotique lorsqu'elle est réalisée par des bactéries, comme celles du genre Clostridium, qui fixent l'azote de façon indépendante. L'azote fixé est libéré lorsque les microorganismes ou les plantes auxquelles il est associé meurent (Haynes, 1986). La quantité d'azote fixé est faible lorsqu'il s'agit de fixation non-symbiotique, mais dans le cas de la fixation symbiotique, l'apport peut valoir jusqu'à deux fois l'ajout d'azote par les fertilisants (Paul et Clark, 1988). Les conditions optimales pour une bonne fixation de l'azote comprennent un rapport carbone/azote élevé, une humidité adéquate et un pH neutre (Stevenson, 1982).

6.2 Transformations internes :

6.2.1 Minéralisation et immobilisation

Ce processus est crucial en agriculture car il transforme l'azote organique en azote inorganique directement assimilable par les plantes (Gouin, 1974). Le processus est la somme de deux phénomènes agissant en sens opposé, la minéralisation et l'immobilisation, l'importance de chacun étant déterminée par le rapport carbone/azote du sol (Follett, 1989). La minéralisation est la transformation de l'azote organique à la forme inorganique (NH₄⁺) par des bactéries aérobies. Les ions ammonium ainsi produits sont nitrifiés, prélevés par les plantes, adsorbés ou fixés aux particules de sol, ou immobilisés. L'immobilisation est la transformation de l'azote inorganique (principalement sous la forme d'ammonium, mais parfois sous la forme de nitrates) à la forme organique par les bactéries aérobies. L'azote organique ainsi produit se minéralisera à nouveau éventuellement. La quantité d'azote minéralisée excède généralement celle qui est immobilisée (Stevenson, 1982); pour cette raison, le terme minéralisation nette est souvent utilisé pour représenter l'action conjointe des deux processus. Les conditions optimales pour la minéralisation nette sont une température

entre 30 et 40°C (Gouin, 1974), des teneurs en eau moyennes permettant une bonne aération, un rapport carbone/azote faible et un sol de pH neutre (Haynes, 1986).

6.2.2 Adsorption et fixation de NH₄⁺

De par leur charge positive, les ions ammonium peuvent s'adsorber à la matière organique du sol et aux argiles, ce qui réduit leur mobilité. L'adsorption est un échange dynamique entre la matrice du sol et l'eau contenant l'ammonium en solution : les ions adsorbés redeviennent disponibles pour le prélèvement par les plantes et la nitrification par désorption. Les ions NH₄⁺ peuvent aussi se fixer de façon plus permanente entre les feuillets d'argile. L'adsorption et la fixation augmentent avec la teneur en matière organique et en argile du sol, avec la baisse du pH et avec l'assèchement du sol (Haynes, 1986).

Dans le sol l'azote (N) est essentiellement sous forme organique, dans les sols riches en argiles capables de fixer l'ammonium, environ 90 % de l'azote du sol est contenu dans les structures organiques, sous forme d'ammonium (NH₄⁺) fixé et 1 à 3 % peut se trouver sous forme inorganique (Baldock et Nelson, 2000).

6.2.3 Processus de nitrification

La nitrification est définie comme le processus microbiologique par lequel l'ammonium (NH₄⁺) est oxydé en nitrite (NO₂⁻) puis en nitrate (NO₃⁻). C'est une étape clé du cycle de l'azote dans les écosystèmes, puisqu'elle participe à la nutrition des plantes (dépendante de la forme de l'azote) et aux pertes d'azote en permettant la dénitrification et le lessivage du nitrate.

6.2.4 Les bactéries nitrifiantes

6.2.4.1 Taxonomie et phylogénie

Les réactions de la nitrification sont principalement réalisées par deux groupes de bactéries appartenant à la famille des *Nitrobacteriaceae*. Le premier groupe, oxydant l'ammonium en nitrite (nitritation), inclut par exemple le genre *Nitrosomonas*. Le second groupe, oxydant le nitrite en nitrate (nitratisation), inclut par exemple le genre *Nitrobacter*.

Il s'agit de bactéries Gram négatives, de petite taille, à mobilité variable et appartenant à la famille des *Nitrobacteriaceae*. (Tableau)

Tableau 4 : La famille des *Nitrobacteriaceae* (d'après Watson et al, 1989, Koops et al, 1991, Sorokin et al, 1998).

Types d'oxydation	Genre	Espèces
<p>Nitrification NH₄⁺ → NO₂⁻</p>	<p><i>Nitrosomonas</i></p> <p><i>Nitrococcus</i></p> <p>Nitrospira</p>	<p><i>N.aestuarii</i> <i>N.communis</i> <i>N.halophila</i> <i>N.ureae</i> <i>N.nitrosa</i> <i>N.oligotropha</i></p> <p><i>N.mobilis</i> <i>N.nitrosus</i> <i>N.oceanus</i></p> <p>N.briensis</p>
<p>Nitrification NO₂⁻ → NO₃⁻</p>	<p><i>Nitrobacter</i></p> <p><i>Nitrococcus</i></p> <p><i>Nnitrospira</i></p> <p><i>Nitrospina</i></p>	<p><i>N.alkalicus</i> <i>N.vulgaris</i> <i>N.mobilis</i></p> <p><i>N.marina</i> <i>Ngracilis</i></p>

La diversité des genres et espèce de bactéries oxydant l'ammonium est actuellement reconnue, mais celles oxydant le nitrite ont reçu moins d'attention et peu d'études par analyse de séquences génétiques existent (Degrange, 1996). Toute bactéries nitrifiantes sont membres des *Protéobactéries*.

6.2.4.2. Physiologie et métabolismes

Les bactéries nitrifiantes tirent leur énergie de l'oxydation du NH_4^+ ou du NO_2^- et utilisent le CO_2 comme source de carbone. Cette réaction s'effectue en aérobose avec O_2 comme accepteur final d'électron, et l'énergie issue des oxydations est produite sous forme d'ATP permettant la réduction du CO_2 via de Calvin.

La nitrification par *Nitrosomonas* est équilibrée.

Il faut noter que du N_2O est produit pendant la réaction, ce qui peut

Mener à des gazes d'azote pour l'écosystème. (Haynes et Sherlock, 1986).

La nitrification par *Nitrobacter* est équilibrée.

De nouvelles considérations sont cependant en compte en ce qui concerne l'activité métabolique des bactéries nitrifiantes : il est maintenant acquis que ces microorganismes sont capable d'utiliser le carbone organique pour leur croissance en culture pure, en conditions de mixotrophie (carbone organique et substrat azoté), ou même d'hétérotrophie (carbone organique seul).

Il semble même que certaines bactéries nitrifiantes soient capables de survivre et de se multiplier dans les sols sans oxyder le nitrite, en utilisant le carbone organique présent. La nitrification ne peut donc plus être considérée, comme une fonction obligatoire pour la croissance des microorganismes qui sont responsables. (Bock et al, 1983).

6.2.5. Les rhizobia :

Sont des bactéries du sol et de la rhizosphère capables d'établir des symbioses fixatrices d'azote avec des légumineuses et de favoriser leur croissance dans les sols pauvres en azote. Ainsi, les *rhizobia* sont utilisés comme engrais biologiques et en tant qu'incluant dans l'agriculture depuis plus d'un siècle. *Rhizobium* désigne les bactéries fixatrices d'azote, symbiotes des légumineuses, alors que « *Rhizobium* » est un genre bactérien.

6.2.5.1. La symbiose rhizobium-légumineuses :

Présent à l'état saprophytique dans la rhizosphère, les *rhizobia* répondent à un chimiotactisme positif induit par l'exsudat racinaire de la légumineuse. Ils sont ainsi attirés par des acides organiques, des enzymes, des ions inorganiques mais également des acides aminés, des

sucres, des acides dicarboxyliques de la rhizosphère, mais également par des composés plus *spécifiques tels certains flavonoïdes présents en faible concentration dans les exsudats racinaires* des légumineuses. (Dorka and phillips, 2002).

Le catabolisme de ces substrats conduit à une prolifération des *rhizobia* au niveau racinaire de la plante et à un dialogue moléculaire entre la bactérie et la plante –hôte. Les flavonoïdes excrétés par la plante sont reconnus spécifiquement par des protéines régulatrices bactériennes. (Oldroyd, 2008).

6.2.5.2. Spécificité de la symbiose :

La spécificité d'hôte est une des caractéristiques majeures de la symbiose rhizobium-légumineuse. Chaque espèce bactérienne possède un spectre d'hôte bien défini dont l'amplitude est très variable. Certaines souches bactériennes ont un spectre d'hôte très large, comme la souche d'*Ensifer sp*, capable de s'associer à diverses légumineuses tropicales. L'inverse, le spectre d'hôte est étroit chez *Sinorhizobium mililoti* qui ne s'associe qu'aux espèces végétales des genres *Medicago*, *Melilotus*, *Trigonella*, ainsi que chez *Mesorhizobium huakuii*. La spécificité est très forte pour le partenaire bactérien *Azorhizobium caulinodans* qui s'associe à *Sesbania rostrata*. Alors que certaines espèces ont un spectre d'hôte étroit, par rapport à des rhizobia à large spectre d'hôte. Certaines légumineuses dites à large spectre d'hôte acceptent plusieurs plusieurs espèces de rhizobia, comme *Vigna unguiculata*, *Phaseolus vulgaris*, *Glycine*. D'autres espèces comme *Galega orientalis* et *Galega officinalis*, ne forment des nodosités qu'avec l'espèce *Rhizobium galegae*.(Doyle and Luckow,2003).

6.2.6 Prélèvement par les plantes :

Le prélèvement est la transformation de l'azote inorganique en azote organique par les plantes : pour leur croissance, les plantes prélèvent l'azote inorganique (NH_4^+ et NO_3^-) du sol entourant les racines. L'ion NH_4^+ est le plus facile à assimiler par les plantes à cause de la forme réduite de l'azote (Paul et Clark, 1988), mais est généralement peu disponible à cause de sa grande adsorption et de sa fixation. Pour satisfaire la demande des plantes, les ions nitrates sont donc prélevés dans une plus grande proportion que les ions ammonium. L'ampleur du processus varie selon la culture, le type de fertilisant employé, le type de sol et le climat (Stevenson, 1982).

6.2.7. Description du cycle de l'azote :

Le cycle de l'azote est un cycle biogéochimique qui décrit la succession des modifications subies par les différentes formes de l'azote neutre en formes relatives comme le diazote, le nitrate, l'ammoniac et l'azote organique. La quasi-totalité de l'azote dans le sol existe dans les molécules organiques, principalement dans les protéines. Le processus de décomposition microbienne hydrolyse les protéines en acides aminés. Dans un processus appelé désamination, les groupes amines des acides aminés sont éliminés et transformés en ammoniac (NH_3). Ce dégagement d'ammoniac est appelé ammonification. Un autre processus contribuant à la production de NH_3 est la réduction du nitrate (NO_3^-) par les voies respiratoires, appelée réduction dissimilative de nitrate en ammoniac. Cette réduction dissimilative de nitrate en ammoniac est dominante dans la réduction des nitrates et des nitrites (NO_2^-) dans les milieux anoxiques riches en réducteurs, tels que les sédiments marins organiques et les voies gastro-intestinales de l'homme. Une grande partie de l'ammonium (NH_4^+) libéré par la décomposition aérobie de l'azote dans les sols est recyclée rapidement et convertie en acides aminés chez les plantes et les microorganismes. L'oxydation de l'ammoniac en nitrate est la nitrification, qui est un important processus dans les sols bien aérés et bien drainés avec un pH neutre. L'azote recyclé sur la terre est le plus souvent déjà « fixé », c'est-à-dire combiné avec d'autres éléments, tels que dans l'ammoniac (NH_3) ou dans les nitrates (NO_3^-).

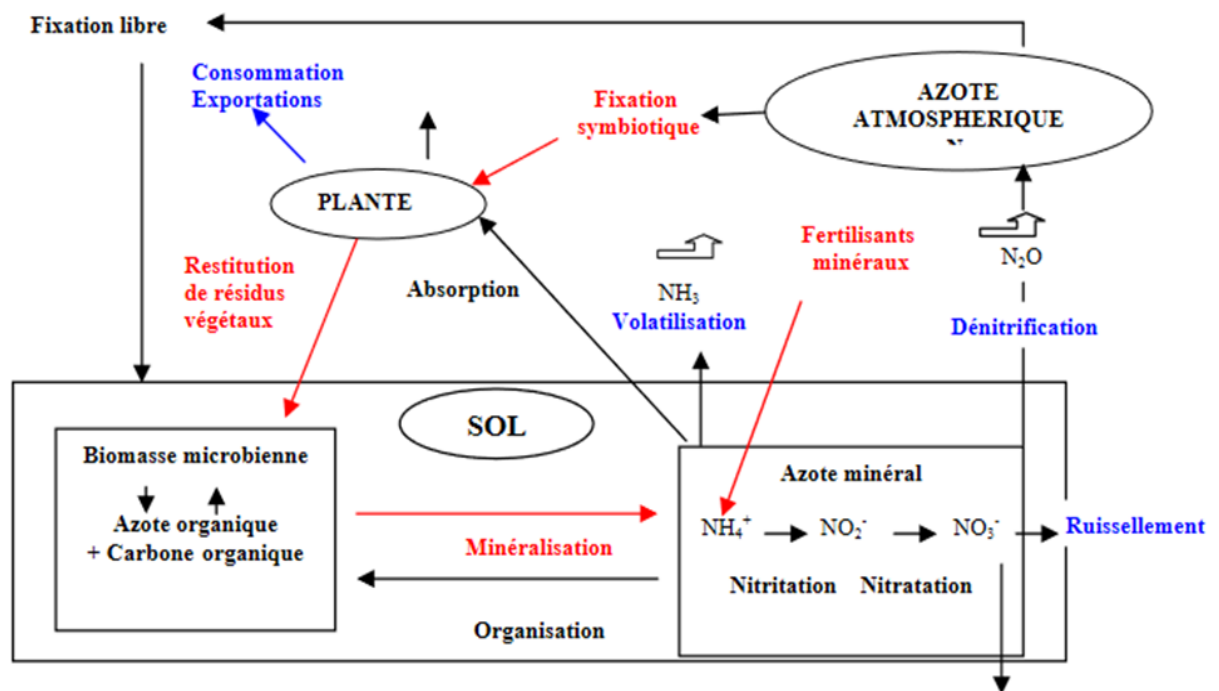


Figure3 : Cycle de l'azote (Stevenson, 1982).

7) Cycle de phosphore : Le phosphore dans le sol :

Le phosphore est l'un des éléments majeurs responsables à la croissance des plantes leur insuffisance peut provoquer un déséquilibre de développement des végétaux et un chute ou un blocage de rendement donc le contrôle de richesse du sol en cet élément est important pour assurer une rentabilité des cultures.

Le phosphore est l'élément le plus anciennement connu. Il se présente dans le sol soit à l'état minéral ou organique, ces deux derniers constituent ensemble le phosphore total dont seulement une partie de lequel est assimilable par les plantes.

7.1) Le phosphore total :

Il correspond à la quantité totale que renferme le sol et qui existe sous la forme minérale ou organique. La quantité de phosphore présente dans un sol est donc la conséquence directe de la richesse de la roche mère (PEREDACAMPOS, 2008). Les sols dérivant des roches ignées sont plus riches en phosphore totale que les roches issues des roches sédimentaires (DUTHIL, 1973).

A l'état naturel, les sols contiennent de un à trois tonnes de phosphore par hectare dans les premiers 20 centimètres (BEAUDIN et al, 2008).

Dans les sols dérivés de roches sédimentaires, ces teneurs, sont, en moyenne, comprise entre 0,3 et 1 ‰, dans les roches dérivées des roches cristallines ou volcaniques, elles sont beaucoup plus importantes et varient entre 1 et 4 ‰ (SCHVARTZ et al, 2005). Mais la connaissance de cette quantité ne donne qu'une indication très imparfaite sur l'aptitude du sol à fournir du phosphore aux végétaux et à satisfaire leurs exigences (PEREDACAMPOS, 2008).

7.1.1) Le phosphore minéral :

Le phosphore minérale se trouve essentiellement sous forme de composés ortho phosphates. Il se trouve souvent lié avec le fer, le calcium et l'aluminium (MASMOUDI, 1998).

Le phosphore minéral généralement plus abondant que le phosphore organique (GACHON, 1969). C'est le phosphore inclus dans des minéraux comme les apatites, dans tous les

composés d'oxyde-hydroxydes de fer et d'aluminium, ainsi que dans les phosphates tricalciques associés à un calcaire actif (très insolubles dans les milieux calcaires) (SCHEINER, 2005).

Le phosphore inorganique contient 170 formes minérales dans le sol (HOLFORD, 1997), il ajoute que dans la majorité des sols altérés les apatites sont les minéraux dominants sous la forme chimique générale $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{X}_2$ où le X exprime des anions comme le F-, Cl-, OH- ou CO_3^{--} .

7.1.2) Phosphore organique :

Le phosphate organique est présent comme phosphates d'inositol, phospholipides, acides nucléiques et divers autres esters de phosphate qui sont issus de la dégradation de la matière organique et ils sont souvent immobilisés par sorption et fixation aux colloïdes du sol (MARSCHNER, 1995 in PEREDA CAMPOS, 2008).

Dans les sols cultivés de longue date, sa proportion varie entre 25 et 30 % du phosphore total, tandis que dans les zones dotées d'une couverture végétale permanente naturelle (forêts et prairies), elle oscille entre 75 et 80% (FARDEAU et CONESA, 1994 in SCHEINER, 2005). Le phosphore organique n'est pas à priori assimilable par les plantes, il est capable d'être utilisable par les cultures grâce à l'action des micro-organismes responsable de la minéralisation de l'humus. ELIARD (1979), estime que le phosphore organique peut contribuer pour une part importante à l'alimentation de la plante (jusqu'à 30 % dans certains cas).

7.2) Le phosphore assimilable :

Appelé aussi « réserve assimilable » ou « fraction labile », c'est le phosphore susceptible d'être absorbé par les racines (BAIZE, 2000).

D'après GACHON (1977), les réserves assimilables du sol susceptible d'approvisionner les racines des végétaux en phosphore et de participer ainsi à l'alimentation des cultures, constituent seulement une petite partie du phosphore présent dans le sol généralement 10 à 30 % du phosphore total. Les formes absorbées par la racine sont les ions phosphates dissous c'est-à-dire H_2PO_4^- et HPO_4^{2-} dont la proportion relative varie avec le pH du sol généralement. La solution des sols agricoles, qui est la principale source de phosphore pour les racines des plantes, contient 0,01 à 3,00 mg/l du phosphore (FROSSARD et al, 2000). Le rôle de la solution est donc majeur puisque sans solution il n'y aura pas de prélèvement

(MOREL et al, 2011).GERVY(1970), estime qu'un sol est considéré comme riche en phosphore assimilable lorsque sa teneur dépasse 0,3‰, moyennement riche quand cette dernière est comprise entre 0,15 ‰ et 0,3 ‰, et pauvre quand elle est inférieure à 0,15‰.

7.3) Le comportement de phosphore dans le sol :

Les différentes formes de phosphore dans le sol sont classées selon différents critères : la nature des composés phosphorés, le fractionnement chimique ou l'échange ionique. La nature des composés phosphorés permet de séparer le phosphore organique du phosphore inorganique (PEREDA CAMPOS, 2008).

7.3.1) Forme soluble dans la solution du sol :

Le phosphore de la solution du sol constitue moins de 1% du phosphore total, mais est la source principale de phosphore pour les végétaux(PEREDA CAMPOS, 2008).Selon MOREL (1996), C'est le phosphore dissout dans la solution du sol, forme ionisée de l'acide phosphorique $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} , PO_4^{3-} -dont les proportions relatives dépendent du pH du milieu concerné. Ces formes sont à l'origine de la nutrition phosphatée des cultures.

D'après ELIARD (1979), sa concentration est très faible : 0,2 à 0,5 mg/cela présente moins de 1 kg/ha dans la terre exploitée par les racines. La solution du sol dissout une faible quantité de phosphore à cause de la faible solubilité des composés phosphatés par le pH. Cependant il faut noter que la concentration de cette solution reste sensiblement constante de fait des échanges continus avec le phosphore adsorbé. En cas de prélèvement par les racines, ce sont les réserves du sol aisément échangeable qui libèrent des ions phosphoriques de façon à élever la teneur de la solution du sol jusqu'à son niveau initial (MASMOUDI, 1998).

7.3.2) Phosphore adsorbé ou facilement échangeable :

Ce sont les ions phosphoriques adsorbés sur le complexe adsorbant du sol ; ils participent aux échanges constants (sol-solution) et constituent l'essentiel du «pool alimentaire » des plantes (FARDEAU, 1991in MIHOUB, 2012).C'est l'ensemble des ions phosphoriques adsorbés sur les argiles, soit directement sur leurs surfaces ou par l'intermédiaire d'un cation (MASMOUDI, 1998).

Importance et rôles de phosphore dans la vie de végétal :

Le phosphore est un macronutriment important pour le végétal, présent environ 0,2% du poids sec d'une plante (DANIEL et al, 1988). Le phosphore se trouve dans tous les tissus de la

plante avec une concentration varie selon la partie de végétal. Cette variation de concentration due aux rôles physiologiques de ce dernier dans les processus fondamentaux de la vie des végétaux. La concentration en phosphore est la plus forte dans les organes les plus jeunes, notamment dans les méristèmes et le vieillissement d'un organe se traduit toujours par une baisse de la concentration en phosphore sous le double effet d'un processus de dilution par les métabolites bio synthétisés et des processus de transfert de métabolites phosphorés vers les organes de réserves, notamment vers les organes reproducteurs (GACHON, 1983).

Les concentrations de phosphore dans les tissus végétaux varient entre 0,1 et 0,5 % (VALE, 2010).

Le phosphore joue plusieurs rôles dans la vie des plantes, en particulier lors des stades de multiplication cellulaire. Les principaux rôles sont :

- Constituant de l'ATP : l'ATP fournit toute l'énergie nécessaire pour toutes les réactions de synthèse ; formation de protéines, hydrates de carbone, d'acides nucléiques et autres réactions exigeant de l'énergie (VALE, 2010).
- Le phosphore à un rôle de régulation ; il favorise la fécondation, la mise à fruit et la maturité des fruits (GROS, 1979).
- Composant structurel des acides nucléiques (supports du patrimoine génétique) : le phosphore est nécessaire pour la réplication et la transcription de l'ADN (VALE, 2010).
- Il contribue à la rigidité des tissus et favorise donc la résistance à l'averse (VALE, 2010).
- Il a été montré que le phosphore améliore la réponse de plusieurs cultures à la fertilisation azotée, surtout les céréales. Pour que les plantes utilisent le supplément d'azote (par exemple pour la synthèse des protéines ou de la chlorophylle), elles ont besoin de plus de phosphore pour fournir l'ATP nécessaire (MOUGHLI, 2000).
- Il permet une augmentation de la résistance au froid et aux maladies (VALE, 2010).
- Il a également été montré que le phosphore améliore la réponse de plusieurs cultures à la fertilisation azotée, surtout les céréales (GROS, 1979 ; VALE, 2010).
- Il agit dans plusieurs activités biochimiques : respiration, métabolisme glucidique, synthèse des protéines, il est indispensable à la photosynthèse et aux processus chimico-physiologiques de la plante (LAMBERT, 1979).

- Le poids du grain et la composante du rendement la plus influencée par un apport de phosphore (MASMOUDI, 1998)

7.4. Description du cycle du phosphore :

Le phosphore entre dans les systèmes biologiques par les processus naturels d'érosion. Ce phosphore est absorbé par les plantes qui le transforment en phosphate organique. Il transporte l'énergie dans la plante et favorise sa croissance générale, notamment du système racinaire et des tiges. Ces phosphates organiques entrent dans les cycles de la matière par les chaînes alimentaires et de décomposition. En milieu marin, le phosphore accède aux chaînes alimentaires marines par l'intermédiaire du plancton et des poissons qui en ont besoin pour construire leur squelette. Une partie du phosphore insérée dans la matière par les chaînes alimentaires, retourne aux sols à travers les déjections et les restes animaux et les végétaux à la fin de leur vie. L'autre partie se dépose au fond des océans sous forme d'organismes morts ou de particules et est intégrée aux sédiments. Ces derniers sont transformés au cours du temps en roches sédimentaires. Les roches sont ensuite ramenées à la surface par les mouvements tectoniques et le cycle recommence.

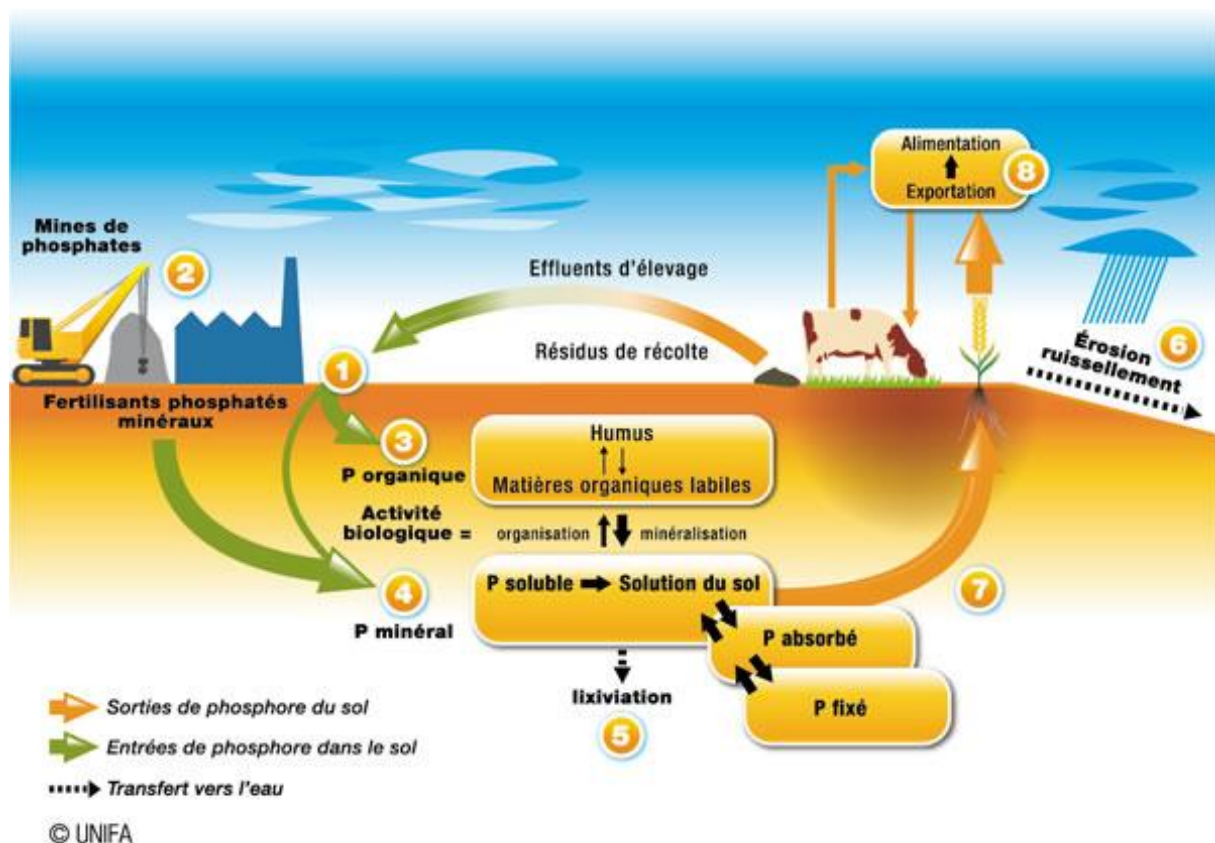


Figure 4 : Cycle de phosphore (PEREDACAMPOS, 2008).

8) Influences des microorganismes sur les cycles du carbone, de l'azote et du phosphore :

8.1. Le rôle des microorganismes dans le cycle du carbone :

Les organismes autotrophes jouent un rôle essentiel pour la vie sur terre en réduisant le dioxyde de carbone pour former de la matière organique. Cela se produit à la suite de la photosynthèse, la première étape du cycle de carbone dans lequel les photo-autotrophes tels que les cyanobactéries, les plantes vertes, les algues et les bactéries sulfureuses vertes et pourpres incorporent le dioxyde de carbone dans la matière organique à partir d'énergie solaire. Il y a deux groupes d'organismes phototrophes : les plantes et les microorganismes. Les plantes sont des organismes phototrophes dominants des milieux terrestres, tandis que les microorganismes phototrophes dominent les milieux aquatiques. Les phototrophes et chimio-lithotrophes anaérobies produisent également des composés organiques en excès, mais dans la plupart des environnements, les contributions de ces organismes à l'accumulation de matière organique sont insignifiantes par rapport à celles des phototrophes aérobies. Les composés organiques sont dégradés biologiquement en méthane et en dioxyde de carbone.

8.2. Le rôle des microorganismes dans le cycle de l'azote :

Les activités métaboliques des microorganismes ont un impact important dans la conversion de l'azote en des formes utilisables par les plantes. Les bactéries réduisent les nitrates principalement par la réduction dissimilative de nitrate en ammoniac. De nombreuses espèces de bactéries notamment les bactéries nitrifiantes autotrophes, appartenant aux genres *Nitrosomonas* et *Nitrobacter* et au moins une espèce de *Archaea* assurent le processus de transformation de l'azote organique en azote minérale dans le sol. L'ammoniac peut être oxydé dans des conditions anoxiques par la bactérie *Brocadia* dans un processus appelé Anammox (oxydation de l'ammoniac anoxique). Dans cette réaction, l'oxydation anaérobie de l'ammonium est couplée avec la réduction des nitrites, formant ainsi l'azote gazeux qui est libéré dans l'atmosphère. Toutefois, seul un nombre relativement faible de procaryotes sont capables d'utiliser l'azote atmosphérique comme source d'azote cellulaire par la fixation. Parmi les bactéries libres qui peuvent fixer l'azote atmosphérique se trouve des espèces aérobies telles qu'*Azotobacter*, *Beijerinckia* et certaines espèces anaérobies de *Clostridium*. Il

existe aussi de nombreuses espèces aérobies de cyanobactéries photosynthétiques qui fixent aussi l'azote atmosphérique.

8.3. Le rôle des microorganismes dans le cycle du phosphore :

Les bactéries capables de rendre soluble du phosphore inorganique sont des bactéries des genres *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Burkholderia*, *Micrococcus*, *Flavobacterium*, etc. Ces bactéries sont capables de libérer le phosphore inorganique combiné aux minéraux dans le sol. Cette réaction se fait grâce à la production d'acides organiques par les bactéries. D'autres types de bactéries peuvent agir sur la mise à disposition du phosphore organique majoritairement immobilisé sous forme de phytates. Des bactéries comme *Rhizobium*, *Enterobacter*, *Serratia*, *Citrobacter*, *Proteus*, *Klebsiella*, *Pseudomonas*, et *Bacillus* sont capables de produire des enzymes appelées *phytases*. Ces enzymes libèrent les ions phosphates à partir des phytates les rendant ainsi disponibles aux plantes. En conclusion, la microfaune qui comprend des collemboles, des acariens et des nématodes, ainsi que les protozoaires, animaux unicellulaires grands prédateurs de bactéries, assurent de nombreuses fonctions de décomposition de la matière organique, de régulation des populations microbiennes pathogènes des plantes. Les champignons sont capables de dégrader les lignines qui sont des polymères à longue chaîne liés par des fonctions phénols et constituants du bois. Par ailleurs, ils assurent la production d'hyphes qui sont de longs filaments microscopiques, et de substances colloïdales, participent à la stabilisation des agrégats. Les bactéries dégradent les matières organiques fraîches et les minéralisent. C'est pourquoi elles ont un rôle essentiel dans le recyclage de certains éléments nutritifs notamment l'azote, le phosphore et le soufre liés aux composés organiques afin de les remettre sous leur forme minérale utilisable par les plantes. Les microorganismes du sol contribuent notamment à broyer le sol, à réduire et à décomposer les résidus organiques. Ils contribuent également à associer la matière organique à l'argile, favorisant la circulation de l'eau et de l'air. Les microorganismes du sol participent donc aux cycles biogéochimiques des éléments minéraux dans le sol.

9. Risque biologique et biodépollution des sols

Un site pollué est défini, selon le ministère en charge de l'écologie comme un site qui, du fait d'anciens dépôts de déchets ou d'infiltration de substance polluante, présente une pollution susceptible de provoquer une nuisance ou un risque pérenne pour les personnes ou l'environnement. Ces

situations sont souvent dues à d'anciennes pratiques sommaires d'élimination des déchets, mais aussi à des fuites ou à des épandages de produits chimiques, accidentels ou pas.

En 2010 les sols pollués ont été essentiellement réhabilités en confinant les terres in situ ou en stockant les terres en tant que déchet inerte. Ces solutions sont choisies en l'absence de technique efficace pour dégrader le polluant ou pour des raisons logistiques lorsque le site est encore en activité.

9.1. Les techniques de biodépollution des sols

Les traitements biologiques font appel aux capacités naturelles des microorganismes à dégrader certains polluants comme :

Les hydrocarbures pétroliers, et aromatiques, l'alcool, glycols, cétones....

Les techniques de biodépollution se basent sur le fait que les microorganismes qui se développent dans un sol pollué y trouvent des conditions favorables et se nourrissent du polluant présent qui est alors dégradé. L'organisme vivant utilisé peut être un microorganisme (Bactérie ou Champignon), un végétal champignon et d'une algue, voir un animal (lombric, vers de terre). Cet organisme vivant agit sur la composé polluant par absorption, accumulation, digestion transformation, dégradation, évapotranspiration, etc, pour le rendre moins toxique, l'extraire, l'immobiliser ou le diluer considérablement. (INRS. Hygiène et sécurité du travail- 1^{er} trimestre 2013-230).

Conclusion :

La dégradation des sols est l'un des problèmes majeurs auxquels est confrontée l'agriculture à travers le monde, en général, et en Algérie en particulier.

La fertilité des sols est une notion importante dans les domaines de l'agriculture désignant l'aptitude d'un sol à produire dans les conditions actuelles de culture. Elle est une des composantes de la qualité des sols.

La matière organique est un élément clé de la fertilité des sols à travers la disponibilité des éléments minéraux, mais aussi de la structuration des sols.

Le taux de matière organique est maintenu grâce aux divers amendements du sol. Les relations physiques entre un amendement organique, le sol et sa microflore nous permettent de mieux comprendre comment ces amendements peuvent aider à la formation et à la stabilisation d'agrégats de sol et lutter contre sa dégradation.

Référence Bibliographique

Atlas et Bartha 1992. Définition du sol. Hydrocarbon biodegradation and oil-spill bioremediation.

Auclerc. 2012. Apparence, structure et cycle biologique. Thèse de doctorat.

Baize. 2000. Le phosphore assimilable. Courrier de l'environnement de l'INRA n° 39.

Baldock et skjenstad.2000. Le réservoir stable. Role of the Soil Matrix and Minerals in protecting Natural Organic Materials.

Baldock et skjenstad.2000. Cycle biogéochimique du carbone organique. Role of the Soil Matrix and Minerals in protecting Natural Organic Materials.

Berdock et Nelson.2000. Adsorption et fixation de NH₄⁺. Hand Book, Soil Science.

Bock et Deken. 1983. Phylogénie et métabolisme.

Bonneau et Souchier. 1994. Académie des sciences, 1998.Influence des microorganismes.

Bousseboua .2005.Microflore du sol. Constantine : Ed. Campus-Club, DL **2005**, cop. **2005**. Edition/Format: Print book : French.

Bresson et Boiffin.1990. Mécanismes de désagrégation du sol et test de stabilité structurale.

Bowles.Acosta-Martinez. Calderon. Jackson. 2014. Soil enzyme activities, microbial communities, and carbon and nitrogen availability in organic agro ecosystems across an intensively-managed agricultural landscape.

Calvet et al. 2015 Shibu et al. 2006 .Les différents réservoir du carbone organique du sol et les processus de stabilisation du carbone organique. BIOC

Calvet et al.2015. Van-Camp et al 2004. Matière vivante = organismes du sol.

Calvet R. 2000. Introduction. Pour et contre Saussure : vers une linguistique sociale ... point de vue de l'écologie linguistique », Études créoles, **2000**, XXIII, 1 : 47-60.

Chenu et Stotzky.2002. Lutzouvetal.2006.La stabilisation physico-chimique. Metalmicrobe interaction in soils or sediments is interesting since microbes also directly interact with soil particles

Coyent et Gorman.2010. Apparence, structure et cycles biologique. Annals of Behavioral Medicine, Volume 39, Issue 1, February **2010**, Pages 16–26, <https://doi.org/10.1007/s12160-009-9154-z>.

Coyne et al. 2010. Symptômes sur les parties aériennes. Annals of Behavioral Medicine, Volume 39, Issue 1, February **2010**, Pages 16–26, <https://doi.org/10.1007/s12160-009-9154-z>.

Daniel.1988.Fauder.1991.Mihoub.2012. Phosphore adsorbé ou facilement échangeable. 70-78 Revue des BioRessources Vol 2 N 2.

Davet. 2003. Les protozoaires. L'activité biologique de ces organismes est liée à la quantité de matière vivante présente dans le sol.

Degrange.1996. Les bactéries nitrifiantes. Des biomatériaux aux tissus dentaires calcifiés. Par Michel **Degrange** sous la direction de Directeur de thèse inconnu - Paris 5 ... Soutenue en **1996**.

Demargues et Mangeot. 1970. Les levures et les algues. - Cité 15 fois — Volume 2, Issue 1, March **1970**, Pages 47-53. Soil Biology.

Dorka and phillips.2002. La symbiose rhizobium-légumineuse.

Duthil.1973 et Beaudin et al .2008 et Schvariz et al .2005. Cycle de phosphore. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, **2008** ... scénarios d'interventions agroenvironnementales .

Eliard.1979. Forme soluble dans la solution du sol. Manuel d'agriculture générale: base de la production végétale.

Ensign.1993. Les actinomycètes. Thèse de doctorat.

FAO et ITPS.2015. Fertilité du sol et production alimentaire. Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. ... The Food and Agriculture Organization of the United Nations

Fickers.2008. Classification dans le domaine agronomique. Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. ... The Food and Agriculture Organization of the United Nations

Follet 1989. Minéralisation et immobilisation. Livre de Ken **Follett**

Gobat et al. 1998. Peres. 2003. Mégafaune. Thèse de doctorat.

Gobat.2003. Fraction minérale. Thèse de doctorat.

Gobat et al. 1998. Martins et al, 2015. Microfaune. Thèse de doctorat.

Golchine et al 1994. Puget et al.1995.Six et al. 2000. Modèle de mise en place de l'agrégat et de la stabilité structurale en interaction avec les matières organiques apportées au cours de leur décomposition.

Googfellow et Williams. 1983. Classification dans la nature. Cité 1000 fois — 37:189-216 (Volume publication date October **1983**) <https://doi.org/10.1146/annurev.mi.37.100183.001201>. M. **Goodfellow** and S. T. **Williams**.

Gouin.1974. Transformation interne. L'influence de l'inondation d'un sol sur les bactéries telluriques actives dans le cycle de l'azote.

Guckert et al 1975. Modèles de mise en place de l'agrégat et de la stabilité structurale en interaction avec les matières organiques apportées au cours de leur décomposition

Haynes.1986. Adsorption et fixation de NH_4^+ . Noté /5. Retrouvez Environment and Human Performance.

Heyns et Sherlock.1986. Phylogénie et métabolisme.

Huang.Wang.Huz.2014. Change of soil microbial biomass carbon and community composition through mixing nitrogen-fixing species with eucalyptus urophilla in subtropical china.

Institut national de la protection des végétaux. 2001. Symptôme d'attaque des nématodes.

INS.Hygiène et sécurité du travail.-1^{er} trimestre 2013-230. Risque biologique et biodépollution des sols.

Jans et Dethier.2005.Collemboles. Thèse de doctorat.

Jerome .2004. Fraction organique.

La France agricole. 1er édition. 2021 Aout 2003. La phase gazeuse.

La France agricole. 1er édition 21 aout 2003. Les caractéristiques générales des phases des sols. La phase solide.

Ladd et al 1993. Abiven et al. Soumis. Les caractéristiques du sol. iv/ la qualité intrinsèque10 de la matière organique apportée.

Larochelle 2004. Les nématodes. Thèse de doctorat.

Le Bissonais. 1996. La matière organique. European Journal of soil science 47 (4), 425-437, **1996.** 1573, **1996.** Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability.

Lehmann et Kleber. 2015. Evolution du modèle conceptuel de la dynamique du carbone organique.

Linder et Hohn. 2011. Bachelier. 1979. Pérès et al. 2010. Les acariens

Marschiner 1995 Pereda Campos. 2008. Le phosphore organique. La matière organique (**Marschner, 1995 ; Pereda Campos, 2008**). 2.3. Dynamique du phosphore dans le sol.

Masmoudi.1998. Le phosphore interne. Thèse de doctorat en ? Sous la direction de Jaime Aguirre-Puente. Soutenue en **1998**.

Nadama. 2006. Rôle biologique des nématodes.pdf, 2352k, v. 1, May 15,

Nadma. 2006. Machado et al .2009.Macrofaune. , **Machado et al 2009**.pdf. View Download, 2352k, v. 1, May 15.

Nadma.2006.Mésafaune. Thèse de doctorat.

Noumer. 2008. Les champignons. Bulletin de psychologie **2008/5** (Numéro 497). Pages : 92; Éditeur : Groupe d'études de psychologie ·

Oldroyd Luckow.2003. Spécificité de la symbiose. Crop Sci. 25, pp 497-501. Giles E.D., **Oldroyd.**, Dawnin J.A., 2004.

68 pages.

Parr et papendick.1978. Modalités de la décomposition des matières organiques apportés.

Paul et clarrk.1988.Le cycle de l'azote.

Pelosi. 2008. Mésofaune. Céline Pelosi, Michel Bertrand, Jean Roger-Estrade ... Earthworms represent a large proportion of soil organism

Pelosi. 2008. Symptômes sur des parties souterraines. . Céline Pelosi, Michel Bertrand, Jean Roger-Estrade ... Earthworms represent a large proportion of soil organism

Pelosi. 2008. Impact de la mésofaune sur les agrosystèmes. . Céline Pelosi, Michel Bertrand, Jean Roger-Estrade ... Earthworms represent a large proportion of soil organism

Perda.2008.Le comportement de phosphore dans le sol. Peraturan Daerah Kabupaten Rembang Nomor 10 Tahun **2008** tentang Perubahan Atas Peraturan

Perda campos.2008 et Duthil .1973. Prélèvement par les plantes.

Pérès. 2010.Les nématodes.

Prescott. 2010 . Description de cycle de carbone. Laboratoire de Microbiologie Appliqué à l'Agro-alimentaire au Biomédical ... Tableau 1: Types de paroi chez les actinomycètes (**Prescott & al, 2010**).

Prescott.2002. Les influences des microorganismes sur le cycle de carbone, de l'azote, et du phosphore dans le sol.

Ranjard. 2013. Organismes vivants du sol.

Rapport. 1985. Rôle de la qualité du sol dans le fonctionnement des écosystèmes.

Shibu et al.2006. Stevenson .1994.Matière vivante =organismes du sol.

Six et al .2002 . stevenson.1994.Matière organique morte.

Sposito. 1989. La phase liquide. The Chemistry of Soils. xiii + 277 pp. Price £25.00 (hard covers). New York, Oxford: Oxford University Press. ISBN 0 19 504615 3. - Volume 127 .

Stevenson.1982. Fixation biologique

Tisdall et Oades. 1982. Elliot. 1986. Camardella. Et Elliot. 1993. Puget et al. 1995. Rôle des microorganismes du sol sur la formation et la stabilisation des agrégats.

Torora et al .2010. Mardigan et al.2012. Description de cycle de carbone

Vitousek. 1991. Les bactéries. Nitrogen limitation on land and in the sea : How can it occur? Biogéochimistry.

Waston et al.1989.Koops et al .1991. sorokin et al 1998. Les bactéries nitrifiantes.

Table des Matières
