N° d'ordre :

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES



Présenté pour l'obtention du diplôme de Master académique

En : Sciences de la nature et de la vie

Spécialité:Microbiologie appliquée

Par :

-AYADAT Ahlam
-ALILICHE Nesrine
- TOUATI Nourhane

THEME :

Analyse du fonctionnement microbien de *Paenibacillus polymyxa* des processus de compostage de matière organique dans les sols Algériens

Soutenu publiquement le : 24 / 06 / 2020,devant le jury composé de :

Mr BENHFRI N	MAA	Al'U.Y.F.M	Président.
MrCHAMI B	MAA	A l'U.Y.F.M	Promoteur
MrAINAS M	McB	A l'U.Y.F.M	Examinateur
MrKAABOOB L	MAB	A l'U.Y.F.M	Examinateur.

Année universitaire : 2019-2020

Résumé :

Dans un contexte où les politiques environnementales tendent à favoriser le recyclage et la gestion des déchets organiques devient un enjeu important. En Algérie, les millions de tonnes de déchets produits annuellement sont des déchets organiques fermentescibles. Selon leur niveau de qualité, ils peuvent être mis en décharge, être incinérés, ou encore retourner au sol. De nos jours, les traitements biologiques par compostage sont en fort développement, favorisés par le contexte réglementaire et sociologique actuel. En effet, l'objectif de notre travail est d'arriver à revaloriser 20 à 30% des déchets ménagers grâce à une technique microbiologique base sur l'utilisation de deux souches d'une bactérie tellurique ' *Paenibacillus polymyxa'* . Ainsi, le recyclage des déchets organiques par compostage devient une solution prometteuse. Cela permet aux nutriments de retourner dans le sol et rejette les problèmes liés à l'épandage direct des déchets sur les terres. Afin d'optimiser le processus de compostage, il est nécessaire de caractériser les différentes étapes se déroulant lors du compostage ainsi que l'évolution physico-chimique et microbiologique du compost. Les différents paramètres doivent être contrôlés et compris pour une amélioration du procédé. Enfin, lors de l'épandage des composts sur le sol, le compost doit être mature et stable pour ne pas créer de déséquilibres au niveau du sol et du développement des végétaux.

Mots clés :
Paenibacillus polymyxa ; Sols Algériens ;compostage ; matière organique.

Abstract :

In a context where environmental policies tend to favor recycling and management of organic waste becomes an important issue. In Algeria, millions of tonnes of waste produced annually are fermentable organic waste. Depending on their quality level, they can be landfilled, incinerated, or even returned to the ground. Nowadays, biological composting treatments are in strong development, favored by the current regulatory and sociological context. Indeed, the objective of our work is to manage to recycle 20 to 30% of household waste thanks to a microbiological technique based on the use of two strains of a telluric bacteria '*Paenibacillus polymyxa'*. Thus, recycling organic waste by composting becomes a promising solution. This allows nutrients to return to the soil and rejects the problems associated with the direct dumping of waste on land. In order to optimize the composting process, it is necessary to characterize the different stages taking place during composting as well as the physico-chemical and microbiological evolution of the compost. The various parameters must be controlled and understood for the improvement of the process. Finally, when spreading compost on the ground, the compost must be mature and stable so as not to create imbalances in the soil and the development of plants.

key words:
Paenibacillus polymyxa; Algerian soils, composting; organic material.

الملخص:

تميل السياسات البيئية إلى إعادة تدوير وإدارة النفايات العضوية التي اصبحت قضية مهمة في الجزائر, تعد ملايين الأطنان من النفايات المنتجة سنويًا نفايات عضوية قابلة للتخمر. اعتمادًا على مستوى جودتها، يمكن دفنها أو حرقها أو حتى إعادتها إلى الأرض. في الوقت الحاضر, معالجات التسميد البيولوجي في تطور هائل، بفضل السياق التنظيميوالاجتماعي الحالي. في الواقع ، الهدف من عملنا هو إعادة تدوير 20 إلى 30 ٪ من النفايات المنزلية بفضل تقنيةالميكروبيولوجية القائمة على استخدام سلالتين من البكتيريا *'Paenibacillus polymyxa'*,كذلك اعادة تدوير النفايات العضوية بالتسميد اصبح الحل هذاالمتوقع, هذا ما يسمح للعناصر الغذائية بالعودة إلى التربة ويمنع المشاكل المرتبطة بالتخلص المباشر من النفايات على الأرض .من أجل تحسين عملية التسميد ، من الضروري تحديد المراحل المختلفة التي تحدث أثناء التسميد وكذلك التطور الفيزيائي الكيميائي والميكروبيولوجي سماد,كذلك يجب تنمراقبة مختلف الاعدادات وفهمها من اجل تحسين العملية.وأخيرًا، عند نشر السماد على الأرض ، يجب أن يكون سماد ناضجًا ومستقرًا حتى لا يخلق اختلالات في التربة ونمو النباتات.

الكلمات المفتاحية
المادة العضوية , التربة الجزائرية, السماد,*paenibacillus polymyxa*



REMERCIEMENTS

Avant toute chose, Nous remercions ALLAH qui nous à aide et nous à donne la patience ,le courage et la volonté pour accomplir ce modeste travail durant ces longues années d'étude.

Nous remercions en premier lieu notre promoteur, Monsieur CHAMI Bouazza ,Merci pour votre patience, vos encouragements et vos conseils rédactionnels qui nous ont aidés à mener à bien ce travail

Nous tenons à remercier M^r^ BENHAFRI , M^r^ AINAS M et M^r^ KAABOUB L d'avoire accepté juger ce travail en tant qu'examinateurs de thèse.

Nous remercions aussi tous les membres d' ingénieurs de labortoire de l'université yahia fares de médéa ,leurs aides et leurs encouragements sans oublier les agréables moments vécus ensemble.

Nous remercions les employés de la bibliothèque centrale de l'université yahia fares de médéa pour leur compréhension et leur gentillesse.

Enfin, Nous remercions également toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, nous exprimons ici notre gratitude.

Dédicaces

Je remercie Dieu parce qui m'a accordé cette bénédiction et qui m'a donné la force et le courage pour mettre fin à ce thème malgré les dures conditions et le confinement
Je dédie cette thèse à :

Les personnes les plus précieuses dans mon cœur "mes parents"A qui Aucune dédicace, aucun mot ne pourrait exprimer à leur juste valeur la gratitude et l'amour que je vous porte.Dans leur regard, je lis la fierté qui me pousse à ambitionner encore

Mes très chères sœurs et mon frère;

Je vous remercie pour votre soutien continu. Je suis chanceuse de vous avoir à mes côtés. Je vous souhaite tout ce qu'il y a de meilleur.

Ma famille ... Merci pour vos encouragements et votre soutien, en particulier mon grand-père et ma grand-mère, pour vos prières pour moi

mes amis, mes collègues, et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à ma formation.et Surtout Abdel Malek pour m'aide à organiser ce travail ainsi que pour ses encouragements continus

Je vous aime!

Ahlam

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail:
À mon cher père, il n'y a aucune dédicace qui puisse exprimer l'amour,et le respect que j'ai toujours eu pour toi .cet humeble travail est le fruit de tous les sacrifices que j'ai consentis pour mon éducation et ma formation je t'aime papa et supplie Dieu de t'accorder une bonne santé .

À ma chère mère ; Tu représentes pour moi la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.
À mes chères sœurset leur maris : Fatima et Nacim , Chahira et Nabil ,Fatiha Abd el ghani et Amel ; Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour eux

À mes frères : Rachid et sa femme Meriem , Mohamed Sid Ali et Sid Ahmed merci pour vos encouragement permanents
À Mes neveux; Et mes nièces :Mouatez ,Malek,Tasnime Mohamed , Acheraf ,Abd el ali ,Abd el rahman et Amel

À mes amis : Amina , Yasmine, Baya,Noussaiba ,Sabah,Randa, Ahlam et Nourhane pour leur support continu

Je vous aime!

Nesrine

Dédicaces

Tout d'abord je remercie ALLAHde m' avoir accordé le courage, la patience, la santé pour réaliser et mener à bien ce travail.

Je dédie ce modeste travail :

À deux personnes les plus chères dans mon cœur ,ma raison de vivre : mes parents BACHIR et SALIHAqui m'ont donné la vie, et la source de tendresse, de fierté, de patience. Je vous aime.Que dieu vous garde pour moi.

À mon seul frère WATIK, mon bras droit, ma chère et fidèle sœur WIDAD et son mari AMER ,et ma chère cousine FARAH, qui sont là source de mon inspiration et de mon courage.

À mes chère neveux : SIRADJE et RAWAN.

À toute ma famille :TOUATI et KADIK .

À Dr. IMAD BAGHDADI, merci beaucoup pour vos encouragements et votre soutien continu.

À mes collègues Nesrine et Ahlamet mes copines : Romaissa, Malika, Fella, Noussaiba, Hayat, Wissam, Amina,Radhia, Lily, Nadjat, Meriem, Azhar,Houda, Rania, Asma, Selma, Abir, Soofi,Romi, Hidaya.Merci pour vos encouragements.

À tous ceux qui me connaissent et qui m'aiment de loin ou de près.

Je vous aime!

Nourhane

liste des figures

Liste des figures

Partie	Page

I. Généralités

1. Le sol

Figure 1 : Diversité pédologique et répartition des fiffétrents types des sols selon les étages climatique s en Algérie.	**7**
Figure 2 : : Classification triangulaire des sols fins (contenant moins de 30% d'éléments de diamètre supérieur à 2 mm).	**11**
Figure 3: Cycle biogéochimique du carbone le sol.	**24**
Figure 4 : Le complexe argilo-humique	**25**
Figure 5 : Les formes de l'eau dans le sol. Une vue schématique.	**26**
Figure 6 :Phénomènes d'érosion	**28**

2. Micro-organismes telluriques

Figure 7 : Une espèce de Bacilles saprophytes dans la matière organiquedu sol.	**29**
Figure 8 : Illustration schématique des trois principaux types de mycorhizes	**31**
Figure9 : Différentes parties de la rhizosphère.	**35**

3-La rhizobactérie *Paenibacillus polymyxa*

Figure 10 : Arbre phylogenetique des espèces de *P.polymyxa*	**37**
Figure 11 : Observations microscopiques (microscope électronique à balayage,microscope optique) et macroscopique de *P. polymyxa*.	**41**

II. Matériel et méthodes

Figure 12 : Echantillon du sol prélevé à partir de la parcelle étudié **Février -2020**	**47**
Figure 13 : Préparation de l'inoculum bactérien.	**51**
Figure 14 :préparation des milieux de culture	**53**
Figure 15: Protocole d'extraction des EPS des deux souches	**54**

Liste des figures

bactérienne.	
Figure 16 : Préparation du dispositif expérimentale en pots.	**55**

liste des tableaux

Liste des tableaux

Partie	Page

I. Généralités

Tableau I : Classification géologique des sols.	**8**
Tableau II : Nomenclature des types des sols	**9**
Tableau III : Composition chimique de l'humus	**16**
Tableau IV : Nouvelles espèces du genre *Paenibacillus* apparues de 2011 à 2017.	**38**
Tableau V : principales caractéristiques distinctives de quelques espèces du genre *Paenibacillus*.	**39**

II. Matériel et méthodes

Tableau VI : Critères des deux souches SGH1 et SGK2 destinées	**46**
Tableau VII : Dispositif expérimental représente le test *in vitro* de l'activité hydrolytique des deux souches bactériennes de *P. polymyxa*.	**53**
Tableau VIII : Dispositif expérimental représente l'agencement de l'essai en premier jour de l'inoculation du sol en pots (lab. de Biologie fac. Sciences).	**56**
Tableau IX: Condition météorologique de la station expérimentale durant 8 jours du moiss de Mars 20020 (lab université de Médéa).	**56**

sommaire

Sommaire

I.
Introduction..... 1

Synthèse bibliographique

II.
Généralités..... 4
1
Lesol .....41.
1-Microbiologie du sol "historique".....4
1.2-Diversité pédologique et répartition géographique des sols en Algérie.....4
a. Les sols des régions sahariennes 4
b. Les sols des régions semi arides 4
c. Les sols des régions telliennes humides.....5
d. Les sols azonaux (sols locaux) 6
1.3. Etude pédologique 7
1.3.1. La pédogenèse 7
1.3.2. Classification des sols.....8
1.3.3. Caractéristiques dusol.....10.
a. Propriétés physiques des sol.....10
a.1. Le sol se sépare (fractions du sol).....10
a.2. Structure du sol 10
a.3. Densité et poids du sol.....11
a.4. Porosité du sol 12
a. 5. Perméabilité du sol.....12
a.6. Couleur du sol 13
a.7. Température du sol 13
a.8. Plasticité, compressibilité et érodabilité du sol.....14
b. Propriétés chimiques des sols.....14
b.1. Matières inorganiques du sol 14
b.2. Matières organiques dans le sol 15
c. Fraction colloïdale du sol 16
c. 1. Composition des colloïdes 16
c.1.1. Colloïdes d'argile 16
c.1.2. Colloïdes organiques ou colloïdes humiques 17
c.2. Propriétés colloïdales des particules de sol 17
c.2. 1. Propriétés physique 17
c.2 .2. Propriétés chimiques 18
1.3.4. Cycle biogéochimique des éléments chimiques dans le sol (cycle du carbone (C)).....20
Le carbone dans le sol 20
1.3.5. Importance de la matière organique dans le sol 22
a. Le complexe argilo-humique (CAH).....22
b. Le pouvoir de sorption ou capacité d'échange.....23
c. Charges variables dépendantes du pH 23
1.3.6. L'eau dans le sol.....24
1.4. lmportance agro-écologique.....24
1.5. Problèmes écologiques de dégradation des sols 25

Sommaire

2. Les micro-organismes telluriques.....27
2.1.Les bactéries 27
2.1.1.Bactérie saprophytiques.....27
2.1.2. Les champignon mycorhizien.....28
a. Les mycorhizes 28
b. Types de mycorhizes 28
b.1- Les ectomycorhizes 28
b.2. Les endomycorhizes.....28
b.3. Les ectendomycorhizes 28
c- Influence des mycorhizes sur le sol et les plantes 29
d. Les champignons 30
2.2. Les protozoaires 30
2.3. Les virus 30
2.4. Interactions : Sol- Micro-organismes-plante.....31
2.4.1. Influence du sol sur la microflore tellurique.....31
2.4.2-Influence de la plante sur le sol 31
2.4.3. Influence des rhizobactéries sur le sol 31
2.4.4. L'effet rhizosphère 32
a- La rhizosphère.....32
b. La rhizodéposition 33
c. L'effet rhizosphère.....33
3. La rhizobactérie *Paenibacillus polymyxa*.....*35*
3-1-Le genre *Paenibacillus* 35
3.1.1-Création du genre 35
3.1.2-Evolution récente du genre 36
3.1.3-description du genre 38
3.2-L'espèce *P. polymyxa* 39
3.2-1. description de l'espèce 39
3.2.2. propriétés des *p.polymyxa* bénéfiques 40
a. fixation d'azote 40
b. Activité cellulolytique 40
c. Activité pectinolytique.....41
d. Activité chitinolytique.....41
e. Activité xyloglucanase.....42
f. Activité protéolytique.....42
g. La production d'exopolyssaccharides (EPS).....42
3.2.3-Abondance relative de la population de *p. polymyxa dans le sol*.....*43*
3.2.4.Utilisation de *p. polymyxa* en technologie.....43

Matériel et Méthode

III-
1-Matériel.....46
2-Méthode.....47
2.1-Méthode Appliqué au sol.....47
2.1.3-Analyse physico-chimique du sol.....48
2.2-Méthode Appliqué au micro-organismes.....50
2.2.4-production des EPS par *paenibacillus polymyxa*.....53

IV. Références bibliographiques.

I. Introduction :

Le monde moderne produit des quantités énormes de déchets solides parmi lesquels les déchets d'origine industrielle et agricole, ainsi que les déchets domestiques. Les déchets agricoles et les ordures ménagères sont essentiellement constitues de matières organiques et sont donc biodégradables .Ces déchets sont fédérateurs de pollutions diverses et dégradation des sols mais aussi source d'énergie et de matières premières de restauration des sols agricoles. Des installations de traitement ont été étudiées dans le but de satisfaire a ces deux particularités.

Ce procède offre une solution de rechange intéressante a l'enfouissement[1] .

Les micro-organismes du sol sont essentiels à la nutrition et la santé des plantes[2]. C'est la résultante de l'interaction entre ces deux compartiments qui est à l'origine des services agro-écosystémiques[3].Ces interactions reposent sur des liens trophiques, soumis à un compromis entre les coûts métaboliques fournis par le partenaire et les services rendus par l'autre partenaire (composés carbonés de la plante permettant la croissance microbienne versus métabolites microbiens contribuant à la croissance et la santé des plantes)[4].

Au niveau du sol, la rhizosphère est donc caractérisée par rapport au sol non-rhizosphérique par un fort développement microbien appelé « effet rhizosphère » qui a pour conséquence une activité intense liée à la libération par les racines, d'exsudats riches en composés organiques[5].

Pour les rhizobactéries, une classification a été proposée sur la base de leur effet sur les plantes. Certaines sont neutres car leur présence dans la rhizosphère ne semble pas entraîner de changement sur la plante, d'autres provoquent des symptômes et sont donc considérées comme des bactéries pathogènes, certainesaltèrentlacroissancevégétalesanssymptômeetsonnommées « rhizobactéries délétères » (Deleterious Rhizo-Bacteria, DRB) ou produisent au contraire un effet bénéfique sur la croissance des plantes (Plant Growth Promoting Rhizobacteria, PGPR).

Dans cette dernière catégorie de bactéries « bénéfiques » pour la croissance des plantes, différents genres ont été décrits à plusieurs reprises, parmi lesquels *Azospirillum*,*Azotobacter*,*Paenibacillus*, *Burkholderia*, *Curtobacterium*, *Pseudomonas*.

La promotion de la croissance des plantes peut s'opérer de manière directe ou indirecte [6], et à des temps variables durant le cycle de vie de la plante [7] .Les voies par lesquelles les bactéries peuvent promouvoir directement la croissance des plantes sont par exemple, la fixation d'azote atmosphérique, la solubilisation des substances minérales comme le phosphore ou la production des régulateurs de la croissance(hormones qui augmentent la croissance de la plante à différents stades de

son développement.
La promotion indirecte de la croissance peut se produire par différents mécanismes ayant trait aux équilibres microbiens du sol comme la compétition pour le carbone ou le fer, la production des substances antibiotiques, l'induction de la résistance aux pathogènes chez la plante [6],ou reliée à des **aspects de structuration du sol comme la production de polysaccharides**[7].

Les effets d'un apport de compost sur les sols ont été étudiés dans différents contextes. Il se traduit généralement par un enrichissement du sol en carbone, en azote et en phosphore organique et minéral. Cependant, le niveau d'enrichissement et sa durée dépendent de la qualité du compost utilisé.Les effets bénéfiques de ces apports organiques sont multiples : ils augmentent la capacité des sols à retenir l'eau nécessaire au fonctionnement microbien, notamment par l'augmentation de la porosité des sols, mais également par leur capacité propre à retenir l'eau. La stabilité des agrégats du sol est renforcée par l'apport des molécules du compost qui diminuent la mouillabilité, par l'apport des substances humiques et **des polysaccharides microbiens** excrétés et au pouvoir agrégatif.

De plus, l'apport de matières organiques facilement dégradables augmente la biomasse et la respiration microbienne indiquant que la ressource organique est facilement utilisable[8].
Le compostage utilise la fermentation aérobie des ordures en vue de la préparation d'un compost utilisable comme amendement en agriculture. C'est l'un des processus de traitement les plus utilises dans la transformation de déchets, valorisables par leur utilisation dans le secteur agricole. II existe de nombreuses méthodes de compostage, en piles, statiques ou a aération passive; sur plusieurs niveaux, aères ou a aération forcée, jusqu'a des systèmes clos (bioréacteurs). Selon la méthode utilisée, le produit final ne sera pas le même, en effet l'aération va jouer un rôle important durant le compostage, influençant, directement ou indirectement de nombreux paramètres tels que l'humidité, la température, la matière sèche,...
Le compostage, donc est un processus aérobie complexe pendant lequel plusieurs sous-populations microbiennes se succèdent, chacune capable de dégrader des macromolécules différentes.
Elles représentent les plus petits et les plus nombreux micro-organismes intervenant dans le compostage. Elles sont responsables de la majeure partie de la décomposition et de la création de chaleur[9]

Les bactéries (principalement *Bacillus* et *Paenibacillus* spp. et les membres des Enterobacteriaceae) étaient les micro-organismes prédominants présents tout au long du processus de compostage avec une densité de population moyenne de **3 x 10^8 UFC / g du sol sec**[8] .

Parmi les populations telluriques *; P. polymyxa* possède un large éventail de propriétés, notamment la fixation de l'azote, la solubilisation du phosphore du sol et la production d'exopolysaccharides, d'enzymes hydrolytiques de la matière organique, d'antibiotiques, de phytohormones.
L'utilisation de cette espèce bactérienne en agriculture peut être envisagée dans un objectif de l'investissement de ces propriétés en biotechnologie microbienne pour la conservation de l'environnement (dépollution des espaces), et la restauration de la fraction organique (CAH) des sols[10] .

C'est sur la base de ces données que nous avons jugé intéressant:

- D'étudier le fonctionnement des deux souches de la rhizobactérie *Paenibacillus polymyxa* SGH1 et SGK2 dans les processus de compostage de matière organique des sols Algériens (Zone de Médéa).
- La dynamique et l'activité enzymatique hydrolytique de ces deux souches sur la décomposition *in vitro* des :
  Glucides : Saccharose, cellulose.
  Polyalcools: Sorbitol-mannitol
  Phénols : lignine
  Protéines : Caséine
  Lipides : Twin 80 - acide oléique

- De contrôler *in vivo* l'impact de l'introduction des deux bactéries sur la modification des caractères chimiques du sol testé (en pots).
- La vérification de l'effet des biopolymères (EPS : lévane) produits par ces deux bactéries *in vitro* et *in vivo* sur l'amélioration de la qualité des colloïdes au niveau du complexes argilo-humique (CAH) du sol.

II. Généralités :

1-Le sol :

1.1-Microbiologie du sol "historique":

Les agronomes ont perçu les sols, jusque dans les années 1970, comme des substrats uniquement minéraux et l'ont étudié comme simple facteur édaphique alors qu'ils sont des réacteurs biogéochimiques complexes dans lesquels les micro-organismes jouent un rôle majeur[11]. Ces communautés vivantes du sol commencent à être étudiées au début du **XX**ème siècle (par Lorenz Hiltner, pionnier de l'écologie microbienne de la rhizosphère)[12], études synthétisées en 1949 dans le traité « **Microbiologie du sol »** du chercheur russe Sergueï Vinogradski, l'un des fondateurs de la microbiologie du sol[13].

1.2-Diversité pédologique et répartition géographique des sols en Algérie:

a. Les sols des régions sahariennes :

La formation des sols dans cette région est entièrement dominée par les conditions climatiques où le vent joue un rôle prépondérant. D'où formation de deux grands types de sols éoliens : Sols éoliens d'ablation sans « terre fine » et dont le caractère essentiel, l'absence de terre fine, ne dépend pas de la roche mère. L'enlèvement de toutes les parties de roches suffisamment fines pour être entraînées ne laisse sur place que des cailloux plus ou moins grossiers qui se concentrent en surface[14].

La roche mère ne joue ici qu'un rôle secondaire : elle n'intervient que pour différencier le produit final : sol calcaire dont les éléments sont finement vermiculés, sol siliceux, gypseux.Ces accumulations de sable peuvent grimper le long des versants des montagnes et former des placages sableux plus ou moins importants (**dans la région d'Aïn-Sefra, de Beni-Ounif, de Laghouat**[14]. Un profil étudié dans la région de laghouat peut caractériser les sols de ces dunes. Bien drainé, sans végétation ni culture, il est homogène sur toute son épaisseur (4 à 5 m) et le sable roux qui le constitue ne contient pas de sels solubles[14].

b. Les sols des régions semi-arides :

On peut dire pour la pédologie qu'on passe de la zone aride à la zone semi-aride lorsque la végétation, entretenue par une pluviométrie encore faible (de 200 à 500 mm par an), est cependant suffisante pour freiner l'action du vent dont le rôle devient dès lors secondaire dans la pédogenèse. Et l'on passe de la zone semi-aride, le mot **« reg »** signifie simplement en arabe : une région plate. La déformation du sens vient de ce qu'au Sahara, ces régions plates sont presque toujours caillouteuses. Lorsque la pluviométrie est suffisante pour donner un tapis végétal herbacé continu ou subcontinu et un couvert forestier. C'est pourquoi on peut dire que le sol zonal est, dans ces conditions, dû à l'équilibre vent-pluie dans la zone semi-aride. Les régions où ces conditions d'équilibre semi-aride sont réalisées en Algérie ont été sommairement délimitées dans la carte de **la figure 1**[14].L'armoise blanche et l'alfa qui constituent la végétation de ces régions ont un enracinement assez profond pour pouvoir résister à la sécheresse. Les sols de cette région peuvent ainsi être fixés par cette végétation steppique, mais leur évolution est freinée par le manque d'eau de percolation[15].

c. Les sols des régions telliennes humides :

Les sols de ces régions humides peuvent se définir par leur mode de formation original : entraînement de substances en profondeur sous l'action des eaux d'infiltration. Mais cette migration est conditionnée par la nature de la roche mère, très variable dans le nord algérien du fait de sa structure plissée. Durand classe les sol de cette région en trois grands groupes[14]. **Le groupe calcaire**comporte tous les sols formés à partir de roches calcaires. Deux types de sols : ***sols calcaires*** et ***sols décalcifiés***[15]. Les sols calcaires ne présentent qu'un seul horizon différencié et se caractérisent par l'accumulation de calcaire au sommet du profil. Enfin, cette accumulation superficielle peut encore résulter d'une attaque du complexe absorbant par le gaz carbonique de l'eau de pluie, fixant le calcaire dissous qui précipite ensuite par suite d'une sécheresse trop grande du milieu et d'une forte température. Les sols décalcifiés sont également formés sur roches calcaires et ont une teneur en calcaire variable avec la profondeur. Mais à la différence des précédents, les horizons superficiels en contiennent moins que les horizons sous-jacents, le calcaire s'accumulant au sommet de la roche mère sous forme de nodules et à l'état diffus. Ces sols décalcifiés sont très répandus en Algérieoù ils couvrent de grandes surfaces. Dans les régions telliennes. Ils se forment chaque fois que la roche mère est argileuse ou donne des produits de décomposition argileux. En d'autres termes, les sols calcaires occupent en Algérie les régions dans lesquelles les roches mères calcifères donnent par altération des produits de décomposition perméables et les sols décalcifiés là où -tout ou partie du carbonate de chaux a disparu de la roche mère calcaire et où, par conséquent, sa décomposition superficielle donne des produits argileux imperméables. **Groupe non-calcaire** : qui comporte les sols formés sur roche mère non calcaire. Deux types principaux : ***sols insaturés*** et ***sols podzoliques***[15]. Les sols insaturés résultent de la décomposition superficielle de roches non calcaires donnant des éléments grossiers riches en bases (les granites de Nedroma par exemple) ou encore des éléments argileux imperméables : sols formés par les schistes, les micaschistes, basaltes, granites basiques, ainsi que sur les alluvions argileuses. Des roches comme les gneiss et leurs arènes, certains schistes (schistes crétacés par exemple), relativement perméables et donnant par altération des produits fins peu perméables" et pauvres en bases, donnent une autre variété de sols insaturés : des sols insaturés acides. Ce sont en général des sols de montagne plus ou moins argileux. Les sols podzoliques se forment dans des conditions d'humidité telles que les sels sont dissous et entraînés en profondeur de même que les colloïdes organiques et minéraux (argile, silice colloïdale). D'une façon générale, dans les régions où la pluviosité annuelle est supérieure à 500 mm, les sols podzoliques se forment en Algérie à partir de roches non calcaires produisant des éléments grossiers pauvres en bases; perméabilité et pluviométrie sont alors suffisantes pour permettre la destruction quasi totale du complexe absorbant[16]. Ces sols, très acides se rencontrent dans les régions nord de l'Algérie, sur les grès de Numidie, les gneiss et certaines dunes, et supportent normalement de belles forêts

d'arbres acidophiles (chênes) avec sous-bois dense de bruyère, de dyss, etc. caractéristique[16].

Groupe des terres rouges méditerranéennes : il s'agit des sols fortement rubéfiés qui se rencontrent fréquemment en Algérie[15].

d. Les sols azonaux (sols locaux) :

A peu près toutes les variétés de sols « azonaux » se retrouvent en Algérie : sols de marais, sols dunaires, sols d'éboulis, sols alluviaux divers, pour nous en tenir à deux séries de sols locaux particulièrement importants en Algérie : ***les sols salins*** et ***les sols à encroûtement***[16]. Les sols salins, qui contiennent ou ont contenu aux premiers stades de leur évolution un excès de sels solubles, sont très répandus dans le tell algérien (plaines de la Mleta et de l'Habra en Oranie, notamment, où la salinité des sols est le principal problème de la mise en valeur) et dans les hautes plaines où ils forment de vastes placages aux alentours des chotts. Ce sont surtout des solontchak où les chlorures de sodium sont en quantités telles (plus de 0,2 %) que la végétation naturelle de la région laisse place à une végétation halophile qui disparaît elle-même lorsque la proportion de sels augmente trop. L'origine des sels peut être variée. Ils proviennent souvent de la décomposition de roches salifères sous l'influence des agents climatiques et des facteurs biologiques. Très nombreux sont les affleurements de roches salifères en Algérie : gypse triasique; grès du Crétacé moyen; marnes sénoniennes dans le Sud-Constantinois; poudingues, grès et limons rougeâtres de l'Oligocène continental (Aquitanien) ; poudingues et grès carténiens; argiles, grès et poudingues helvétiens; gypse, marnes et calcaires du Sahélien; grès du Pliocène continental (bassins fermés des Hautes Plaines); formations quaternaires des plaines littorales, des basses plaines oranaises et des dépressions fermées... pour ne citer que les principaux[17]. Mais de toute façon, les solontchak ne peuvent pas se former sur place car il n'y a jamais assez de sels solubles dans les roches mères, même dans les gypses triasiques affleurant en diapirs. Ils ne peuvent se former que par accumulation des sels en surface dans des bassins fermés, la pluviométrie étant insuffisante pour entraîner en profondeur les sels accumulés. Les solontchak se forment donc par remontée capillaire d'eaux de nappes souterraines et evaporation *in situ*. Du fait de l'excès de sels, les colloïdes sont floculés, le sol garde une bonne structure, est perméable à l'air et à l'eau, mais les cultures comme le développement de toute végétation y sont impossibles sans drainage. Les sols à encroûtement sont particulièrement nombreux en Algérie. Ils ne constituent pas un type de sol original, mais se caractérisent par la formation d'une croûte, plus ou moins épaisse et souvent très dure, au sommet du profil, formant un encroûtement calcaire, gypseux ou salin (dans ce dernier cas, il s'agit simplement de solontchak encroûtés) Ces encroûtements résultent d'une remontée capillaire de substances dissoutes dans l'eau. Dans tous les profils à encroûtement calcaire, le matériau encroûté n'est pas en surface mais à une certaine profondeur **(Figure 1)**[17].

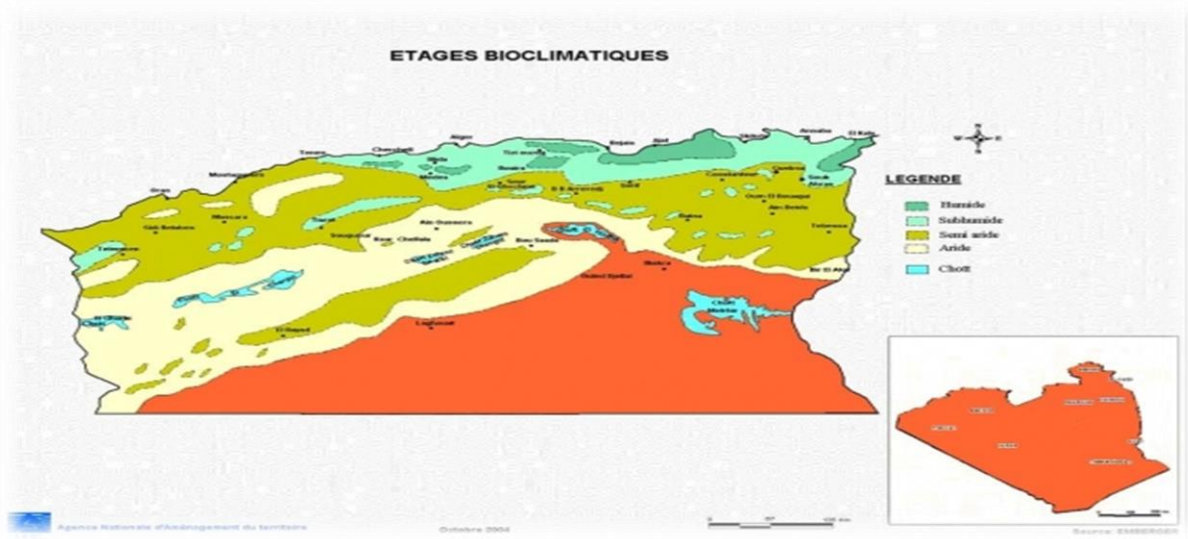


Fig 01 : Diversité pédologique et répartition des fiffétrents types des sols selon les étages climatique s en Algérie[17].

1.3.Etude pédologique :

1.3.1.La pédogenèse :

Est un phénomène complexe conduisant à la formation de sols à partir de matériaux parentaux minéraux et organiques à travers un certain nombre de facteurs et de processus.L'altération et la transformation de la roche mère sont les principaux processus conduisant à la dissolution des minéraux natifs, liés à une possible néo ou diagenèse de nouvelles phases minéralogiques. Au cours des premières étapes de l'évolution du sol, l'altération de la matière minérale mère dépend principalement de la faible action hydrolytique de l'eau[17]. Au fil du temps, la matière organique du sol se forme et se stabilise également. La composante humique de la matière organique du sol joue alors un rôle crucial dans la complexation des cations polyvalents et leur mobilisation. Cela améliore une forme distinctive d'altération minérale, dans laquelle les produits d'altérationsont éliminés par chélation de leur état d'équilibre à l'interface minéral / solution[19]. L'évolution pédo-minéralogique des principales roches en croûte terrestre a déjà été étudiée, alors que des informations très limitées sur l'altération et la transformation des tufs zéolithisés sont disponibles, malgré l'affleurement mondial de ces roches et leur présence pertinente comme substrats du sol. Dans les districts volcaniques. Sur cette base, un programme expérimental de pédologie a été lancé visant à modéliser l'effet de l'eau et des acides humiques dissous sur l'altération des tufs zéolithisés et sur la libération ultérieure de cations[18] .

1.3.2. Classification des sols:

a. Classification géologique:

Les types de sols peuvent être classés en fonction de leur origine géologique **(Tableau I).** L'origine d'un sol peut renvoyer soit à ses constituants, soit aux agences responsables de son statut actuel[19].

Tableau I :[19]Classification géologique des sols :

Sur la base des constituants	**Selon les agences responsables de leur état actuel**
▪ Sol inorganique	• Sols résiduels
	• Sols transportés
	• Sols alluviaux ou sédimentaires
▪ Sol organique	• Sols éoliens
	• Sols glaciaires
	• Sols lacustres
	• Sols marins

b. Classification par structure :

Selon la taille moyenne des grains et les conditions[19], dans lesquelles les sols se forment et se déposent à leur état naturel[20], ils peuvent être classés en types suivants en fonction de leur structure:

- Sols de structure à grain unique.
- Sols à structure en nid d'abeille.
- Sols de structure floculeuse.

c. Classification basée sur la granulométrie :

Dans la classification granulométrique[19], les sols sont désignés en fonction de la granulométrie. Des termes tels que gravier, sable, limon et argile sont utilisés pour indiquer certaines gammes de granulométrie. Les sols naturels sont des mélanges de toutes les tailles de particules, il est préférable d'appeler ces fractions la taille du sable, la taille du limon, etc. Un certain nombre de classifications de la taille du gain ont été élaborées[21], mais les plus couramment utilisées sont:

-Public Roads Administration **(PRA) System of U.S.A.**

-Classification internationale, proposée au congrès international des sols à Washington, **D.C**., en 1927.

-Massachusetts Institute of Technology **(MIT) Système de classification** des États-Unis.

d. Système de classification des sols unifié :

Ce système a été initialement développé par Cassa grande et adopté par le Corps américain des ingénieurs en 1942 sous le nom de *«Airfield Classification»*[22]. Elle a ensuite été révisée pour une utilisation universelle et renommée *«Classification unifiée des sols»* en 1957[23].

Dans ce système, les sols sont classés en trois grandes catégories:

- Sols à grains grossiers avec jusqu'à 50% passant au tamis ASTM n ° 200
- Sols à grains fins avec plus de 50% de réussite N ° passant N ° 200 Tamis ASTM
- Sols organiques

e. Classification préliminaire par type de sol :

Une connaissance des types de sols courants est nécessaire pour comprendre les principes fondamentaux du comportement des sols[24]. Dans cette approche, les sols sont décrits par des désignations telles que Boulders, Gravel, Sand, Silt, Clay, Rockflour, Peat, China Clay, Fill, Bentonite, Black Cotton sol, Boulder Clay, Caliche, Hardpan, Laterite, Loam, Loess, Marl , Moorum, Terre végétale et Argile Varved[24].

-Dénomination selon le type de sol :

Un pédologue ou géotechnicien doit bien connaître la nomenclature et la terminologie des différents types de sols[24]. La liste suivante donne les noms et les principales caractéristiques de différents type de sols**(Tableau II)**.

Tableau II : Nomenclature des types des sols :

Terminologie	**Critères :**
Bentonite:	C'est un type d'argile avec un pourcentage très élevé d'argile minérale - montmorillonite. Il s'agit d'une argile hautement plastique, résultant de la décomposition des cendres volcaniques. Il est très absorbant l'eau et présente des caractéristiques de retrait et de gonflement élevées[26] .
Sol de coton noir:	C'est un sol résiduel contenant un pourcentage élevé de minéral argileux - la montmorillonite. Il a une très faible capacité portante et des propriétés élevées de gonflement et de retrait[27].
Rochers:	Les rochers sont des fragments de roche de grande taille, de plus de 300 mm. Sol calcaire: Ce type de sol contient une grande quantité de carbonate de calcium.Ces sols sont effervescents lorsqu'ils sont testés avec de l'acide chlorhydrique faible[28].
Caliche:	C'est un type de sol qui contient du gravier, du sable et du limon. Les particules sont cimentées par du carbonate de calcium[29].
Argile:	Elle est constituée de particules microscopiques et sub-microscopiques dérivées de la décomposition chimique des roches. Il contient une grande quantité de minéraux argileux. Il peut être rendu plastique en ajustant la teneur en eau. Il présente une résistance considérable lorsqu'il est sec. L'argile est un sol à grain fin. C'est un sol cohérent. La taille des particules est inférieure à 0,002 mm[22].
Galets:	Les galets sont des particules de grande taille dans la gamme de 80 mm à 300 mm[28].

1.3.3. Caractéristiques du sol :

a. Propriétés physiques des sols: Les propriétés physiquesdu sol[31] peuvent être discutées sous les rubriques suivantes:

a.1. Le sol se sépare (fractions du sol):

Les tailles de particules des groupes ci-dessus sont suggérées par l'International Society of Soil Science. En Inde, le système international de différenciation des particules est couramment suivi. Les types de particules sont généralement appelés «séparations du sol» ou «fractions du sol»[30]. La quantité de sol séparé est déterminée par un processus appelé analyse mécanique. Dans ce processus, l'échantillon de sol est broyé et tamisé à travers un tamis à trous ronds de 2 mm. Le sol tamisé est ensuite dispersé de manière homogène dans l'eau et laissé se déposer[31]. En suspension, les particules de plus grandes dimensions se déposent en premier et celles de plus petites dimensions se déposent ensuite. Les séparations de sol individuelles sont identifiées sur la base de leurs gammes de diamètre respectives. Les sols séparés (sable, limon et argile) diffèrent non seulement par leur taille mais aussi par leur incidence sur certains des facteurs importants affectant la croissance des plantes, tels que l'aération du sol, l'ouvrabilité, le mouvement et la disponibilité de l'eau et des nutriments. Les principaux importants de différentes fractions sont les suivantes: le sable, limon et l'argile[31].

a.2. Structure du sol:

Le sable, le limon et l'argile se trouvent sous forme agrégée. La disposition de ces particules de sol sur certains modèles définis est appelée structure du sol[31]. Les agrégats naturels de particules de sol sont des mottes de motte alors qu'une masse de sol formée artificiellement est appelée motte[32].

La structure du sol révèle également la couleur, la texture et la composition chimique des agrégats du sol. La structure du sol est influencée par " l'humidité de l'air, la matière organique, les micro-organismes et la croissance des racines". Lorsque de nombreuses particules ou "**peds"** sont agrégés en grappe, une particule composée est formée[32].

Les systèmes de classification des structures des sols ont pour but de ranger les sols en familles présentant les mêmes caractéristiques géotechniques ou des caractéristiques très voisines[34]. Il existe de très nombreux systèmes de classification des sols, les uns sont basés sur certains essais d'identification qui se réfèrent uniquement à la granularité du sol[33](les trois fractions : limon ; argile et sable) **(GTR : diagramme triangulaire**, (**Figure 02)[34].**

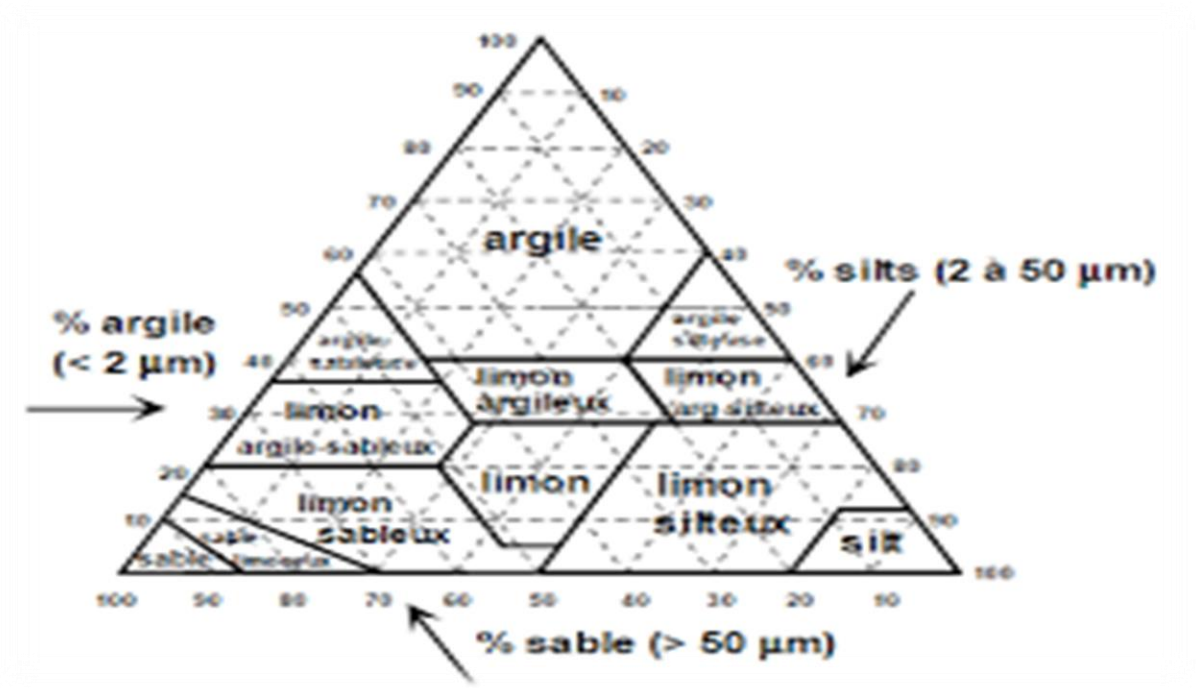


Fig 02 : Classification triangulaire des sols fins (contenant moins de 30% d'éléments de diamètre supérieur à 2 mm)[34].

a.3. Densité et poids du sol:

La densité du sol est la masse par unité de volume. Elle est exprimée en grammes par centimètre cube. La densité moyenne du sol est de **2,65 g/cm3**. La densité du sol varie considérablement selon le degré d'altération[35].

Pour cette raison, la densité du sol s'exprime sous deux formes généralement acceptées:

i) Densité des particules: La densité de la partie solide du sol est appelée densité des particules. C'est la somme totale des densités de particules organiques et inorganiques individuelles[36]. La densité moyenne des particules de sol organique varie de 1,2 à 1,7 g/ml, et celle de la fraction inorganique varie de 2,6 à 2,78 g/ml[36].La densité des particules peut être calculée comme suit:

D= poids des solides / volume des sols

La densité des particules divisée par la densité de l'eau donne la gravité spécifique ou le nombre de poids relatif[36].

Densité spécifique des particules de sol = D / densité de l'eau

(ii) Densité apparente :

Le poids sec du volume unitaire du sol, y compris les espaces poreux, est appelé densité apparente. Elle est exprimée en grammes par ml ou en livres par pied3[36].

Elle est inférieure à la densité de particules du sol[38]. La densité apparente du sol peut être calculée comme suit:

[36] **DA= poids du sol / volume de sol.**

La densité apparente du sol divisée par la densité de l'eau donne le poids volumique ou la gravité spécifique apparente du sol. La densité apparente du sol change avec le changement de l'espace poreux total présent dans le sol et donne une bonne estimation de la porosité du sol. La densité moyenne du sol en vrac est de 1 5 g / ml. Les sols organiques ont une faible densité apparente par rapport aux sols minéraux. Le poids du sol varie en fonction des classes de texture. Le poids moyen du terreau ou du sol sablonneux est de 80 à 110 livres / pied, mais celui de l'argile varie entre 70 et 100 livres / pied3[36].

a.4. Porosité du sol:

Les espaces occupés par l'air et l'eau entre les particules d'un volume donné de sol sont appelés espaces poreux. Le pourcentage du volume de sol occupé par l'espace interstitiel ou par les espaces interstitiels est appelé porosité du sol. Cela dépend de la texture, de la structure, de la compacité et du contenu organique du sol. La porosité du sol augmente avec l'augmentation du pourcentage de matière organique dans le sol. La porosité du sol diminue également à mesure que les particules du sol deviennent beaucoup plus petites dans leur dimension en raison de la diminution des espaces poreux[37].

Il diminue également avec la profondeur du sol. Les espaces poreux sont responsables d'une meilleure croissance des plantes car ils contiennent suffisamment d'air et d'humidité[37].

Le pourcentage de solides dans les sols peut être déterminé en comparant la densité apparente et la densité des particules et en multipliant par cent[38].

Selon la taille, les espaces de pores se divisent en deux catégories, ceux-ci sont:

1. **Espaces micropores (espaces pores capillaires) :**
   Les espaces des pores capillaires peuvent contenir plus d'eau et restreindre considérablement la libre circulation de l'eau et de l'air dans le sol[38] .
2. **Espaces macropores (espaces de pores non capillaires) :**
   Ont une faible capacité de rétention d'eau et permettent la libre circulation de l'humidité et de l'air dans le sol dans des conditions normales[37].

a. 5. Perméabilité du sol:

La caractéristique du sol qui détermine le mouvement de l'eau à travers les espaces poreux est appelée perméabilité du sol[39]. La perméabilité du sol, car elle dépend directement de la taille des pores, sera plus élevée pour le sol avec un grand nombre d'espaces macro-pores que pour un sol compact avec un grand nombre d'espaces micro-pores (espaces capillaires). La perméabilité du sol varie également avec l'état d'humidité et diminue généralement avec la dessiccation progressive du sol[39].

Dans les régions arides, les eaux souterraines se déplacent vers le haut par capillarité et amènent avec elles des sels de sodium, de potassium et de calcium à l'état dissous à la surface du sol. L'eau s'évapore et des sels inorganiques précipitent à la surface du sol. En conséquence, le sol devient moins perméable et sa capacité de production est réduite[39].

a.6. Couleur du sol:

Les sols présentent une variété de couleurs. La couleur du sol peut être héritée du matériel parental (Lithochromique) ou parfois elle peut être due à des processus de formation du sol {couleur acquise ou génétique)[40]. Les variations de la couleur du sol sont dues à des substances organiques, des composés du fer, de la silice, de la chaux et d'autres composés inorganiques[41].

Les substances organiques confèrent au sol une couleur noire ou noir grisâtre foncé[41].

Les composés du fer sont responsables des couleurs brunes, rouges et jaunes des sols[44]. Les oxydes de fer en combinaison avec des substances organiques confèrent une couleur brune qui est la couleur du sol la plus courante[41].

La silice, la chaux et certains autres composés inorganiques donnent au sol des nuances blanches et grises claires[41].

La couleur du sol influence grandement la température du sol. Les sols de couleur foncée absorbent facilement la chaleur morte que les sols de couleur claire[41]. Les travaux de Ramdas et David (1936) ont montré que le sol en coton noir absorbait 86% du total des radiations solaires tombant à la surface du sol contre 40% par le sol alluvial gris. La couleur du sol est utilisée comme critère important pour la description et la classification du sol. De nombreux sols doivent leur nom à leurs couleurs saillantes, comme le sol en coton noir, le latosol rouge-jaune, les sols hydromorphes gris, etc[41].

a.7. Température du sol:

Les principales sources de chaleur du sol sont les radiations solaires et la chaleur générée par la décomposition des matières organiques mortes dans le sol et la chaleur formée à l'intérieur de la terre[42]. La température du sol affecte grandement les processus physico-chimiques et biologiques du sol. La température du sol dépend de la température de l'air atmosphérique et de la teneur en humidité. Il est contrôlé par le climat, la couleur du sol, la pente et l'altitude du terrain ainsi que par la couverture végétale du sol[42].

La température annuelle moyenne du sol est généralement supérieure à celle de son .

Des études réalisées par Leather au PusaResearch Institute de Bihar (Inde) ont montré que la différence de température diurne au niveau de 12 pouces sous la surface du sol n'était que de 1 ° C et à une profondeur de 24 ", elle dépassait rarement 0,1 ° C. À la profondeur de 3 ou 4 pieds, la température reste presque constante[42].

a.8. Plasticité, compressibilité et érodabilité du sol:

-La plasticité du sol est une propriété qui permet au sol humide de changer de forme lorsqu'une force est appliquée sur lui et de conserver cette forme même après que la force en a été supprimée. La plasticité du sol dépend de la cohésion et de l'adhérence des matériaux du sol[43]. La cohésion fait référence à l'attraction de substances de caractéristiques similaires, telles que celle d'une molécule d'eau pour une autre. L'adhésion se réfère à l'attraction de substances de caractéristiques différentes. La consistance du sol dépend de la texture et de la quantité de colloïdes inorganiques et organiques, de la structure et de la teneur en eau du sol[34].

-Compressibilité:

Il fait référence à la tendance du sol à se consolider ou à diminuer en volume. La compressibilité est en partie fonction de la nature élastique des particules de sol et est directement liée au tassement des structures. Avec la diminution de la teneur en eau, les sols ont progressivement tendance à devenir moins collants et moins plastiques et finalement ils deviennent durs et cohérents[44].

Les sols plastiques ont une grande force de cohésion. Ce n'est qu'en raison de la propriété de cohésion que les sols argileux humides développent fréquemment des fissures lorsqu'ils deviennent secs. Les matériaux grossiers tels que les graviers et les sables ont une faible compressibilité et le tassement est considérablement moindre dans ces matériaux par rapport aux sols organiques à grain fin hautement compressibles[44].

-Érodibilité: Il s'agit de la facilité avec laquelle les matériaux du sol peuvent être enlevés par le vent ou l'eau. Les matériaux facilement érodés comprennent le limon non protégé, le sable et d'autres matériaux faiblement consolidés, les sols cohérents (avec plus de 20% d'argile) et les sols naturellement cimentés ne sont pas facilement enlevés de leur place par le vent ou l'eau et, par conséquent, ont un faible facteur d'érosion[45].

b. Propriétés chimiques des sols: Les propriétés chimiques des sols peuvent être décrites sous les rubriques suivantes:

b.1. Matières inorganiques du sol:

D'après les informations fournies dans la description du processus d'altération il est clair que les composés d'aluminium, de silicium, de calcium, de magnésium, de fer, de potassium et de sodium sont les principaux constituants inorganiques des sols. En plus de cela, les sols contiennent également de petites quantités de plusieurs autres composés inorganiques, tels que ceux de bore, de magnésium, de cuivre, de zinc, de molybdène, de cobalt, d'iode, de fluor etc[46]. Les quantités de ces produits chimiques varient dans des sols de différents endroits. La composition chimique du sol d'un horizon diffère grandement de la composition du sol de l'autre horizon[46].

b.2. Matières organiques dans le sol:

La composante organique du sol est constituée de substances d'origine organique; vivant et mort. Dans les sols sableux de la zone aride, on le trouve en très faible quantité (un ou moins de 1%) mais dans les sols tourbeux, il peut atteindre 90%.Lorsque les plantes et les animaux meurent, leurs restes morts sont soumis à la décomposition[47].

À la suite de la décomposition, un certain nombre de produits ou composés organiques différents sont formés à partir des résidus d'origine[47]. Au cours de la décomposition, les matériaux d'origine sont convertis en complexes organiques de couleur foncée, appelés humus. Parfois, les micro-organismes vivants ajoutent une quantité suffisante de matières organiques dans le sol sous forme de déchets métaboliques[48].

Les chimistes tentent de découvrir les détails de la composition de l'humus depuis les premiers jours de la science des sols, et ont connu beaucoup de succès, mais il reste encore à découvrir[49]. En termes d'éléments spécifiques, le composant organique du sol contient également des composés de carbone, d'hydrogène, d'oxygène, de phosphore, d'azote, de soufre et une petite quantité d'autres éléments. Seule une petite fraction de la matière organique totale est soluble dans l'eau mais la majorité d'entre elles sont solubles dans une solution alcaline[50].

- Chimiquement, l'humus contient les molécules organiques suivantes:

Tableau III : Composition chimique de l'humus [50]:

Classe biochimique de la matière organique :	**Métabolite :**
Acides aminés	Acide glutamique, Alanine, Valine, Proline, Cystine, Phényl alanine .
Protéines et bases nucléiques	Purines, Guanine, Adénine, Pyramidines, Cytosine, Thymine, Uracile.
Molécules aromatiques	Phénols
Acides uroniques:	Acide glucuronique, Acide galacturonique, Acide lactique
Acides aliphatiques:	Acide acétique, Acide formique, Acide succinique
Aminosucres:	Glucosamine, N. Acétylglucosamine
Sucres pentosiques:	Xylose, Arabinose , Ribose
Sucres hexose:	Glucose, Galactose, Mannose

Alcools de sucre:	Inositol, Mannitol
Sucres méthyliques:	Rhamnose, Fucose, 2-0 méthyl D-xylose, 2-0, méthyl D-arabinose
Autres molécules	des graisses, des huiles, des cires, des résines, du tanin, de la lignine et certains pigments.

c. Fraction colloïdale du sol:

c. 1. Composition des colloïdes :

Il existe deux types de colloïdes dans le sol. Ceux-ci sontdes colloïdes minéraux ou colloïdes d'argile, et colloïdes organiques ou humiques[51].

Ces deux fractions colloïdales de sol sont très intimes l'une de l'autre et il est très difficile de les séparer. Les colloïdes inorganiques se présentent sous forme de particules très fines et les colloïdes organiques se présentent sous la forme de particules d'humus. Les particules colloïdales du sol présentent presque toutes les caractéristiques d'un système colloïdal typique, à savoir l'adsorption, l'effet Tyndal, le mouvement brownien, la coagulation, l'électrophorèse, la dialyse, etc[51].

c.1.1. Colloïdes d'argile:

En ce qui concerne la taille, la fraction argileuse du sol contient à la fois des particules non colloïdales et colloïdales. Certaines particules d'argile peuvent avoir un diamètre allant jusqu'à 0,002 mm, mais certaines peuvent être plus petites que la taille colloïdale normale (la taille normale des particules colloïdales est de 1 à 200 μm). Les particules d'argile sont formées principalement de silice, d'alumine, de fer et d'eau combinée. L'argile colloïdale peut également contenir une riche accumulation de nutriments végétaux[52].

Les premiers chercheurs en science des sols ont décrit les colloïdes d'argile comme des particules sphériques et leur taille a été mentionnée en termes de diamètre, mais les micrographies électroniques récentes révèlent que les particules se produisent en couches ou en plaques et chaque particule peut apparaître comme si elle était composée d'un grand nombre d'unités en forme de plaques. Ces unités ou flocons d'argile sont maintenues ensemble par une force d'attraction. Les particules d'argile en forme de plaque exposent une grande surface sur laquelle l'humidité et les cations (**ions** +) sont retenus. Plus les particules d'argile sont fines, plus le pourcentage d'humidité hygroscopique sera élevé[53].

Si l'argile est mise en suspension dans de l'eau distillée, secouée, puis un peu de **NH_4 OH** est ajouté à la suspension et laissé se déposer, après quelques minutes, de grosses particules se déposent mais des particules plus fines restent en suspension[53]. Quand un peu d'eau de chaux est ajoutée à la suspension, les fines particules en suspension augmentent en taille et forment de petits flocules qui ont

tendance à se déposer. Ainsi, les particules d'argile plus fines présentent une propriété de floculation. Maintenant, si de l'acide est ajouté, les flocons sont cassés et les particules d'argile reviennent à leur taille normale. Ce processus est connu sous le nom de défloculation[53].

c.1.2. Colloïdes organiques ou colloïdes humiques:

Les colloïdes organiques dans le sol sont principalement dus à la présence d'humus. L'humus contient 8% chacun de lignine, de protéines, de polyuronides (sucres et complexe d'acide uronique). Les colloïdes organiques peuvent être présents en proportion appréciable dans les sols. Dans le sol sablonneux, il forme une partie mineure des colloïdes. Dans un sol tourbeux, les colloïdes organiques peuvent être supérieurs à 50%. Ces colloïdes présentent une capacité d'adsorption plusieurs fois supérieure à celle des colloïdes argileux[54].

Les colloïdes organiques sont chargés négativement comme les colloïdes d'argile. L'addition de colloïdes organiques au sol sableux augmente temporairement sa capacité de rétention d'humidité et de nutriments[54].

c.2. Propriétés colloïdales des particules de sol:

c.2. 1. Propriétés physique :

Certaines des propriétés importantes des colloïdes en général sont les suivantes:

-Taille des particules:

Les cristalloïdes et les colloïdes diffèrent les uns des autres dans leur gamme de tailles. Les particules de cristalloïdes en solution vraie sont de 0,2 à 1 mμ (millimicron) tandis que celles des colloïdes en suspension sont de 1 à 200 mμ[55].

- Adsorption:

Parce que les particules colloïdales de phase dispersée sont très petites, elles ont de grandes surfaces exposées. En raison de leurs grandes surfaces exposées, ces particules colloïdales présentent une grande capacité d'adsorption. Lors de l'adsorption, des particules de substances particulières viennent se poser à la surface des colloïdes et ne pénètrent pas profondément dans les particules colloïdales[55].

-Propriétés électriques:

Les colloïdes chargés électriquement sont appelés micelles. Les colloïdes ont une charge électrique sur eux. Ils peuvent être facturés positivement ou négativement. Les particules colloïdales d'une charge électrique ont tendance à attirer les colloïdes de charge opposée. Dans le sol, les particules d'argile sont chargées négativement, donc elles attirent les cations (+ ions chargés)[55].

- Coagulation ou floculation des particules colloïdales:

Les particules colloïdales dans la suspension peuvent être coagulées soit en chauffant, soit en ajoutant certaines substances qui contiennent des ions chargés opposés. Lorsque des substances portant des ions positifs sont ajoutées en suspension contenant des particules de colloïdes chargées négativement, les ions se déplacent et s'accumulent à la surface des colloïdes porteurs de charges opposées. Enfin, une étape survient lorsque les particules colloïdales ne peuvent pas attirer plus d'ions

chargés opposés. C'est ce qu'on appelle le point isoélectrique. En raison de l'accumulation d'ions à leur surface, les colloïdes deviennent d'abord gros et plus lourds et, finalement, ils ont tendance à se déposer au fond dans les flocules. Ce processus est connu sous le nom de floculation[55].

- Phénomène Tyndall:

Les particules colloïdales en suspension peuvent être observées lorsqu'un faisceau lumineux puissant traverse la suspension et l'observateur la regarde de l'endroit à angle droit jusqu'au trajet de la lumière. Les particules colloïdales deviennent visibles sous forme de particules fortement illuminées et elles semblent plus grandes que la taille normale. Ce phénomène est appelé «effet Tyndall»[55].

-Mouvement brownien:

Les particules colloïdales en suspension dans un milieu de dispersion présentent un mouvement continu caractéristique en zigzag, appelé mouvement brownien. Ce type de mouvement a été observé pour la première fois par le botaniste anglais Robert Brown, d'où son nom de mouvement brownien. Le mouvement est exposé en raison de la collision caractéristique d'une particule avec d'autres. Cela empêche les particules de se déposer[55].

- Dialyse:

Parce que les particules colloïdales en suspension sont plus grandes que les particules de cristalloïdes en vraie solution et sont plus grandes que le diamètre des pores des membranes poreuses, par exemple, la membrane de parchemin, elles ne peuvent pas être filtrées et sont retenues la membrane Ainsi, elles peuvent être séparé à l'état pur du mélange de cristalloïdes et de colloïdes par filtration. Ce processus de séparation est connu sous le nom de dialyse[55].

C.2 .2. Propriétés chimiques :

-Échange de cations:

Puisque les colloïdes du sol (argile et colloïdes organiques) ont des charges négatives sur eux, ils attirent et retiennent les ions positifs (cations). Lorsque des cations sont ajoutés aux sols tels que **Ca^{++}** sous forme de chaux, les ions **K^{+}** sous forme d'engrais potassique et NH^{++} sous forme d'engrais ammonium, l'adsorption des cations aura lieu à la surface de la micelle colloïdale et cela s'accompagner de la libération d'un ou plusieurs ions détenus par la micelle colloïdale[56].

C'est ce qu'on appelle l'échange cationique. Par exemple, supposons que la micelle colloïdale ait la moitié de sa capacité satisfaite avec les ions **Ca^{++}**, le quart avec l'ion **K^{+}** et le quart restant avec les ions H^{+}. Maintenant, le colloïde est traité avec une solution de KCl. Les ions K^{+} remplaceront d'abord les ions Ca^{++} puis les ions H^{+}. Les ions Ca^{++} et H^{+} se combineront avec les ions CI^{-} de KCl et formeront respectivement $CaCl_2$ et HCl [56].

L'échange de cations dans le sol peut avoir lieu entre:

(1) Cations présents dans les solutions du sol et ceux déjà présents à la surface des colloïdes du sol·

(2) les cations libérés par les racines des plantes et ceux présents à la surface des colloïdes du sol.

(3) Cations présents à la surface de deux cristaux d'argile soit deux colloïdes organiques, soit un colloïde organique et un colloïde argileux.

La réaction d'échange est très rapide et réversible et l'échange d'ions se poursuit jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint. Tous les cations ne sont pas adsorbés avec la même facilité. Certains sont facilement adsorbés tandis que d'autres sont remplacés avec difficulté. Les cations divalents sont plus efficaces que les cations monovalents. L'hydrogène est une exception car il est retenu par les colloïdes avec la plus grande ténacité et c'est le plus puissant remplaçant des cations[56] .

Les capacités de remplacement de certains cations sont comparées ici :

$H^+ > Ca^{++} > K^+ > Na^+$

Le nombre de cations adsorbés par unité de poids de **100 g de solsec** est appelé ***capacité d'échange cationique (CEC)***. Plus scientifiquement, la capacité d'échange cationique du sol est la somme totale des cations échangeables adsorbés par poids unitaire de cent grammes de sol sec[56].

Les facteurs responsables de l'échange de cations ou de la base sont les suivants:

(**1)** Concentration relative et nombre de cations présents dans le sol.

(2) Remplacer la capacité des ions.

(3) Nombre de charges sur les ions.

-Échange d'anions:

Les sols riches en colloïdes organiques présentent également un échange d'anions. Dans ce processus, les ions chargés négativement retenus par les colloïdes sont remplacés par les ions OH^- , $H_2\ PO_4^-$, SO_4^- et NO_3^-[56].

L'ordre d'échange relatif est :

$OH^- > H_2\ PO_4^- > SO_4^- > NO_3^-$

Parmi ces anions, l'échange de PO_4^- , les ions est le plus important. SO_4^- et NO^- ne sont pas retenus dans le sol pendant une longue période de temps, donc pas disponibles pour l'échange anionique. Les sols en latérite ont une capacité d'adsorption et de fixation élevée pour PO_4^- que les sols noirs[56].

Les réactions d'échange anionique et cationique sont importantes en agriculture. Plusieurs pédologues ont montré que la capacité du sol à échanger des cations est le meilleur indice de fertilité du sol. La prédominance des ions souhaitables dans le complexe d'échange entraîne de bons cations physiques et influe favorablement sur les activités microbiennes dans le sol, telles que la nitrification par ammonification, etc[56].

1.3.4. Cycle biogéochimique des éléments chimiques dans le sol (cycle du carbone (C)) :

Le carbone est le constituant majeur de deux gaz à effet de serre, CO_2 et CH_4, sans lequel il ne saurait y avoir de vie sur terre ; son recyclage influence particulièrement la productivité biologique et le climat[57].

Dans la nature, le carbone se retrouve sous deux formes : le carbone organique (C_{org}) et le carbone inorganique (C_{inorg}).

- Le C_{org} est produit par des organismes vivants ; il est lié à d'autres carbones ou à des éléments comme l'hydrogène (H), l'oxygène (O), l'azote (N) ou le phosphore (P) dans les molécules organiques (les hydrocarbures sont un cas particulier contenant seulement des atomes de carbone et d'hydrogène)[57].
- Le C_{inorg} est est associé à des composés qui ne sont pas liés au vivant, par exemple le carbone du CO_2 atmosphérique ou celui des carbonates comme le calcaire $CaCO_3$[57].

a. Le carbone dans le sol :

Le stock de carbone organique présent dans les sols naturels présente un équilibre dynamique entre les apports de débris végétaux et de déjections animales et la perte due à leur décomposition[58].

Tous les sols ne stockent pas la même quantité de carbone selon leur nature et surtout leur utilisation. Ainsi, limiter le labour ou maintenir la forêt améliore le stockage du carbone dans le sol[58].

b. Le carbone dans la plante :

Les plantes absorbent le carbone du CO_2 de l'air par photosynthèse réduire le dioxyde de carbone de l'atmosphère par l'eau absorbée par les racines à l'aide de l'énergie solaire captée par les feuilles, en présence de sels minéraux, avec libération d'oxygène, afin de de produire des glucides , lors de leur croissance[59]. Le carbone est alors stocké dans les végétaux. En fin de cycle cultural ou en fin de saison pour les cultures pérennes, les résidus retournent au sol. Après dégradation de ceux-ci, le carbone s'organise pour donner des molécules de plus en plus complexes et de plus en plus stables[59].

Dans le cycle court du carbone qui s'étale sur moins d'un siècle et qui affecte l'équilibre du CO_2 dans l'atmosphère, il faut distinguer 3 réactions de base :

La photosynthèse :

Utilise l'énergie solaire pour synthétiser la matière organique et fixer le carbone dans les glucides (sucres) $(CH_2O)_n$ [60].

$$n\ (CO_2 + H_2O) + \text{énergie solaire} \rightarrow (CH_2O)_n + n\ O_2$$

La respiration :

La respiration est l'inverse: elle transforme toute matière organique en CO2, à partir de l'oxygène libre O_2 .

L'équation de la respiration peut se résumer à :

$$(CH_2O)_n + n\ O_2 \rightarrow n\ (CO_2 + H_2O)$$

La fermentation :

La fermentation, en milieu aérobie (présence d'oxygène) produit du dioxyde de carbone et en milieu anaérobie (absence d'oxygène) du méthane (l'hydrocarbure le plus simple, avec une seule molécule de carbone)[61].

L'équation de la fermentation en milieu aérobie peut se résumer à :

$$(CH_2O)_n + n\ O_2 \rightarrow n\ (CO_2 + H_2O)$$

L'équation de la fermentation en milieu anaérobie peut se résumer à :

$$(CH_2O)n \rightarrow n\ (CH_4 + CO_2)/2$$

Le cycle long du carbone organique qui intervient sur des processus géologiques se déroule sur des milliers et des millions d'années, tels l'enfouissement des matières organiques dans les sédiments et roches sédimentaires, leur transformation en combustibles fossiles et leur altération (oxygénation). Les flux de carbone liés à ces processus sont faibles **(Figure 04)** [60].

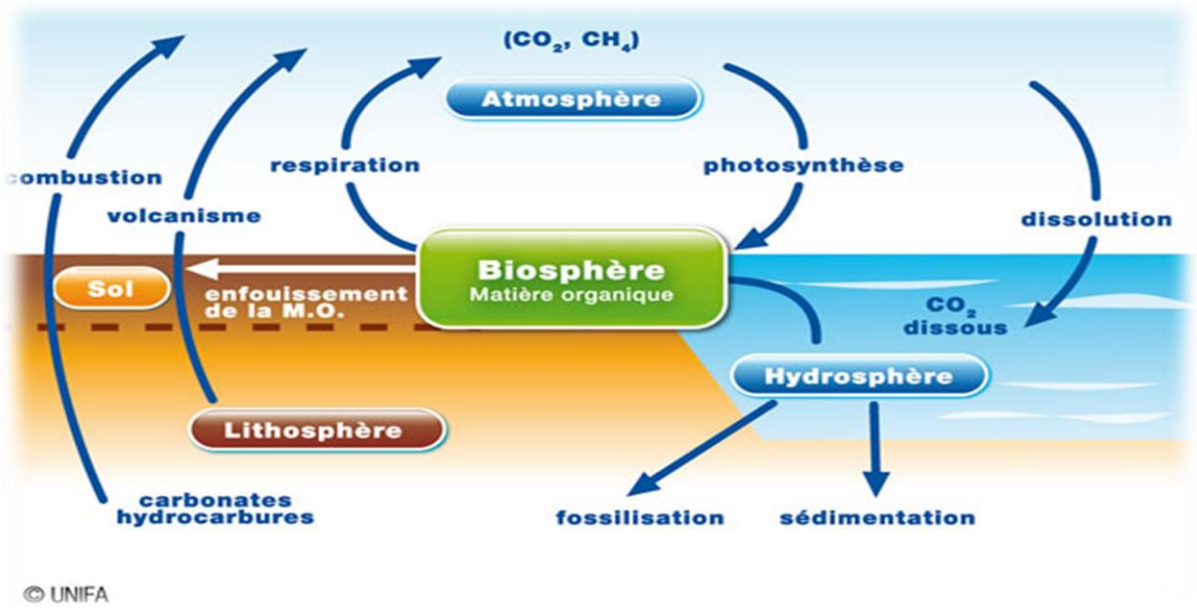


Fig 04 : Cycle biogéochimique du carbone ; le sol[62].

1.3.5. Importance de la matière organique dans le sol :

a. Le complexe argilo-humique (CAH) :

Plus de la moitié, parfois la totalité de la matière organique du sol est associée à l'argile, avec laquelle elle forme des complexes très stables. Les particules d'argile, se trouvent en général enrobées par une pellicule de matière organique. Divers types de liaison chimiques ou physico-chimiques, assurent la cohésion de ces complexes. Des hydroxydes polymérisés de fer, d'aluminium ou de manganèse qui sont chargés positivement, peuvent encore renforcer la stabilité de l'ensemble, en jouant le rôle de ponts entre particules de charges négatives. Un complexe argilo-humique stable procure au sol des propriétés nouvelles, toutes favorables à sa fertilité [63].

Ces effets sont multiples :

- La floculation des colloïdes argileux et humiques favorise une structure aérée et un stockage hydrique suffisant.
- La liaison argile-humus freine la minéralisation de la matière organique humifiée
- En s'y liant, l'humus empêche la dispersion de l'argile, évitant le colmatage et la compaction du sol.
- L'intégration de l'argile et de l'humus dans un même composé augmente la capacité du sol à retenir les bioéléments indispensables aux plantes[64].

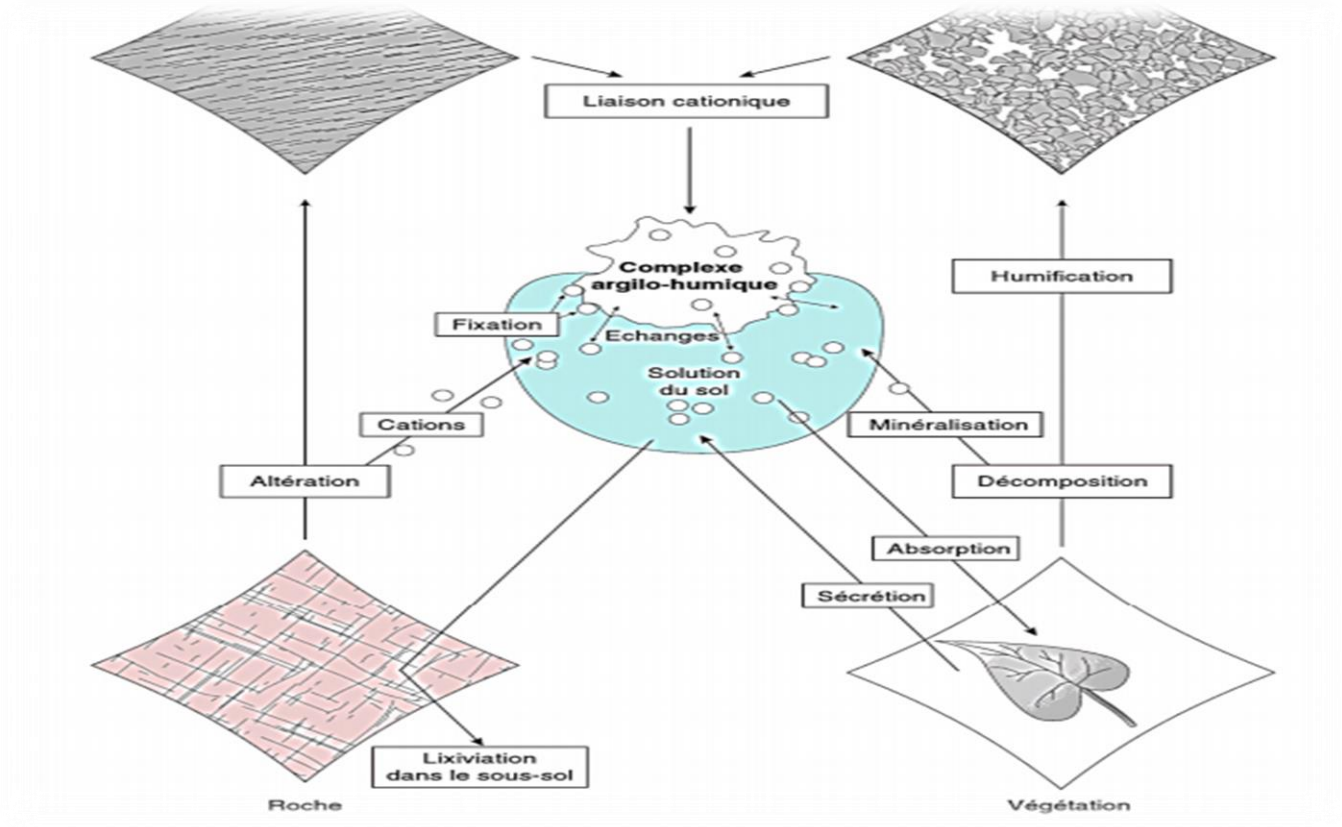


Fig 5: Le complexe argilo-humique [64].

b. Le pouvoir de sorption ou capacité d'échange :

La plupart des colloïdes du sol présentent une charge électrique de surface, généralement négative, plus rarement positive[65]. L'ensemble des charges négatives correspond à la capacité d'échange cationiquedu sol ou CEC. L'ensemble des charges négatives est exprimé par la capacité d'échange anionique CEA. La capacité d'échange des cations est très variable dans les sols : de 1 à 5 cmolc kg-1 en sol sableux jusqu'à 60 à 80 cmolc kg-1 en sol argileux et humifère[64]. Au plan agronomique, on considère qu'une CEC < 10 cmolc kg-1 est très faible, qu'entre 10 et 15 cmolc kg-1 elle est faible, moyenne entre 15 et 20 cmolc kg-1 , élevée entre 20 et 25 cmolc kg-1 et très élevée lorsqu'elle est > 25 cmolc kg-1 (**Chamayou et Legros, 1989**)[65]. En résumé, la CEC des sols sera fonction de 3 paramètres principaux : la texture, la teneur en matière organique et la composition minéralogique du sol[65].

c. Charges variables dépendantes du pH :

Il s'agit de charges négatives ou positives apparaissant lors de l'ionisation de différents groupes fonctionnels[72]. Quatre catégories de constituants sont à l'origine de ces charges variables :

1. Les composés organiques.
2. Les minéraux argileux.
3. Les allophanes.
4. Les oxyhydroxydes amorphes ou cristallins[64].

1.3.6. L'eau dans le sol :

L'eau peut se trouver dans plusieurs états à l'intérieur d'un sol, ces états se distinguent essentiellement par l'intensité des forces qui lient l'eau et les particules[67].

On distingue classiquement :

- l'eau de constitution qui entre dans la composition chimique/minéralogique de certains minéraux (essentiellement les argiles).
- l'eau liée à la surface des grains, qui est solidaire des grains.
- l'eau capillaire qui est retenue par les pores les plus fins du sol au dessus du niveau de la nappe : la zone de remontée capillaire peut être complètement ou partiellement saturée.
- l'eau libre qui peut circuler dans les pores du sol sous l'effet des forces de pesanteur : le volume occupé par cette eau définit la notion de porosité efficace qui est plus petite que la porosité géométrique.
- la glace qui se forme en fonction des conditions de température et qui mobilise en priorité l'eau libre. La formation de glace et surtout de lentilles de glace par ségrégation peut entraîner des désordres importants sur les ouvrages routiers essentiellement lorsque le dégel se produit. Les sols susceptibles de donner lieu à la formation de lentilles de glace sont des sols contenant une par significative d'éléments fins[67].

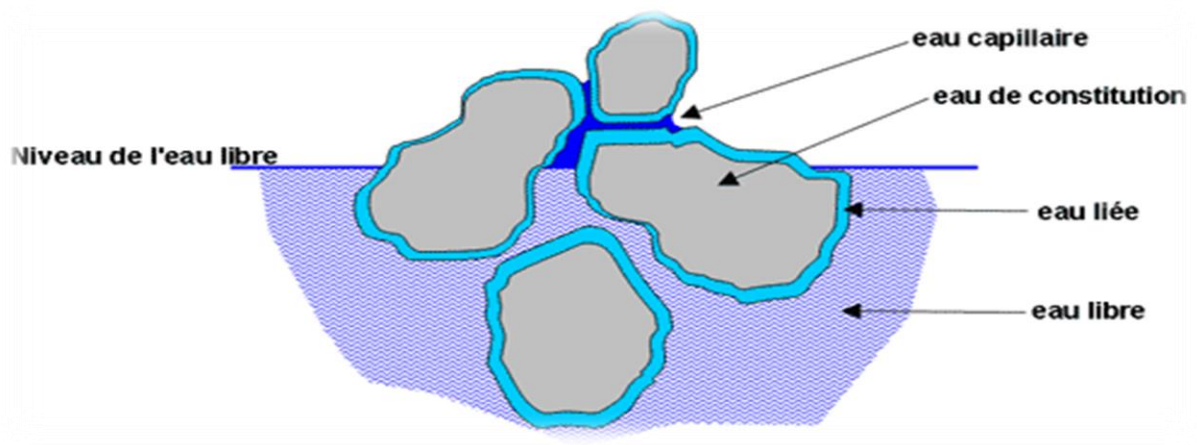


Fig 06 : *Les formes de l'eau dans le sol. Une vue schématique*[67].

1.4. Importance agro-écologique :

Pourquoi le sol est-il important dans les écosystèmes?

Les écosystèmes du sol contiennent une diversité de vie supérieure à celle de tout autre écosystème. Le sol remplit un certain nombre de fonctions importantes qui contribuent à tous les cycles écologiques[68].

Les cycles écologiques comprennent l'eau, l'azote, l'oxygène, les cycles biologiques et géologiques. Les sols jouent un rôle dans tous ces cycles. Par exemple, pendant le

cycle de l'eau, le sol est responsable du stockage de l'eau. Dans le cycle du carbone, qui peut s'étaler sur plusieurs années, le dioxyde de carbone est stocké dans le sol, au lieu d'être rejeté dans l'atmosphère.
Le sol remplit des fonctions cruciales en tant qu'écosystème. Il protège les graines et les plantes pour qu'elles puissent germer et pousser. Le sol retient et libère de l'eau, ce qui aide à contrôler les inondations et à filtrer l'eau. De plus, les organismes dans le sol aident à décomposer le fumier, les restes de plantes et les pesticides afin qu'ils n'entrent pas et ne polluent pas l'approvisionnement en eau.
Il existe plus de 70000 variétés de sols, et il faut environ 100 ans à la nature pour créer un seul pouce de terre végétale. On estime qu'entre 5 et 10 tonnes de vie animale peuvent vivre dans une seule acre de sol[68].

1.5. Problèmes écologiques de dégradation des sols (Erosion, appauvrissement, pollution) :

L'agriculture intensive a un effet dévastateur sur les sols.La monoculture, le labour profond, l'utilisation massive de pesticides et d'engrais, détruisent **la microflore** du sol enclenchant un cercle vicieux : le sol s'appauvrit, nécessitant l'ajout de toujours plus de chimie[69].

Causes principales :

- L'agrandissement des parcelles et la disparition des haies.
- L'utilisation massive d'intrants chimiques, le labour.
- La pollution de l'air lessivée par la pluie.
- Le processus d'érosion des sols : correspond au décapage des particules de surface de ce sol. Pour qu'il y ait érosion, il faut un agent météorique et il est nécessaire que les conditions de surface du sol permettent aux particules d'être emportées. On pense en premier lieu à l'eau, mais le vent constitue également un agent érosif très important.Quant à ces fameuses conditions de surface qui doivent être réunies, elles sont assez logiques. Une particule est davantage susceptible d'être décapée si elle se trouve sur une parcelle de sol nu (la végétation accroît en effet la cohésion du sol), une parcelle dont la rugosité est importante et qui est très peu encroûtée[69].

  L'érosion causée par l'eau (que l'on qualifie logiquement **d'érosion hydrique)** peut prendre plusieurs formes. Il y a tout d'abord ces minces filets d'eau qui coulent à la surface des champs, générant de l'érosion en nappe. Tôt ou tard, ces filets d'eau finissent pas se rencontrer et par se concentrer, soit en fonction de la topographie, soit à la suite de l'existence de motifs dans le paysage favorisant cette concentration (on peut ainsi citer les fossés, les routes, les dérayures et autres sillons de labour). Des traces d'érosion plus marquées peuvent alors apparaître. On parle alors d'érosion en rigoles ou en ravines, en fonction de leurs dimensions[69].



Fig 07 : Phénomènes d'érosion en nappe (à gauche) et d'érosion concentrée (à droite)[69].

2. Les micro-organismes telluriques:

2.1.Les bactéries : 2.1.1.Bactérie saprophytiques:

Les bactéries saprophytes sont les principaux décomposeurs de la matière organique du sol **(Figure 07)**, décomposant les mélanges complexes tels que la cellulose, les hémicelluloses, la lignine et les protéines en formes solubles simples (réactions cataboliques) et libérant leurs atomes pour être réutilisés par d'autres bioprocédés (réactions anaboliques)[70].La pertinence biologique des bactéries saprophytes pour l'environnement a été utilisée dans plusieurs applications biotechnologiques. La capacité de certaines bactéries acidophiles à résister à des concentrations élevées de certains métaux grâce à des réactions biologiquesd'oxydoréduction a été appliquée dans une variété de domaines industriels tels que le traitement des déchets de mines métallifères, des eaux de mines acides et des gaz de combustion sulfureux[71]-[72].La mine Matsuo au Japon a appliqué ce système de traitement biologique à l'aide de *Thiobacillus ferrooxi* dans pour traiter 28 m^3 / min d'eau de mine à pH 2,5 oxydant plus de 95% du fer ferreux soluble[71].

Les systèmes microbiens peuvent détoxifier les ions métalliques par biominéralisation extracellulaire, biosorption, complexation, précipitation ou bioaccumulation intracellulaire. Les enzymes réductrices de la paroi cellulaire ou les enzymes sécrétées solubles peuvent être impliquées dans le processus réducteur des ions métalliques par les bactéries[73].

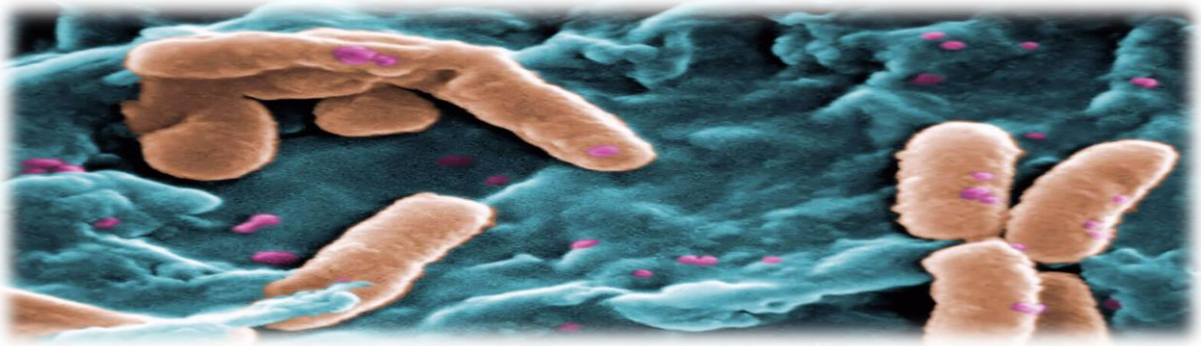


Fig 07 :[73]Une espèce de Bacilles saprophytes dans la matière organique du sol.

Certains facteurs environnementaux tels que la disponibilité du fer, du sulfure et un environnement micro-aérobie sont importants pour la prolifération des bactéries magnétotactiques telles que *Magnetospirillum magnetum*. Les minéraux magnétiques produits par ces bactéries telles que la greigite et la magnétite biogénique forment une aimantation résiduelle post-dépôt qui indique un changement environnemental local rapide**.**

Les archéologues pour établir la chronologie et l'histoire environnementale d'un lieu utilisent ces biomarqueurs[73].Ils ont découvert que des magnétosomes bactériens dans le village de Yarnton (Oxford, Royaume-Uni) suggérant une transformation de la vallée fluviale auparavant sèche en une plaine inondable active. Des micro-organismes résistants aux radiations ont été utilisés dans le traitement des déchets environnementaux hautement radioactifs en raison de leur capacité à transformer, détoxifier ou immobiliser une variété de polluants métalliques et

organiques[75]. et utilisés pour la décontamination des eaux de drainage minier acides par dégradation anaérobie[76].

Les techniques traditionnellement appliquées au traitement des résidus radioactifs environnementaux sont basées sur des méthodes chimiques de neutralisation et de précipitation·Ces techniques rapides et efficaces présentent plusieurs inconvénients, comme la nécessité de construire des traitements végétaux supplémentaires, le coût élevé des réactifs chimiques utilisés et la génération d'un volume important de boues à relocaliser[76].

2.1.2. Les champignons mycorhiziens :

a.Les mycorhizes :

On appelle mycorhize une symbiose entre des champignons et des racines de plantes terrestres. Les mycorhizes sont connues chez 83% des dicotylédones, 79% des monocotylédones et l'ensemble des gymnospermes, soit environ 90 % des trachéophytes [77].

b. Types de mycorhizes :[78]Ils sont classé les mycorhizes en trois groupes principaux .

b.1- Les ectomycorhizes : Sont une association fréquente entre les arbres des régions tempérées (Fagacées, Bétulacées, Pinacées) et les Basidiomycètes (Bolets, Amanites) ou les Ascomycètes.

Du point de vue anatomique le champignon entoure complètement la racine et constitue le manteau fongique[77].

b.2. Les endomycorhizes : Les hyphes pénètrent dans la paroi des cellules de l'écorce de telle sorte que leur paroi entre en contact avec la membrane plasmique de la cellule racinaire, sans la traverser [77].

Suivant les caractères des acinomycètes, les endomycorhizes se subdivisent en plusieurs groupes :

-Les mycorhizes à vésicules et arbuscules, formées par les Zygomycètes.

-Les mycorhizes à pelotons d'hyphes cloisonnés, formées par les Ascomycètes ou Basidiomycètes [79].

b.3. Les ectendomycorhizes : Ce sont des formes intermédiaires, qui possèdent à la fois des caractères d'ectomycorhizes et d'endomycorhizes ·

Dans ce cas intermédiaire, connu chez les Ericacées, le champignon forme des pelotons intracellulaires en plus d'un manteau autour de la racine(79).Les trois types de mycorhize sont résumés dans la figure suivante :

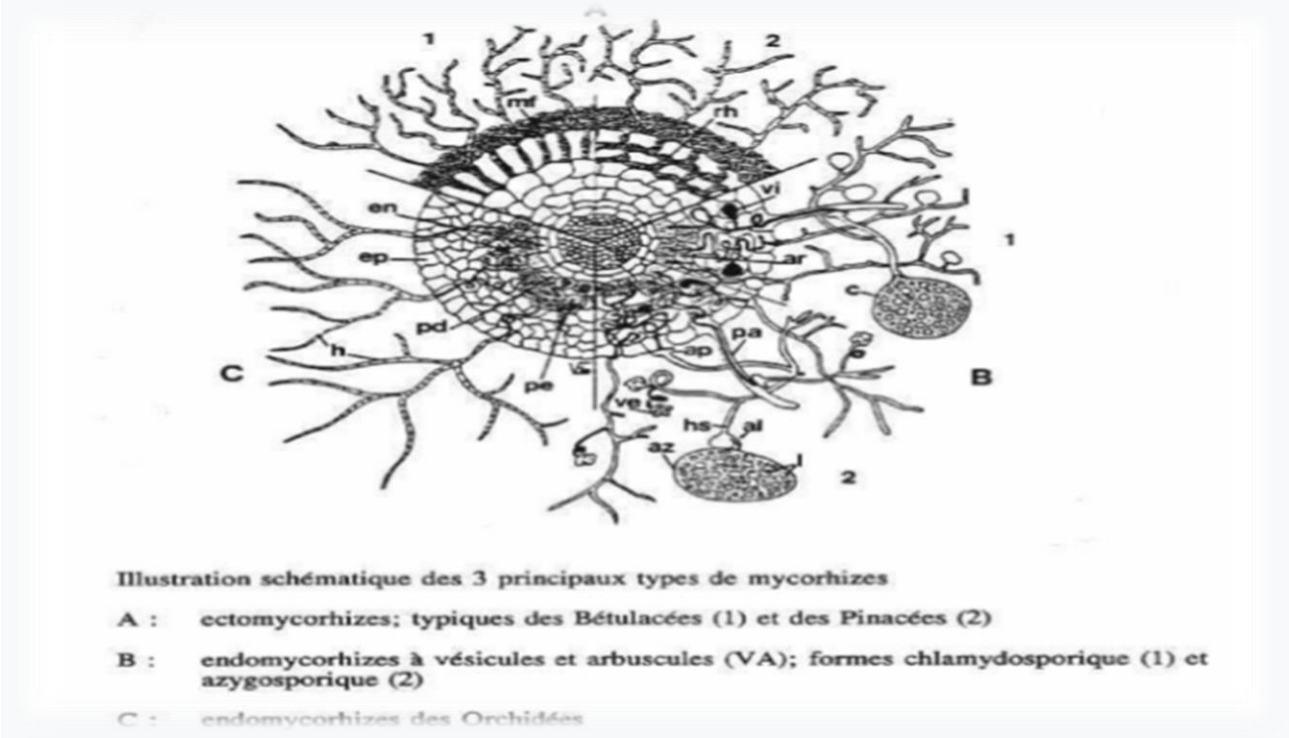


Fig 08: Illustration schématique des trois principaux types de mycorhizes [79].

c- Influence des mycorhizes sur le sol et les plantes :

La symbiose mycorhizienne est une association mutualiste jouant un rôle majeur dans l'adaptation des plantes à leur environnement. Les éléments du sol, le champignon symbiotique et la plante constituent ce que l'on peut appeler le système " minéral-champignon plante" [80].Le contact étroit créé entre les racines de la plante et le champignon par le biais du réseau filamenteux constitue le siège d'échanges nutritifs permettant la survie et le développement du champignon tout en améliorant la croissance de la plante hôte [80].En effet, le champignon, opérant comme une extension naturelle du système d'enracinement de la plante, est largement dispersé dans le sol grâce à un important réseau de filaments mycéliens extraradiculaires. Il a ainsi accès à un volume de sol beaucoup plus important que le système racinaire de la plante. La longueur racinaire souvent relativement faible d'une plante et son diamètre relativement gros réduisent sa capacité de prélèvement des principaux éléments minéraux limitant sa croissance (phosphore et azote). En revanche, les hyphes des champignons ont un diamètre beaucoup plus fin (quelques µm, ils peuvent devenir très longs et contiennent peu de cloisons transversales. Ils servent ainsi de pompe pour diriger vers la racine un supplément d'eau et de sels minéraux auxquels celle-ci n'aurait pas normalement accès. En contrepartie, les plantes alimentent leurs partenaires fongiques hétérotrophes en carbone issus de la photosynthèse, essentiels à leur croissance (sucres, acides aminés, vitamines). Elles leur attribuent ainsi une part importante de photo-assimilats, en général entre 25 et 30% des molécules carbonées qu'elles synthétisent[80].Le réseau mycélien contribue également à augmenter la disponibilité et la mobilité des éléments nutritifs présents en quantités limitantes dans la rhizosphère, et ce, en accélérant l'altération des minéraux. Il en résulte une meilleure assimilation des nutriments : en premier lieu

celle du **P**, et les taux **de N, Mg, Ca, K, S, Zn, Cu, B** peuvent être multipliés par deux ou trois lorsque la plante est mycorhizée. Cette association peut également protéger la plante des organismes pathogènes[81].

d- Les champignons :

Ils sont aussi capables de dégrader les hydrocarbures[82].En général, ils forment une biomasse aussi importante que celle des bactéries. Leurs activités métaboliques sont multiples et fondamentales à l'équilibre écologique du sol, par leurs interactions, avec le système racinaire des plantes, leur aptitude de colonisation et de dégradation des débris organiques et des composés de structure complexe. De nombreux travaux indiquent la prédominance les genres *Muco*r, *Trichoderma* et *Aspergillus*[83].Les avantages principaux des champignons par apport aux bactéries sont leurs capacités de se propager dans des sols grâce à leurs mycelium et à produire des enzymes extracellulaires[84].

2.3. Les protozoaires:

Les protozoaires sont des eucaryotes unicellulaires hétérotrophes qui sont capables de se déplacer dans leur habitat. Ils sont très répandus dans les milieux aquatiques et sont également retrouvés dans les sols. Ils se déplacent dans l'eau retenue dans les micropores et à la surface des micro-agrégats. Les protozoaires se nourrissent, entre autres, de bactéries qu'ils ingèrent par endocytose. Ils participent à la régulation des populations bactériennes dans les sols. Les protozoaires les plus petits sont plus performants dans la prédation car ils peuvent facilement s'immiscer dans les pores du sol où se trouvent les colonies bactériennes. Le déclin du nombre d'**UFC** de *Salmonella Typhimurium* est significativement corrélé au développement de la population de protozoaires dans le sol indiquant clairement un phénomène de prédation. Le déclin de *S. Typhimurium* est accentué dans le même sol amendé qui contient initialement un nombre plus important de protozoaires[85].

La survie de 3 bactéries pathogènes, *Lysteria monocytogenes, S. Typhimurium* et *Campylobacter jejuni* a été suivie en Co-culture avec le protozoaire *Cercomonas sp*[86].

Les protozoaires ont donc un rôle déterminant pour les bactéries et leur dispersion dans l'environnement.

2.4. Les virus :

Les virus contenus dans les eaux usées appliquées au sol peuvent persister dans l'environnement pendant de longues périodes. Des entérovirus indigènes ont été isolés de sols de bassins d'infiltration rapide recevant des effluents d'eaux usées primaires et secondaires[87].Il a également été démontré que les entérovirus indigènes survivent 28 jours dans le sol d'un dôme de cyprès après l'application d'effluents d'eaux usées secondaires sur le sol du dôme[88].Ils ont montré que des poliovirus ensemencés[89].pouvent survivre dans le sol après l'irrigation avec des effluents pendant 11 jours en été et 96 jours en hiver. Étant donné que les virus

peuvent persister dans le sol, l'évacuation des eaux usées au sol présente un risque potentiel de maladie humaine résultante. Pour évaluer l'étendue de ce risque, la survie des virus dans le sol doit être soigneusement étudiée et les facteurs affectant la persistance du virus dans le sol doivent être élucidés.
Quelques études ont été menées concernant les effets des conditions environnementales sur la survie des virus dans le sol. [90]Ils ont constaté que la survie du virus de l'encéphalomyélite de souris était plus élevée dans le sol à pH neutre que dans un sol qui avait été ajusté à pH 3,7 ou pH 8,5, [91]a déterminé que le temps de survie des entérovirus était plus court dans un sol limoneux que dans un sol sablonneux. Ils[92]ont observé que le poliovirus et le bactériophage f2 survivent également bien dans du sable saturé d'eau distillée, d'eau distillée contenant des cations, d'eau du robinet et d'effluent d'étang d'oxydation.

2.5. Interactions :Sol- Micro-organismes-plante:

2.5.1. Influence du sol sur la microflore tellurique :

Le sol exerce un effet sur les communautés microbiennes au niveau de la rhizosphèreen maintenant des pH, des aérations et des caractéristiques physico-chimiques différentes[93].

2.5.2-Influence de la plante sur le sol:

Les racines modifient profondément les propriétés physiques et chimiques du sol environnant, contribuant ainsi à la formation d'un milieu spécifique appelé rhizosphère. Ce milieu est caractérisé par une forte colonisation bactérienne liée à la libération d'exsudats riches en composés organiques par les racines[94].La racine influence aussi la rhizosphère en créant un gradient d'oxygène négatif (respiration racinaire), en absorbant l'eau (ce qui augmente l'aération du sol) et en absorbant des sels minéraux[94].L'environnement de la plante conditionne les relations sources-puits de la plante. La rhizodéposition représente une perte d'énergie pour la plante mais un apport trophique pour les micro-organismes telluriques. Par conséquent, en échange de cet apport d'énergie, les micro-organismes peuvent rendre disponibles pour la plante des nutriments nécessaires à la croissance. Ils peuvent également être impliqués dans la santé de la plante en la protégeant de certains pathogènes. De plus, ces micro-organismes entretiennent la fonction puits de la rhizosphère de par leur activité et leur capacité à stocker le carbone. Le concept des relations sources-puits peut alors être étendu à la rhizosphère celle-ci étant un puits de carbone C par le biais de la rhizodéposition[95].

2.5.3. Influence des rhizobactéries sur le sol:

L'adsorption des exopolysaccharides (EPS) à la surface des particules élémentaires est à l'origine, en partie au moins, de la formation des agrégats[96].En général, de la stabilité de ces agrégats vadépendre la qualité de la structure d'un sol. Il est par ailleurs bien établi que l'introduction d'EPS extraits de cultures microbiennes induit une amélioration significative de la structure du sol[97].Il résulte d'un tel effet une modification de la porosité[96].pouvant jouer un rôle important dans les

processus de transfert d'eau et d'éléments nutritifs. L'effet d'une souche de Rhizobium, productrice d'EPS, sur le rapport masse du sol adhérent aux racines/biomasse racinaire (SA/RA) s'accompagne de modifications de l'environnement physique de la racine pouvant affecter l'alimentation hydrique et minérale dans la rhizosphère du tournesol [96].

2.5.4. L'effet rhizosphère :a- La rhizosphère:

La rhizosphère est un terme adopté pour la première fois par le Lorenz Hiltner en 1904. Son étymologie vient du grecque ***rhizo***- qui signifie "racine" et ***sphe****r*- "globe", donc la fraction du sol qui englobe la racine. En menant ses travaux sur la germination et la croissance des plantes, Hiltner avait remarqué que l'interface sol-racine est le siège d'une grande diversité bactérienne et d'échange entre la plante et les bactéries. Il était aussi convaincu que l'exsudation racinaire serait à l'origine de la diversité de ces communautés bactériennes au voisinage de la racine. La rhizosphère a donc pris pour définition: " La zone du sol sous l'influence de la racine, qui se caractérise par sa richesse en éléments nutritifs issus essentiellement des exsudats racinaires, des mucilages, des lysats..."[98].

La rhizosphère n'est pas une région de taille ou de forme définissable, elle est définie par un gradient de propriétés chimiques, biologiques et physiques qui changent radialement et longitudinalement le long de la racine [98].Elle constitue aussi un écosystème favorable à la croissance et au développement de diverses populations de bactéries, protistes, champignons et certains animaux influencées par les rhizodépôts [99].

La rhizosphère fait référence à plusieurs zones[99].

-L'endorhizoshère: espace intercellulaire habité par les bactéries qui ne forment pas de structuresymbiotique.
-Le rhizoplan: surface externe de la racine siège de larhizodéposition.
-L'ectorhizosphère: le sol qui adhère auxracines.

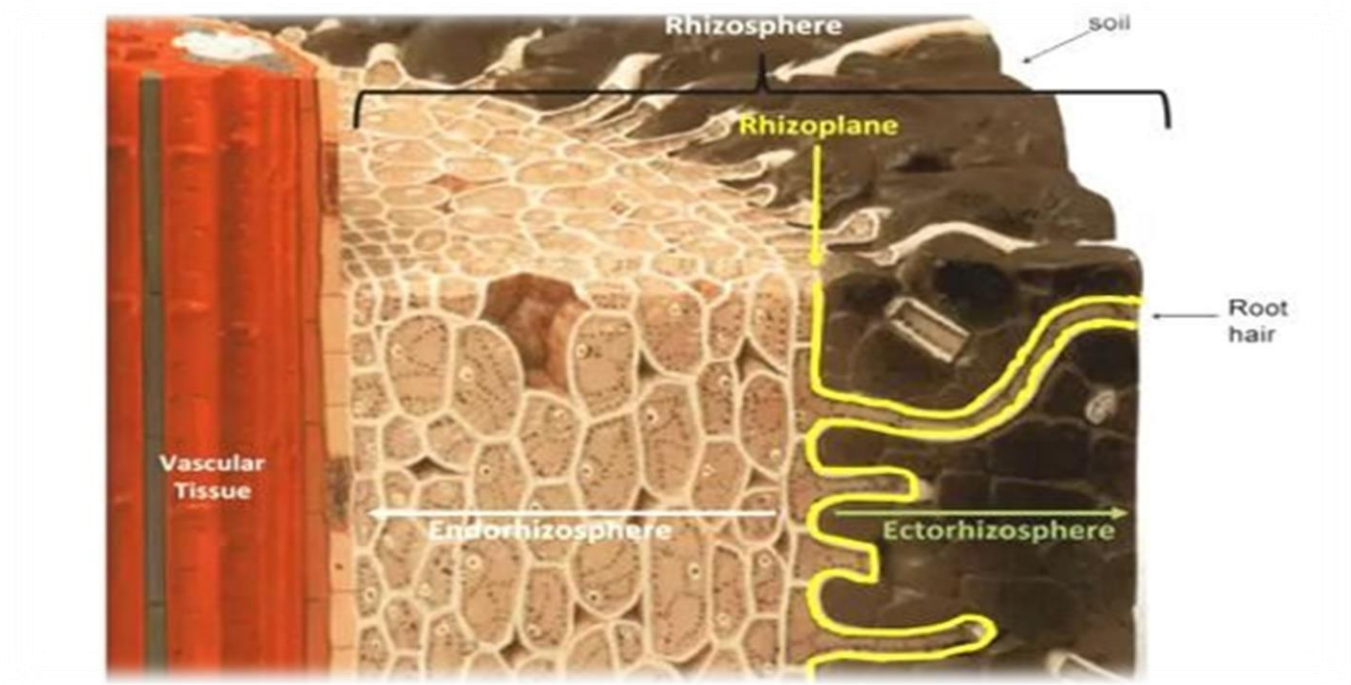


Fig 09 : Différentes parties de la rhizosphère[99].

b. La rhizodéposition :

La rhizodéposition a été définie pour la première fois[100]. Elle représente tout les éléments émis par le système racinaire, il s'agit des exsudats hydrosolubles ou non, des lysats, des cellules desquamées et des gaz comme le CO_2 et l'éthylène[99].

Cette rhizodéposition reste difficile à estimer en raison de la fluctuation des facteurs biotiques et abiotiques del'environnement.

Les racines peuvent exsuder de 10 à 250 mg de carbone / g de racine, soit 10 à 30 % du carbone total fixé par la photosynthèse. Ces sources de carbone fournissent les nutriments et l'énergie nécessaires pour la microflore du sol, ayant pour conséquence la stimulation de la vie microbienne dans la rhizosphère[99].

Le système racinaire des plantes peut en effet exsuder dans le sol des molécules organiques diverses; leurs qualité ainsi que leurs quantité dépendent étroitement de l'espèce végétale. Le mucilage représente la fraction non hydrosoluble des exsudats, avec des teneurs avoisinant les 95 % en polysaccharides et 3 à 4 % de protéines. Les exsudats solubles sont généralement des sucres simples, acides aminés, acides organiques, enzymes, phénols et Vitamines[101].

c. L'effet rhizosphère:

L'apport trophique racinaire influence la densité des populations bactériennes présentes dans la rhizosphère. En effet[102]Ils ont indiqué que les populations bactériennes présentes sur les racines et dans la rhizosphère sont plus abondantes (5 à 50 fois plus) que dans le reste du sol, l'exsudation d'acides organiques, d'acides aminés ou de lipides par les racines (approximativement 2 mm autour de la racine) et

la décomposition des matières organiques mortes (débris issus des cellules végétales mortes) modifient l'environnement rhizosphérique[103].

Il s'ensuit par conséquent une modification de la structure et de la composition des populations bactériennes au contact des racines[103].En d'autres termes, la rhizodéposition influence largement le développement de la flor rhizobactérienne qui s'en nourrit, sélectionnant probablement des espèces physiologiquement bénéfiques pour la nutrition de la plante [104].

3. La rhizobactérie *Paenibacillus polymyxa :*

3-1-Le genre *Paenibacillus* :3.1.1-Création du genre :

Une étude en 1988 utilisant la taxonomie numérique basée sur 188 caractères unitaires a suggéré un cadre pour diviser *Bacillus* en plusieurs genres[105]Une représentation plus précise des relations phylogénétiques entre ces bactéries a été atteinte en 1991, lorsque des séquences de gènes d'ARNr 16S ont été déterminées pour des souches standard de 51 espèces alors définies comme *Bacillus*[106].

En Janvier 1993, le sous-comité international de la classification du genre *Bacillus* a décidé d'entreprendre une étude taxonomique polyphasique collaborative des espèces de *Bacillus* du groupe III[107].La même année, quelques membres du comité ont publié la description d'un genre nouveau, *Paenibacillus*, pour définir les bactéries du groupe III qui contenait l'espèce *B. polymyxa* et les espèces apparentées.

Les analyses du gène ARNr 16S ont permis d'obtenir dix groupes phylogénétiques dans le genre *Bacillus* [106].cinq de ces groupes ont été reclassés à des genres nouveaux et qui sont *Alicyclobacillus*, *Paenibacillus*, *Halobacillus*, *Brevibacillus* et*Aneurinibacillus*.

Le genre *Paenibacillus* comportait onze espèces lors de sa création [106]:

P. polymyxa qui est l'espèce type du genre nouveau, *P. alvei*, *P. gordonae*, *P.larvae*, *P. pulvifaciens*, *P. macerans*, *P. azotofixans*, *P. pabuli* , *P. macquariensis*, *P.amylolyticus*et *P. validus*.

De nombreuses nouvelles espèces apparaissent tous les ans, par exemple jusqu'à 2010, le genre comportait 120 espèces et quatre sous espèces.

Le dendrogramme suivant résume les espèces de *Paenibacillus* apparues ces dernières années.

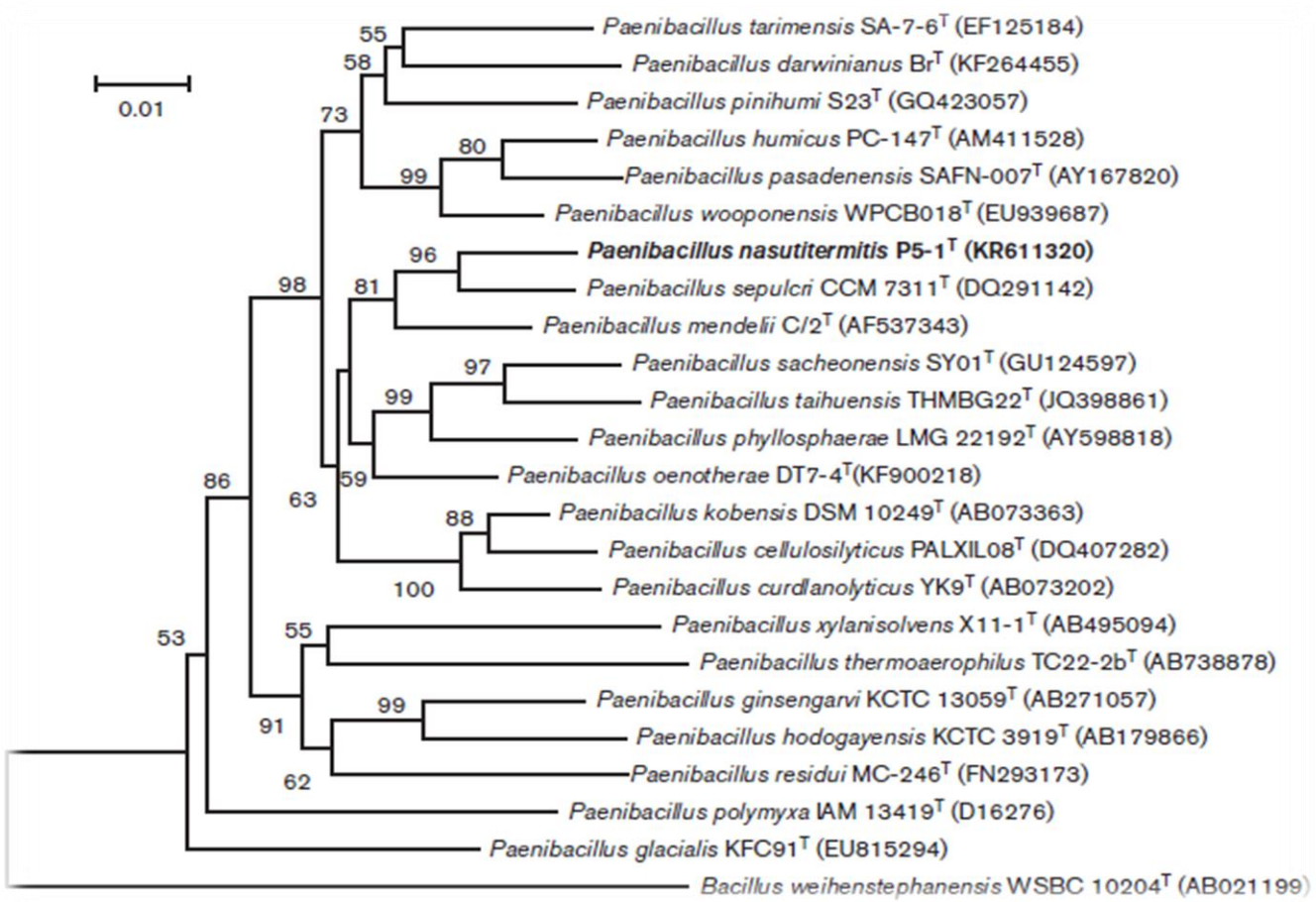


Fig. 10: Arbre Phylogenetique reconstruit avec la méthode du voisinage basé sur les séquences du gène d'ARNr 16S de la souche P5-1T et d'autres espèces de *Paenibacillus,* montrant la position de la souche P5-1T parmi ses voisins phylogénétiques. *Bacillus weihenstephanensis* WSBC 10204T a été utilisé comme groupe externe[106].

3.1.2-Evolution récente du genre :

Le nom Paeni-bacillus est dérivé de l'adverbe latin paene, signifiant presque; presque un *Bacillus*[108].Peu de temps après la création du genre, les organismes auparavant considérés comme des espèces distinctes de *Paenibacillus* ont été reclassés comme équivalents: par exemple, *Paenibacillus gordonae* a été déterminé comme étant un synonyme de *Paenibacillus validus* et *Paenibacillus pulvifaciens* a été déterminé comme étant une sous-espèce puis un syno-nym pour les larves de Paenibacillu[108]. Plusieurs espèces ont également été reclassées dans le genre *Paenibacillus*, dont *Clostridium durum*, *Bacillus alginolyticus, Bacillus chondroitinus*, *Bacillus curdlanolyticus*, *Bacillus glucanolyticus*, *Bacillus kobensis* et *Bacillus thiaminolyticus*[109].

En 1997, une modification proposée décrivait des Paenibacillus a ayant des séquences d'ADNr 16S avec plus de 89,6% de similitude, étant mobiles au moyen de flagelles péritriches (se projetant dans toutes les directions) et étant non pigmentées sur de la gélose nutritive, entre autres caractéristiques. Les espèces de ce genre peuvent être

gram-positives, gram-négatives ou gram-variables, en plus de partager les caractéristiques basales attribuées à *Bacillus*[110].

Tableau IV :[110] Nouvelles espèces du genre *Paenibacillus* apparues de 2011 à 2017.

Années	**Espèces du genre *Paenibacillus***
2011	*P.algorifonticola* (Tang et *al*.,2011), *P.chungangensis* (Park et *al*., 2011), *P.jilunlii*(Jin et *al*., 2011), *P.phoenicis* (Bernardini et *al*., 2011), *P.pini* (Kim et *al*., 2011),*P.puldeungensis*(Traiwan et *al*., 2011),*P.purispatii* (Behrendt et *al*., 2011), *P.rigui* (Baik et *al*., 2011), *P.sacheonensis* (Moon et *al*., 2011), *P.sophorae*(Jin et *al*., 2011),*P.tianmuensis*(Wu et *al*., 2011), *P.uliginis*(Behrendt et *al*., 2011), *P.wooponensis* (Baik et *al*., 2011) et *P.xylanisolvens* (Khianngam et *al*., 2011).
2012	De *P.chartarius*(Kämpferet*al*.2012),*P.telluris* (Leeet *al*.2012),*P.frigoriresistens* (Ming et *al*.,2012) et *P.sediminis* (Wang et *al*.,2012).
2013	*P.endophyticus* (Carro et *al*., 2013), *P.vulneris* (Glaeser et *al*., 2013), *P.hordei* (Kim et *al*.,2013), *P.typhae* (Kong et*al*., 2013), *P.oceanisediminis* (Lee et *al*.,2013), *P.profundus* (Romanenko et *al*., 2013), *P.thermoaerophilus* (Ueda et*al*., 2013), *P.peijingensis*(Wang *al*., 2013), *P.taihuensis* (Wu et *al*.2013), *P.selenitireducens* (Yao et *al*., 2013), *P.catalpae*(Zhang et *al*.,2013) et *P.thermophilus* (Zhou et *al*., 2013).
2014	*P.lupini* (Carro et*al*., 2014), *P.darwinianus*(Dsouzaet *al*., *P.susongensis* (Guo et*al*., 2014), *P.doosanensis*(Kim et *al*., 2014), *P.humi*(Kim et *al*.,2014), *P.marinisedimin* (Lee et *al*., 2014), *P.guangzhouensis* (Li et *al*., 2014), *P.lentus* (Li et *al*.,2014), *P.pinesol i*(Moonet *al*.,2014),*P.relictisesami* (Shimoyamaet *al*.,2014),*P.dongdonensis*(S on et.*al*., 2014), *P.shirakamiensis*(Tonouchi et *al*.,2014), *P.quercus*(Wanget*al*., 2014) et *P. selenii* (Xiang et*al*., 2014).
2015	*P.ferrarius* (Cao et *al*., 2015), *P.tibetensis*(Han et *al*., 2015), *P.lemnae* (Kittiwongwattana et Thawai, 2015), *P.shenyangensis* (Jiang et *al*., 2015), *P. abyssi* (Huang et *al*., 2015), *P. dauci* (Zhu et *al*., 2015), *P. hemerocallicola* (Kim et *al*., 2015), *P. nicotianea* (Li et *al*., 2015), *P. oenotherae* (Kim et *al*., 2015), *P. physcomitrellae* (Zhou et *al*., 2015), *P. populi* (Han et *al*., 2015), *P. qingshengii* (Chen et *al*., 2015), *P. rhizoryzae* (Zang et *al*., 2015), *P. senegalensis* (Mishra et *al*., 2015), *P. vini* (Chen et *al*., 2015), *P. wulumuqiensis* (Zhu et *al*., 2015) et *P. xanthinlyticus* (Kim et *al*.,2015).
2016	*P. terreus* (Huang et *al*., 2016), *P. wenxiniae* (Gao et *al*., 2016), *P. cavernae*(Lee, 2016), *P.etheri* (Guisado et *al*., 2016), *P.marchantiophytorum* (Guo et*al*., 2016),*P.nasutitermitis*(Wanget*al*.,

	2016),*P.radicis*(Gaoet *al.*, 2016),*P.arachidis*(Sadafet*al.*, 2016), *P. baekrokdamisoli*(Leeet *al.*, 2016), *P.bovis* (Gao et *al.*, 2016), *P. cathormii* (Sitdhipol et *al.*, 2016), *P. cisolokensis* (Yokota et *al.*, 2016), *P. cucumis* (Kampfer et *al.*, 2016), *P. gelatinilyticus* (Padakandla et *al.*, 2016), *P. liaoningensis* (Ai et *al.*, 2016) et *P.periandrae*(Menendez et *al.*, 2016).
2017	*P. phocaensis* (Tidjani et *al*., 2017), *P. rhizoplanae* (Kämpfer et *al*., 2017),*P. oryzisoli* (Zhang et *al*., 2017), *P. polysaccharolyticus* (Madhaiyanet *al.*, 2017), *P. tritici* (Menendez et *al*., 2017) et *P. aquistagni* (Simon et *al*.,2017).

3.1.3-description du genre :

L'étymologie du mot *Paenibacillus* vient du Latin *Paene* (presque) ce qui signifie que *Paenibacillus* est presque un bacille, parce qu'il dérive de ce genre mais est phylogénétiquement distinct.

Les cellules sont des bacilles de structure généralement Gram positif parfois Gram négatif ou Gram variable. Ces cellules ne sont pas pigmentées et sont mobiles grâce à une ciliature péritriches. Elles se caractérisent par la formation d'une endospore ellipsoïdale déformante qui gonfle distinctement le sporange[111].

Les principales caractéristiques distinctives de quelques espèces du genre *Paenibacillus* sont mentionnées dans le tableau V.

Tableau V : principales caractéristiques distinctives de quelques espèces du genre *Paenibacillus*[111].

Characteristic[a]	*P. polymyxa*	*P. amylolyticus*	*P. lautus*	*P. macquariensis*	*P. pabuli*	*P. peoriae*	*P. macerans*	*P. alvei*[b]	*P. larvae* subsp. *larvae*	*P. larvae* subsp. *pulvifaciens*	*P. validus*	*P. azotofixans*
Swollen sporangia[c]	+[c]	+	++	++	+	+	++	+	+	+	+++	+
Anaerobic growth	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	−	+
Casein hydrolysis	+	−	v	−	v	+	−	+	+	+	−	−
ONPG[d] hydrolysis	+	+	+	+	+	+	+	+	−	−	−	+
Arginine dihydrolase	−	−	−	−	−	−	−	−	−	+	−	−
Indole production	−	−	−	−	−	−	−	+	−	−	−	−
Gelatin liquefaction	+	−	−	−	+	+	v	+	+	+	−	−
Nitrate reduction	v	+	−	−	−	v	−	−	v	v	v	−
Gas produced from carbohydrates	+	−	−	−	−	+	+	−	−	−	−	+
Acid produced from:												
Glycerol	+	−	+	−	+	v	+	+	+	+	+	−
D-Arabinose	−	−	+	−	−	−	+	−	−	−	−	−
L-Arabinose	+	+	+	−	+	+	+	−	−	−	−	−
Ribose	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	−
D-Xylose	+	+	+	+	+	+	+	−	−	−	+	−
Adonitol	−	−	−	−	−	−	−	+	−	−	−	−
Methylxyloside	+	+	+	+	+	+	+	−	−	−	−	−
D-Fructose	+	+	+	+	+	+	+	−	−	−	+	+
Mannitol	+	−	+	+	+	+	+	−	−	+	+	+
Methyl-D-mannoside	−	+	−	−	v	+	v	−	−	−	−	−
Salicin	+	+	+	+	+	+	+	v	+	−	−	+
Maltose	+	+	+	+	+	+	+	+	−	−	+	+
D-Trehalose	+	+	+	+	+	−	+	v	+	+	+	+
Gentiobiose	+	+	+	+	+	+	+	+	−	−	−	+
2-Keto-D-gluconate	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	+
5-Keto-D-gluconate	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	+

3.2-L'espèce *P. polymyxa* :3.2-1. description de l'espèce :

La description de *P. polymyxa* est identique à celle de *B. polymyxa* telle qu'elle est donnéedans la 2ème édition de «Bergey's Manual of Systematic Bacteriology». *P. polymyxa* est un bacille à Gram positif, aéro-anaérobie[112].qui peut exploiter la dénitrification comme processus respiratoire relayant la respiration aérobie [113].

L'intérêt de l'aptitude dénitrifiante de *P.polymyxa* réside dans le fait qu'elle est capable de s'adapter à la pression de sélection imposée par l'environnement rhizosphérique qui peut constituer un milieu assez pauvre en oxygène. Elle est de 2 à 5 µm de longueur sur 0.6 à 0.8 µm de diamètre, mobile grâce à une ciliature péritriche (**Figure 11a).**Ils[114]ont montré que la mobilité de la souche *P. polymyxa* E681 a été fortement induite par un métabolite secondaire, la citrinine, produit par *Penicillium citrinum* KCTC 6549 .

Cette espèce bactérienne forme une spore ovale, déformante, subterminale non accompagnée par un cristal parasporal(**Figure 11b**)ce qui lui confère une certaine résistance aux stress de différentes origines [115].

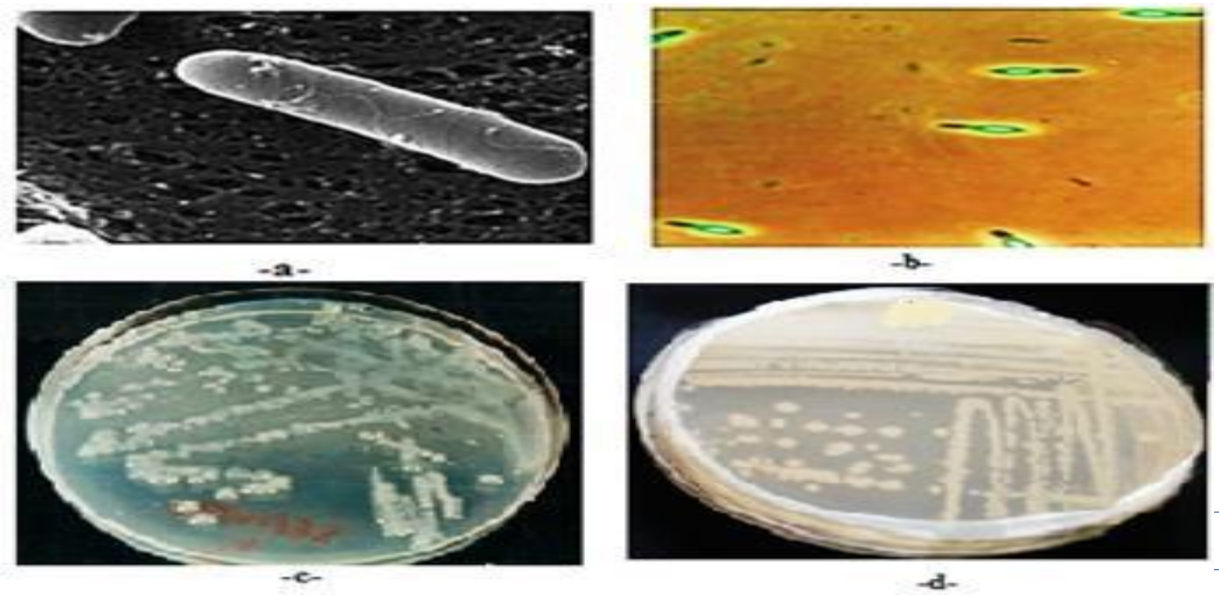
P. polymyxa synthétise des lévanes [116]à partir du saccharose et s'entoure alors d'un matériel muqueux (capsule) qui ne diffuse pas dans le milieu environnant (**Figure11c)**.

Sur gélose nutritive, les colonies sont petites et elles présentent une tendance à l'étalement **(Figure 1d).** La culture n'est pas obtenue au-dessus de 45 °C ou en dessous de 5 °C [117].

Caractères positifs : Croissance à pH 5,7, catalase, réduction des nitrates en nitrites, VP (VogesPrauskauer), hydrolyse de la caséine, de la gélatine et de l'amidon, acidification (avec production de gaz) du L-arabinose, du D-glucose, du D-mannitol et du D-xylose.

Caractères négatifs : Croissance en présence de 5 % de NaCl, indole, assimilation ducitrate, phénylalanine désaminase, dégradation de la tyrosine.

Caractères variables : Croissance en présence de 0,01 % de lysozyme (114).

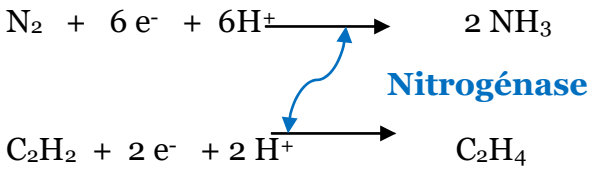


a : Micrographie au microscope électronique des cellules de*P. polymyxa* (Gr×30 000)[116].
b: *P. polymyxa* observée au microscope optique (Gr×100) à partir d'une culture sur gélose nutritive âgée de 72h. Observation des bâtonnets (forme végétative) avec spore subterminale déformante.
c :Production abondante de polysaccharide par *P. polymyxa* sur milieu YESA (Yeast Extract Starch Agar)(40g/L de saccharose) après 48heures d'incubation à 30°C.
d : Aspect des colonies de *P. polymyxa* sur gélose nutritive après 48 heures d'incubation à 30°C.
Figure 11: Observations microscopiques (microscope électronique à balayage,microscope optique) et macroscopique de *P. polymyxa*.

3.2.2. propriétés des *p.polymyxa* bénéfiques :

a. fixation d'azote:

Les bactéries fixatrices d'azote possèdent une enzyme, la nitrogénase, qui transforme l'azote moléculaire de l'air N_2 en ammonium assimilable par les plantes. La nitrogénase présente cependant une polyvalence vis à vis de plusieurs substrats. Ainsi, des activités catalytiques ont été notées sur des composés ayant dans leur structure des liaisons nitriles. La nitrogénase se révèle donc capable de transformer l'acétylène en éthylène.



Il a été montré que des souches appartenant au genre *Paenibacillus* fixent l'azote atmosphérique puisqu'elle réduisent l'acétylène en éthylène [118].
Paenibacillus polymyxa (anciennement *Bacillus polymyxa*) en est unde nombreuses rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) etconnu pour avoir une large gamme de plantes hôtes. Il a été isoléà partir des rhizosphères de blé et d'orge [119], trèfle blanc,ray-grass vivace, agropyre à crête [120], pin tordu[121]sapin de Douglas [122]haricot vert [123]et ail [124].

b. Activité cellulolytique :

L'énergie captée par les plantes sous forme de biomasse cellulosique, qui est la source de carbone la plus abondante sur terre, peut fournir une option renouvelable et alternative pour le carburant de transport[125]-[126].La biomasse cellulosique peut être hydrolyse par voie enzymatique dans le constituant D-glucose, puis fermenté en bioéthanol[127]-[128]Cependant, l'hydrolyse de la biomasse cellulosique est un processus complexe et nécessite une action synergique de trois classes de enzymes, à savoir, endoglucanases (EC 3.2.1.4), exoglucanases (EC 3.2.1.91) et -glucosidases (EC 3.2.1.21)[129]-[130].Les endoglucanases et les exoglucanases produisent des cellodextrines ou du cellobiose, et les produits résultants servent de substrat aux -

glucosidases pour produire du glucose (3, 32–34), qui sert de substrat direct pour la fermentation éthanolique.

La production d'enzymes cellulolytiques de manière rentable est cruciale pour la viabilité économique de l'éthanol lignocellulosique. Puisque un consortium d'enzymes est nécessaire pour effectuer l'hydrolyse, la construction d'enzymes bifonctionnelles est susceptible de réduire considérablement les coûts de production. ils[131]construit une série de chimères composé d'un domaine d'endoglucanase (Endo5A) et d'un domaine -glucosidase (Gluc1C) et analysé leur potentiel enzymatique. Gluc1C pour les protéines chimériques a été cloné à partir de *Paenibacillus* sp. souche MTCC 5639[132].et exprimée dans *E. coli*. Gluc1C a montré une homologie de 99% avec BglB (n ° d'accession GenBank. AAA22264) de *Paenibacillus polymyxa*[133], et son biochimie propriétés, comme le pH et la température optimaux pour l'activité enzymatique, Km et kcat se sont avérés similaires à ceux de la glucosidase de type I, comme décrit précédemment [134]-[135].

Il avait été mentionné plus tôt que la glucosidase bactérienne pourrait hydrolyser la cellodextrine[135]-[136]Gluc1C s'est avéré hydrolyser les cello-oligosaccharides avec une longueur de chaîne allant jusqu'à cinq sucres, avec une efficacité maximale vers cellobiose.

c. Activité pectinolytique :

De nombreux travaux ont montré que les souches de *P. polymyxa* sécrètent dans le milieu extracellulaire d'importante quantité d'enzymes pectinolytiques notamment la pectate-lyase (transéliminase)[136]-[137].D'autre part,[138]il existait une diversité dans les activités de la pectate-lyase, puisque les souches de *P. polymyxa* isolées du sol rhizosphérique et du sol non-rhizosphérique présentent des activités plus fortes, alors que celles du rhizoplan ont des activités plus faibles. Ces résultats laissent penser que les activités pectate-lyases plus faibles des souches du rhizoplan éviteraient une destruction trop importante des racines de la plante et empêcheraient ainsi l'établissement d'une relation de type pathogène.

d. Activité chitinolytique:

Les parois cellulaires d'un grand nombre de mycètes phytopathogènes contiennent de la chitine, un polymère de N-acétyl-D- glucosamine[139] -[140].

Plusieur travaux portant sur l'étude du rôle important joué par les enzymes chitinolytiques d'origine bactérienne dans la protection des plantes ont été publiés[141]-[142]-[143].une lyse des hyphes mycéliens du Ggt par des *Paenibacillus*, suivie d'une réduction importante de lamaladie.

La capacité chitinolytique des souches de *P. polymyxa* a été évaluée[144]en mesurant l'activité de la chitobiase. Il a pu montrer que les souches du rhizoplan sont les plus actives et qu'elles sont toutes chitobiase-positives. Dans le sol non-rhizosphérique et le sol rhizosphérique, la proportion des souches chitobiase-positives est plus faible.

Les souches de *P. polymyxa* du rhizoplan, par leur activité chitinolytique plus élevée et plus fréquente, pourraient être plus actives dans leur antagonisme vis-à-vis des mycètes phytopathogènes que les souches du sol non-rhizosphérique.

e. Activité xyloglucanase :

Dans le cadre de la recherche d'une activité xyloglucanasique, la réaction étudiée est l'assimilation. Elle se traduit par une croissance de la souche bactérienne quand le xyloglucane est utilisé comme seule source de carbone et d'énergie.

Les enzymes peuvent être divisées en deux catégories selon leur localisation *in vivo* : les endo-enzymes, sont synthétisées et utilisées entièrement à l'intérieur de la cellule; les exo-enzymes, sont des enzymes extracellulaires qui diffusent dans les milieux de culture et qui ont pour mission de « découper » les grosses molécules de nutriments, incapables de pénétrer directement dans la cellule, comme le xyloglucane[145].

f. Activité protéolytique:

P. polymyxa est caractérisé par son potentiel de production de protéases. Une équipe polonaise a purifié deux protéases extra cellulaires de deux souches de *P.polymyxa*D/13K-1 et ATCC10401 produisant respectivement comme antibiotiques la **polymyxine E,** et la **polymyxine D** [146].

Les deux protéases ont décomposé la **polymyxine E,** mais se sont avérées sans action sur la **polymyxine D** .Ces travaux suggèrent que les protéases de *P. polymyxa* pourraient être impliquées dans les mécanismes de compétitivité dans la rhizosphère, à savoir : .

-antagonisme vis-à-vis d'autres micro-organismes du sol ;

-utilisation de protéines comme source de carbone et d'azote.

g. La production d'exopolyssaccharides (EPS):

La production d'EPS n'est pas spécifique à l'espèce et chaque souche de l'espèce produit différents types d'EPS avec différentes propriétés biotechnologiques.

Les chercheurs ont observé que la culture de Paenibacillus spp. pourrait produire deux EPS différents, commerciaux et bien connus. Un de ces polymères est un EPS de type levan de *P. polymyxa* EJS-3[147]et le deuxième est de la gomme curdlan de *P. polymyxa* ATCC 21830[148].

Le levan est un polymère de fructose lié par une liaison fructofuranosidique β- (2 → 6) et est présent dans de nombreuses plantes et produits microbiens [149].

Les levans microbiens sont produits à partir d'un substrat à base de saccharose par une réaction de transfructosylation de la lévansucrase (bêta-2,6-fructane: D-glucose-fructosyl transférase, EC 2.4.1.10) par des micro-organismes.

Curdlan est un polysaccharide extracellulaire bactérien neutre sans chaînes ramifiées, composé entièrement de liaisons β- (1 → 3) -d-glycosidiques.

Curdlan est un épaississant aux propriétés thermiques gélifiantes uniques et largement utilisé dans l'industrie alimentaire.

Curdlan est biodégradable, non toxique pour l'homme et l'environnement, comestible et sa capacité croissante dans l'industrie pharmaceutique en raison de ses puissantes activités biologiques [150].

3.2.3-Abondance relative de la population de *p. polymyxa dans le sol*:

Outre l'isolement, la méthode d'immunopiégeage, a permis à [149]de réaliser une approche quantitative des populations de *P.polymyxa* dans les trois compartiments étudiés (rhizoplan, sol rhizosphérique, sol nu). Il a cherché à déterminer la part relative de la population de *P.polymyxa* au sein de la microflore cultivable, des peuplements de fixateurs d'azote et des populations de *Bacillus* sporulants producteurs de gaz. La taille de la microflore cultivable n'est pas significativement différente dans les trois compartiments, elle se situe entre 1.9 et $3.8x10^8$ bactéries/g de matière sèche. Il en est de même pour les populations de *Bacillus* sporulants producteurs de gaz, dont la taille est estimée entre 1.4 et $3.4x10^5$ spores/g de matière sèche. Les peuplements de fixateurs d'azote sont plus nombreux ($P<0.01$) dans le compartiment rhizoplan (RP) où ils sont estimés à$17.0x10^5$ bactéries/g de matière sèche, par rapport aux compartiments sol rhizosphérique (SR) et sol non rhizosphérique (SNR) dans lesquels on a dénombré 1.3 et 6.1 x 10^5 bactéries/g de matière sèche, respectivement.

Les populations de *P. Polymyxa* représentent 0.1 % de la microflore cultivable des compartiments SNR et sol rhizosphérique SR**.** Ce taux est deux fois plus élevé dans le compartiment racinaire. La contribution des populations de *P. polymyxa* au sein des peuplements de fixateurs d'azote paraît plus importante. En effet, les populations de *P. polymyxa* représentent de 40% à 100% de bactéries fixatrices d'azote suivant le compartiment étudié (SNR, SR, RP). Elles représentent donc la population majoritaire parmi la microflore fixatrice d'azote dans le sol et la rhizosphère du blé. De même, les *P .polymyxa* sont plus abondants que les spores de *Paenibacillus* producteurs de gaz, quel que soit le compartiment étudié[149].Dans sa thèse de Magister, [151]a pu montrer que le nombre de *P.polymyxa*/g de sol rhizosphérique sec obtenu dans le cas des sols anciennement cultivés avec le blé dur (10^8 bactéries/g de sol rhizosphérique sec) est nettement supérieur à la population de bactéries diazotrophes du blé décrites jusqu'à présent : 10^5 - 10^6 bactéries/g de sol rhizosphérique sec [152]et 1 à 5.10^5 bactéries/g de sol rhizosphérique sec [153].

3.2.4.Utilisation de *p. polymyxa* en biotechnologie:

P. polymyxa KF-1 a été isolé et identifié par laboratoire et conservé en Chine Center for Type Collection de cultures (numéro d'accès CCTCC AB 2018146). Il a été utilisé pour fournir le pectate PL9 gène lyase qui a étéutilisé pour dégrader les pectines de différentes plantes.

Le PL9a recombinant a été utilisé pour dégrader la pectine d'agrumes,donnant de façon reproductible la fraction MCP-0,3 qui présentait de bons effets prébiotiques in vitro.

Cette enzymepeut être un candidat valable pour la préparation de fractions de pectine de bas poids moléculaire.

La pectine présente un grand potentiel dans les domaines alimentaire, pharmaceutique etindustries des polymères[154]-[155].Des recherches récentes ont montré que la pectine a de nombreuses activités biologiques, telles que des activités anti-tumorales et antioxydantes, ainsi qu'une activité de régulation immunitaire.

Cependant, le poids moléculaire de la pectine naturelle est trop important pour être absorbé et utilisé par le corps.

La pectine modifiée avec des fragments de poids moléculaire inférieur et des degrés d'estérification inférieurs serait plus favorable à l'absorption et à l'utilisation, et pourrait potentiellement présenter une plus grande activité biologique. Des études antérieures rapportéesque la pectine d'agrumes modifiée de faible poids moléculaire (MCP) avait une plus grande activité contre le côlon, le sein etcancer gastro-intestinal, probablement dû à une diminution de l'expression de la galectine-3[156]-[157].Faible poids moléculaire. Le MCP (c'est-à-dire 3 kDa à 30 kDa) a présenté une plus grande activité anti-cancéreuse en inhibant la migration, l'agrégation,et prolifération des cellules cancéreuses par rapport au parent MCP avec des poids moléculaires supérieurs à 30kDa[168].Le MCP de faible poids moléculaire a également favorisé la croissance de *Bifidobacterium longum*, suggérantqu'il a un potentiel en tant qu'agent prébiotique.

P. polymyxa possède plusieurs propriétés bénéfiques pour les plantes hôtes, telles que la production d'antibiotiques et d'enzymes hydrolytiques, la fixation de l'azote, l'amélioration de la porosité du sol, la solubilisation du phosphore du sol et la synthèse des hormones végétales auxine et cytokinine[159]-[160].

P. polymyxa a également une large gamme d'hôtes. Par conséquent, *P. polymyxa* a été développé en tant qu'agent de lutte biologique commercial et a réussi à contrôler de nombreux agents pathogènes fongiques tels que *Botrytis cinerea*, *Fusarium oxysporum* et *Phytophthora palmivora*[161]-[162].

De plus, une étude précédente a rapporté que *P. polymyxa* a une activité de lutte biologique contre l'agent pathogène bactérien Erwinia carotovora[161].

Matériel et Méthode

III-Matériel et Méthodes

1-Matériel

1.1-Les micro-organismes :

a- Les souches bactériennes

Les souches de *P. polymyxa*SGH1et SGK2 utilisées dans ce travail ont été isolées précédemment par une méthode immuno-enzymatique «immuno-piégeage»[163]. Les deux souches avaient été identifiées et leur diversité recherchée à l'aide des différentes méthodes **API** (Analytical Profile Index), **RFLP** (Restriction Fragment Length Polymorphism) et séquençage du gène de l'ARNr 16S.[163]Les critères utilisés pour le choix de ces souches sont mentionnés dans le Tableau III.

Tableau V : Critères des deux souches SGH1 et SGK2 destinées

		Dégradation du xyloglucane	**Activité nitrogénasique ARA***
Souche	**SGK2**	+	0.1± 0.2•
	SGH1	+	7.2±0.1 •

* **:** µ moles C_2H_4 par tube après 5 jours d'incubation sous 1% C_2H_2.

• : Moyenne ± intervalle de confiance (p=0.05).

+ : Souche capable de dégrader le xyloglucane.

b-Les milieux de culture, la solution tampon et les réactifs utilisés :

Les milieux de culture, la solution tampon et les réactifs utilisés figurent en **AnnexeI.**

c-Le sol :

Le sol utilisé est un sol brun, peu lessivé. Il provient d'une parcelle de la station expérimentale (de Benchicao) de Médéa, qui se situe à la partie Nord de la région de Titteri.

- **Fiche parcellaire**

Les principales caractéristiques de la parcelle d'échantillonnage sont reportées dans la fiche parcellaire.

- **lieu de prélèvement** : station expérimentale (Benchicao-Médéa) ;
- **code de la parcelle** : B ;
- **date de prélèvement** : 01-12-2017 ;
- **surface de la parcelle** : 33 m² (5,5 m x 6 m) ;
- **nombre d'unités** : 01 seule (homogène) ;
- **profondeur** : entre 1-10 cm ;
- **coordonnées Lambert** :

. **Longitude** : X= 2°23´16 ˝E (E : Est) ;
. **Latitude** : Y= 35°54´31˝ N (N : Nord) ;
. **Altitude** : Z= 1187 m.

•**critère d'unité** :
Couleur : brune ;
Texture : homogène ;
Charge caillouteuse : petite-homogène ;
• **structure du sol** : polyédrique ;
• **type de la dernière fertilisation** : organique (fumure naturelle)



Fig 12: Echantillon du sol prélevé à partir de la parcelle étudié**Février -2020**.

2-Méthodes :2.1-Méthodes appliquées au sol :

Le préalable à toute analyse du sol est de connaître en premier lieu le but de l'opération afin de constituer les différentes déterminations à effectuer sur les échantillons du sol et les méthodes d'analyses qui leur sont affectées .De ce fait, on distingue selon les objectifs visés, trois types d'analyses :

-Analyse de caractérisation ;

-Analyse de contrôle ;

-Analyse de diagnostic.

Parmi ces trois types d'analyses, nous avons choisi la première car elle est complète en raison du grand nombre de déterminations à faire.

2-1-1-Analyse de caractérisation :

Elle est réalisée pour connaître les caractéristiques générales du sol. Cette analyse apporte suffisamment d'informations pour dresser un état de fertilité physique, chimique et biologique du sol[164].

2-1-2- Etape pré-laboratoire : C'est une étape de terrain qui consiste en une caractérisation de la parcelle au moyen d'une fiche parcellaire pour le prélèvement d'un ou de plusieurs échantillons[164].

2-1-2-1- Délimitation des unités de sols homogènes :
Les points de repères pour la délimitation de l'unité homogène sont les suivants [164].

*__couleur__ : la couleur est un élément de premier diagnostic. Si le sol n'est ni trop sec, ni trop humide, on approche d'un peu plus près les différences de couleur permettant de délimiter les unités.
*__abondancedecailloux__ : on peut délimiter les zones en fonction de la grosseur et de la quantité de cailloux qui s'y trouvent.
*__profondeur__ : la profondeur est un élément de diagnostic très important.

2-1-2-2- Prélèvement dans une unité de sol homogène :
La technique consiste à répartir les prélèvements en un endroit précis sur une surface de 100 à 200 m^2 dans l'unité homogène (parcelle homogène).
-L'échantillonnage est un mélange de 20 prélèvements effectués à l'intérieur de l'unité homogène.
-Les prélèvements seront réalisés de manière à éviter les lieux particuliers tels qu'un ancien chemin, les bordures, les bas fonds, entrée de champ, près des endroits de stockage des engrais et des amendements.

2-1-2-3- Recommandations pour le prélèvement du sol :
-La profondeur de prélèvement n'excède pas 10 cm après nettoyage de la partie superficielle (1 cm environ).
-L'échantillonnage du sol pourra se faire en toute saison, mais en évitant de le faire moins de 2 mois après l'épandage des engrais minéraux (de préférence avant l'épandage des engrais).

-Après le mélange de la terre, nous avons prélevé la quantité nécessaire destinée aux :

- **analyses physico-chimiques** (500 à 1000g de terre), dans un récipient prévu à cet effet.
- **essais d'inoculation en pots** avec une quantité importante (200 g de terre) dans un

sachet en plastique propre qui doit être soigneusement étiqueté et accompagné de la fiche parcellaire.
-Le sol a été conservé à 4°C afin de stopper la prolifération de la microflore totale cultivable [164].

2.1.3. Analyses physico-chimiques:

2.1.3.1-Granulométrie:
Afin de déterminer la classe texturale du sol étudié une analyse granulométrique est réalisée, après attaque de la matière organique à l'eau oxygénée (H_2O_2, 20 volumes). Une dispersion des particules minérales par l'Hexamétaphosphate de sodium à raison de 150g/L est pratiquée et complétée par dispersion mécanique. Le contenu des flacons est transvasé dans des éprouvettes graduées et ajusté à 1 litre avec de l'eau distillée.
Après la dispersion, nous avons récupéré les fractions sableuses (les sables fins et

les sables grossiers) par tamisage, et ensuite nous avons procédé au prélèvement à la pipette de Robinson des fractions limoneuses et de la fraction argileuse lors de la sédimentation. Les poids secs de toutes ces fractions granulométriques sont déterminés après séchage à 105°C. La proportion relative de chacune d'elles est exprimée en % et reportée sur le triangle de texture pour la détermination de la classe texturale.

2.1.3.2- La perméabilité (K):
La perméabilité exprime la quantité d'eau qui traverse un sol à l'état saturé en une unité de temps[164].
Elle est donnée en centimètre par heure (cm/h).Au laboratoire, la mesure de la perméabilité de l'échantillon du sol est une méthode indirecte d'appréciation de la stabilité structurale (sol remanié).
La perméabilité de laboratoire est réalisée par la méthode de [165].

2.1.3.3- Acidité du sol (pH eau): Le pH eau du sol ou l'acidité actuelle est une expression de la concentration en ions hydrogènes (H^+) d'un liquide surnageant dans un bécher, après agitation d'une certaine quantité de sol dans de l'eau distillée, à une température de 25°C.
Le pH eau de sol est mesuré directement par le pH mètre électrique[164].

2.1.3.4- Dosage du carbone organique par la méthode de Anne:
Le carbone de la matière organique est oxydé à chaud en CO_2 par un mélange de bichromate de potassium et d'acide sulfurique. Le bichromate étant en excès, nous avons titré cet excès à froid par une solution réductrice de sel de Mohr. On admet que l'oxygène consommé est proportionnel au carbone.

2.1.3.5- Matière organique (MO):
Comme la matière organique ne renferme que 58% de carbone, nous avons multiplié le % de C par le facteur 100/58=1.724 pour avoir le % de M.O.

C.O x 1.724 = % M.O

2.1.3.6- Le taux d'azote total (N):
L'azote total est dosé suivant la méthode classique de Kjeldahl. L'azote des composés organiques est transformé en azote ammoniacal sous l'action de l'acide sulfurique concentré à l'ébullition, qui se comporte comme un oxydant et détruit les matières organiques : le carbone se dégage sous forme de gaz carbonique, l'oxygène à l'état d'eau, l'azote est transformé en azote ammoniacal. Celui-ci est fixé par l'acide sulfurique sous forme de sulfate d'ammonium. Pour accélérer cette transformation, nous avons utilisé un catalyseur renfermant du sulfate de potassium et du sélénium.
Lorsque la matière organique est entièrement oxydée, la solution de sulfate d'ammonium obtenue est récupérée. Nous avons procédé par la suite au dosage de l'ammoniaque par distillation : l'ammoniaque est déplacé de sa combinaison par la soude, distillée et recueillie dans une solution d'acide borique ; nous le titrons avec une solution d'acide sulfurique.

2.1.3.7- Le rapport carbone organique sur azote total (C/N):
Il est utilisé comme indicateur de l'évolution de la matière organique et de l'activité biologique dans le sol[164].

2.1.3.8- La teneur en carbonate de calcium ($CaCO_3$):
Elle est déterminée par la méthode volumétrique conformément à la norme internationale de normalisation ISO (Numéro de référence: ISO 10693)[164].

2.1.3.9- La teneur en phosphore assimilable (P_2O_5):
Pour les sols basiques et calcaires, la méthode utilisée est celle de Joret Hébert selon la norme française AFNOR (numéro de référence X31-161)[164].

2.1.3.10- La teneur en potassium assimilable (K_2O) :
L'extraction du potassium se fait par solubilisation dans l'eau. Le pourcentage massique de potassium-rapporté en oxyde de potassium, K_2O est déterminé par absorption atomique de flamme (flamme air- acétylène oxydante), λ=404.5 nm[166].

2.1.3.11- La salinité d'un sol:
La conductivité électrique (CE) traduit la concentration saline totale de la solution préparée (extrait de pâte saturée ou solution sol/eau = 1/5). Elle est directement proportionnelle à la somme des ions à une certaine limite de concentration.
Elle est exprimée en dS/ m relative à 25 °C. La conductivité électrique spécifique est déterminée selon la norme internationale ISO (Numéro de référence ISO:11265)[164].

2.1.3.12- La capacité d'échange cationique (CEC):
C'est la quantité maximale de cations (Ca^{+2}, Mg^{+2}, K^+, Na^+, H^+) qu'un poids de terre donné est capable d'absorber (retenir) et d'échanger. Ces cations de charge positive sont retenus sur le complexe argilo-humique d'un sol par des charges négatives. Elle est déterminée par la méthode d'acétate d'ammonium conformément à la norme Française AFNOR (numéro de référence X31-130) ou au chlorure de cobaltihexamine, conformément à la norme Française AFNOR (numéro de référence X31-130) [164].

2.1.4- Stérilisation du sol :

Après avoir été criblé (crible à mai<2mm) et séché à l'air libre le sol prélevé est stérilisés avant leur emploi. La stérilisation sert à éliminer les micro-organismes

préexistants. L'échantillon du sol est stérilisées dans l'autoclave (120 C° pendant 1heure.

2.2-Méthodes appliquées aux micro-organismes :

2.2.1-préparation de l'inoculum bactérien :

Les inoculums bactériens ont été produits selon la méthode décrite [167]. Les deux bactéries sélectionnées (SGH1 et SGK2), ont été cultivées dans des fioles Erlen-

meyer de 250 mL contenant 50 mL de milieu LB sur agitateur rotatif à 100rpm/min à 30°C pendant 48 heures. Les cellules bactériennes ont été ensuite concentrées par centrifugation à 5000 trs pendant 15 min, lavées à trois reprises dans une solution de tampon phosphate stérile et mises en suspension dans 500 mL d'eau physiologique stérile **(Figure 13)**

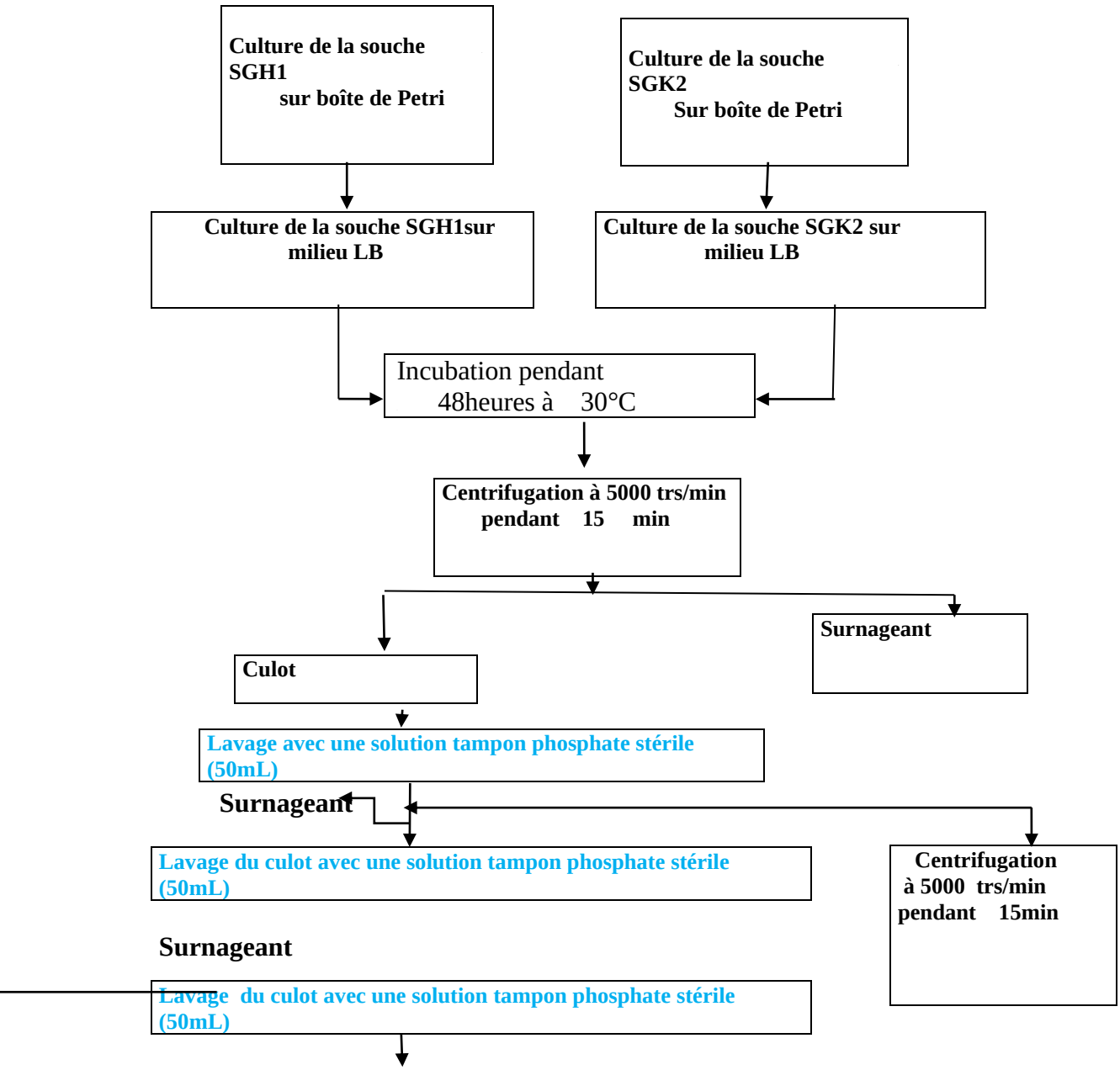


Fig13: Préparation de l'inoculum bactérien.



2.2.2-Préparation des milieux de culture :

Différents milieux de culture ont été préparé a l'aide des composantes organiques différentes :

Composition du milieu de culture	Glucides			Protéines	Lipides		Polyalcool	Phénols
	GN+ Cellulose	GN+ Amidon	GN+ Saccharose	GN+ Albumin	GN+ Twin80	GN+ Acideoléique	GN+ Mannitol	GN+ Lignine



Fig 14 : Préparation des milieux de culture.

2.2.3.Test de Décomposition de la matière organique en utilisant différentsmilieux :

Les différentes quantités d'inoculum apportées par disque étaient de 10^4, 10^6 et 10^8 bactérie /mL(DO=0.5pour une concentration mère de 10^8 bactérie /mL), en utilisant une numération directe sur spectrophotomètre λ_{max}=660nm.

A l'aide d'une pince stérile, on place les disques préalablement imbibé dans suspension de chaque souche sur les boites de pétri. On refait l'opération pour les trois concentrations, pour chaque milieu de culture. Les boites de Pétri sont incubées dans l'étuve à 30°C pendant 24h pour les deux bactéries (Tableau VI).

Tableau VI : Dispositif expérimental représente le test *in vitro* de l'activité hydrolytique des deux souches bactériennes de *P. polymyxa*.

Souche bactérienne	**Concentration bactérienne (UFC)**		
	10^4	**10^6**	**10^8**
P. polymyxa **SGH1**			
P. polymyxa **SGK2**			

- La lecture consiste à mesurer les diamètres des zones d'inhibition à l'aide d'une règle graduée, la formation d'un halo clair autour des disques est considérée comme indicateur de l'activité hydrolytique. L'indice de solubilisation (IS) est déterminé en utilisant la formule suivante :

$$IS\% = \frac{Diamètrehalo\ (mm) - Diamètredisque(mm)}{Diamètredisque\ (mm)} X100$$

2.2.4.Production des EPS par *P. polymyxa* :

Extraction de polysaccharides exo cellulaires :

Les EPS sont extraites du milieu de culture et purifiés. Tout de suite après l'incubation à 28 °C pendant trois jours, les tubes sont placés pendant15 min dans un bain à ébullition. Cette étape permet d'inactiver les enzymes capables de dégrader les polymères. Les échantillons sont ensuite refroidis à +4°C, transvidés dans des micro-tubes à centrifugation et centrifugés à 14000 g pendant 30 min à +4°C. Les culots de cellules ont été jeté et trois volumes d'éthanol 95% à +4°C sont additionnés au surnageant pour faire précipiter les polysaccharides. Les échantillons sont gardés à +4°C pendant au moins trois heures avant d'être centrifugés de nouveau pendant 20 min à +4°C à vitesse 11000g. Le culot de polysaccharides est resuspendu dans l'eau distillée et placer dans une membrane à dialyse d'un seuil d'exclusion de 6000-8000 DA.

Les échantillons sont dialysés contre de l'eau distillée pendant 24h à +4°C, avec une fréquence changement d'eau 3 fois pendant 24 heures. Cette étape permet d'éliminer les sucres résiduelles, les sels et les acides aminés du milieu de culture .Après la dialyse, le contenu des membranes est transféré dans des plats propre couvert par papier d'aluminium qui est pesé avant son utilisation (V0), étaler le contenu sur tout la surface papier d'aluminium, les plats sont placé dans une étuve à une température fixé à 50°C. Après 24h de séchage les papiers d'aluminium sont pesés deuxième fois V1 pour déterminer le poids sec de la poudre. Ensuite la poudre obtenir est destinée pour le traitement de coagulation comme les traitements par substances chimiques

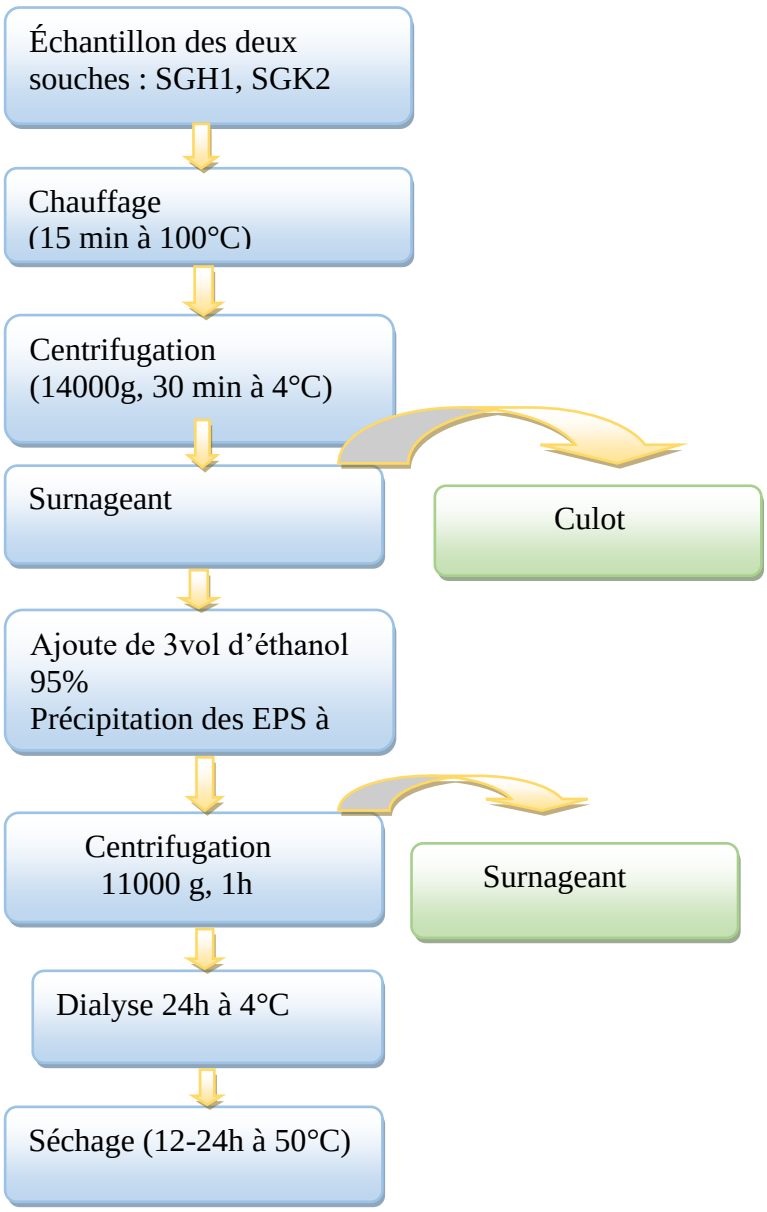


Fig 15: Protocole d'extraction des EPS des deux souches bactérienne[163].

2.2.5. Analyse du fonctionnement des souches bactériennes dans le milieu édaphique :

a. Effet de l'inoculation du sol par les deux souches bactériennes sur la teneur en matière organique:

a.1. Quantité d'inoculum apportée par pot:

Les différentes quantités d'inoculum apportées par pot étaient de 10^4 , 10^6 et 10^8 bactérie /mL(DO=0.5pour une concentration mère de 10^8 bactérie /mL).

a.2-Inoculation du sol par aspersion :

Nous avons inoculé le sol par aspersion. Avant l'apport de l'inoculum, le sol prélevé est séché au laboratoire, débarrassé des cailloux et débris végétaux, tamisé à 2mm (maille ronde) puis réparti (100 g) dans des pots de culture (8,5 cm de longueur, 8 ,5 cm de largeur, 11,5cm de hauteur).

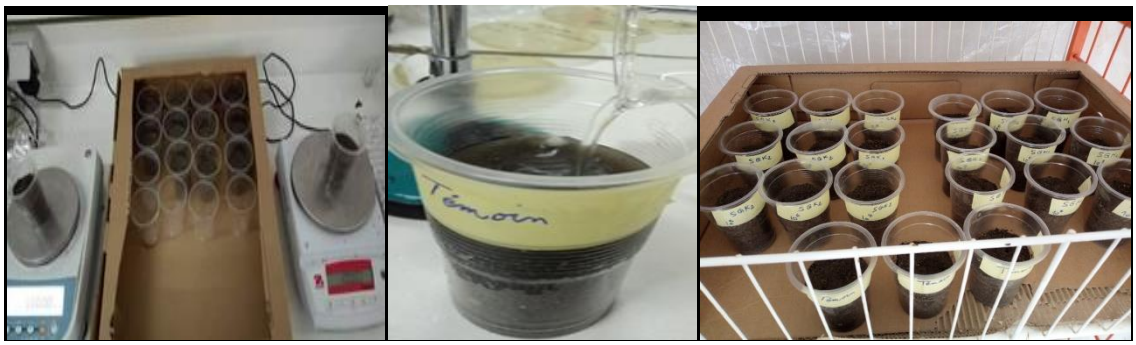


Fig 16 : Préparation du dispositif expérimentale en pots.

Le traitement contrôle est constitué des pots aspergées avec le même volume d'eau distillée stérile. Il est important de maintenir dans le sol, un niveau d'humidité (inoculum) suffisant et constant. Pour cela, la quantité d'inoculum apportée dans chaque pot en début d'expérience, représente une humidité équivalente à 60% de la capacité au champ (CAC).

(C.A.C 60 %) :

60 mL ⟶ 100%
X ⟶ 60%
CAC 60% =**36 mL**

a.3- Dispositif expérimental :

L'essai a été mis en place suivant un dispositif expérimental entièrement randomisé PER (plan expérimental entièrement randomisé).

Tableau VII: Dispositif expérimental représente l'agencement de l'essai en premier jour de l'inoculation du sol en pots (lab. de Biologie fac. Sciences).

Traitement	Inoculum	Concentration	Répétition (pots)
To	Sans bactérie	Eau physioloqique stérile	● ● ●
T1	SGH1	10^4	● ● ●
T1	SGH1	10^6	● ● ●
T1	SGH1	10^8	● ● ●
T2	SGK2	10^4	● ● ●
T2	SGK2	10^6	● ● ●
T2	SGK2	10^8	● ● ●

Les pots aspergés (inoculées) y seront déposées en ligne en les espaçant suffisamment pour éviter toute contamination éventuelle d'un pot vers un autre, le dispositif doit être maintenue (à vérifier quotidiennement) .

a.4- Conditions climatiques :

Les pots on été placés durant les premiers 24 heures dans le laboratoire de la faculté des sciences (université de Médéa) sous une température de 20 à 30°C, dans un local indifféremment clair ou obscur, ensuite les pots ont été transféré dans) l'extérieur (séchage sous des conditions climatiques naturelles) :

Tableau VIII: Condition météorologique de la station expérimentale durant 8 jours du moiss de Mars 20020 (lab universitéde Médéa).

Jours	5-3	6-3	7-3	8-3	9-3	10-3	11-3	12-3
Tmax C°	16°	22°	25°	23°	20°	23%	15%	18°
Tmin C°	4°	2°	6°	11°	6°	6°	6°	5°
Précipitation mm	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.6	4.1	0.0

a.5. Détermination de la teneur en matière organique (MO):

Après 15 jours de l'introduction des deux bactéries dans le sol on détermine le taux de MO dans chaque échantillon prélevé (pot) .par la multiplication du % de C par le facteur 100/58=1.724 pour avoir le % de M.O.

b. La capacité d'échange cationique (CEC):

C'est la quantité maximale de cations qu'un poids de terre donné est capable d'absorber (retenir) et d'échanger.

c. Le pH eau:

Le pH eau du sol ou la concentration en ions hydrogènes (H^+) d'un liquide surnageant dans un bécher, après agitation d'une certaine quantité de sol dans de l'eau distillée, à une température de 25°C.
Le pH eau de sol est mesuré directement par le pH mètre électrique.

références bibliographiques

IV. Références bibliographiques :

[1] :Ramade F.; Bourrinet P.; Remond-Gouilloud M- Pollution Encyclopaedia Universalis, Vol.18, pp. 572-596

[2] :Bever, J.D., Platt, T.G. & Morton, E.R. (2012)-Microbial population and community dynamics on plant roots and their feedbacks on plant communities. Annual Review of Microbiology, 66, 265-283.

[2] :Whipps, J.M. (2004)- Prospects and limitations for mycorrhizas in biocontrol of root pathogens. Canadian Journal of Botany, 82, 1198-1227

[3] :Cortois, R. & De Deyn, G.B. (2012) -The curse of the black box. Plant and Soil, 350, 27-33

[4] :Morgan, J.A.W., Bending, G.D. & White, P.J.(2005)-Biological costs and benefits to plant-microbe interactions in the rhizosphere. Journal of Experimental Botany, 56, 1729-1739.

[5] :Hartnett, D.C. & Wilson, W.T.(1999)- Mycorrhizae influence plant community structure and diversity in tall grass prairie. Ecology,80, 1187-1195.

[6] : Glick B.R., 1995- The enhancement of plant growth by free- living bacteria .Can .J.Microbiol.,41,109-117.

[6] : Persello-Cartieaux F.,Nussaume L. and Robaglia C.,2003 – Tales from the underground : molecular plant – rhizobacteria interactions.Plant Cell.Environ.,26,189-199

[7] : Glick B.R., Patten C.L.,Holguin G.and Penrose D.M., 1999- Biochimical and genetic mechanisms used by plant growth – promoting bacteria.London: Imperial CollegePress.

[8] :www.jardinsdefrance.org/lamelioration-du-sol-par-le-compost/

[9] : www.cfe.cornell.edu TRAUTMANN, N.; OLYNCIW, E. Compost microoganisms. Cornell compost. Oct.1998 RICHARD, T.; TRAUTMANN, N. The Science and Engineering of Composting

[10] :Thewys T, Witters A, Meers E, Vangronsveld J., 2010- Economic viability of phytoremediation of a cadmium contaminated agricultural area using energy maize Part II: Economics of anaero-bic digestion of metal contaminated maize in Belgium, Int J Phytoremediat 12: 663-679.

[11] :Sellose M, 2011 - Le sol, face cachée des écosystèmes terrestres », colloque de l'Association pour la Formation des Professeurs de Sciences de la Vie et de la Terre, "Le sol, un concept au multiples visages. Approches scientifiques, épistémologiques et didactiques", p.2.

[12] :Anton H, Michael R, Michael S-, 2008 -a pioneer in rhizosphere microbial ecology and soil bacteriology research », *Plant and Soil*, vol. 312, nos p. 7–14 .

[13] :Sergueï Vinogradski V,1949, *Microbiologie du sol, problèmes et méthodes : cinquante ans de recherches*, Masson, 863 p.

[14] :Benchetrit M,1956- Les sols d'Algérie. In: Revue de géographie alpine, tome 44, n°4, 1956. pp. 749-761; doi : https://doi.org/10.3406/rga.**1956.1790**.

[15] : Gaucher G, La classification des sols..., op. cit.

[16] :Dalloni M, 1990-Géologie appliquée, op. cit., p. 730-862, et J.-H. Durand, Les sols d'Algérie, op. cit., p. 137-153

[17] :Durant J, 1953-Etude géologique, hydrogéologique et pédologique des croûtes eu Algérie (Alger, 1953) ; compte rendu dans la Revue de Géomorpho^ logie dynamique, 1953, n° 5.

[18] :Heinrich D. Holland and Karl K., 2003 TurekianTreatise on Geochemistry

[19] :Philippe D, Pierre F, Jérôme P, Sabine H, Michel G, 2018-Introduction à la science du sol - Sol, végétation, environnement , Dunod, 352 pages.

[20] :Richard A, Pavel K, Juan-Jose I, Serghei ShobaE.2009 -Soil Terminology, Correlation and Classification , 449pages ,p89-113.

[21] :Michel-Claude G, Christian W ,Jean-Claude R,Jacques B, Jean-Louis M,2011, Sols et environnements, Regards sur le sol, Dunod, ,p 35.

[22] :Allen Marr W, 2003 - History of Progress , ASCE Publications, 2326 pages ,p911

[23] :Robert D. Holtz, William D. Kovacs,1991,Introduction à la géotechnique ,Presses inter Polytechnique, -808 pages

[24] :Lozet J, Mathieu C, 2002-Dictionnaire de Science du Sol ,Lavoisier, 2002.p15-23

[25] :Raoul C ,2003, Le sol: propriétés et fonctions. Constitution, structure, phénomènes aux interfaces, Tome 1, France Agricole Editions, - 455 pages,p 71

[26] :Pierre P ,2003 - Message terrigène et influences volcaniques au Callovien-Oxfordien dans les bassins de Paris et du sud-est de la France,Société géologique du Nord, - 362 pages, page 169

[27] : Bernard C, 1956 -Physique du sol. Chimie du sol,, page 86

[28] :Pierre Auguste J ,1837 - Dictionnaire classique des sciences naturelles Volume 1, ,Meline, Cans et Compagnie, - 640 pages, page 181.

[29] :Dagincourt D, 1890- Annuaire gëologique universel, Volume 6, ,page 1178

[30] :Raoul Calvet , 2003, Le sol: propriétés et fonctions. Constitution, structure, phénomènes aux interfaces, Tome 1, France Agricole Editions, 455 page :103

[31] :Antonio Bispo, Camille Guellier, Édith Martin, Jurgis Sapijanskas, Hélène Soubelet, Claire ChenuLes sols: Intégrer leur multifonctionnalité pour une gestion durable ,Editions Quae**, 21 nov. 2016** - 384 pages,page n:143

[32] :André Callieux, Jean Tricart, 1962, Revue de géomorphologie dynamique, Volumes 13 à 15Edition de la Société d'édition d'enseignement, page 183

[33] :Robert D. Holtz, William D. Kovacs , 1991, Inrtoduction à la géotechnique Presses inter Polytechnique, - 808 pages, p num:82

[34] :Gustave Mukoko Kalenda, 14 oct. 2014 , Comportement des sols latéritiques compactés dans les remblais et digues de retenue des rejets miniers du Katanga (RDC) Presses universitaires de Louvain, page n : 102

[35] :Clément Mathieu, Jean Lozet, 2011, Dictionnaire encyclopédique de science du sol: avec index anglais-françaisLavoisier, 733 pages .p 41-44

[36] :John Lynch, 2001, Analyse physico-chimique des catalyseurs industriels: manuel pratique de caractérisation, Editions TECHNIP, 313 pages, page:21

[37] :George Hasegawa, 4 oct. 2012 , on Porous Monolithic Materials Prepared via Sol–Gel ProcessesSpringer Science & Business Media, 208 pages, page number 1,general introduction

[38] :George Hasegawa, 4 oct. 2012 , on Porous Monolithic Materials Prepared via Sol–Gel ProcessesSpringer Science & Business Media, 208 pages, page number 2,general introduction

[39] :David W. Rycroft, M. H. Amer, 1995, Prospects for the Drainage of Clay Soils Food and Agriculture Organization of the United Nations
Food & Agriculture Org., 134 pages, p:11 à 12

[40] :Clément Mathieu, Jean Lozet ,2011, Dictionnaire encyclopédique de science du sol: avec index anglais-français, Lavoisier, 733 pages, page num:343

[41] :Raoul Calvet , 2003, Le sol: propriétés et fonctions. Constitution, structure, phénomènes aux interfaces, Tome 1, France Agricole Editions, 455 page :198 à 201

[42] :Augmar Drumond Ramos, 1978, Study of Soil Temperature Parameters as Affected by Site AspectU. of Calif., Davis, 262 pagesPage :(4,27,70)

[43] :Jean-Paul Legros, 1996, Cartographies des sols: de l'analyse spatiale à la gestion des territoires, PPUR presses polytechniques, 321 pages page n: 105

[44] :Robert D. Holtz, William D. Kovacs, 1991, Introduction à la géotechnique, Presses inter Polytechnique, 808 pagesPage n: 316

[45] :Marc Soutter, André Mermoud, André Musy, 2007, Ingénierie des eaux et du sol: processus et aménagements, PPUR presses polytechniques, 294 pages, Page num :118

[46] :Antonio Bispo, Camille Guellier, Édith Martin, Jurgis Sapijanskas, Hélène Soubelet, Claire Chenu, 2016 , Les sols: Intégrer leur multifonctionnalité pour une gestion durable, Editions Quae, 384 pages page n :124

[47] :Raoul Calvet, 2005, pesticides dans le sol: conséquences agronomiques et environnementales, France Agricole Editions, 637 pages, Page n : 240 à 249

[48] :Stevenson F , 1994, Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions, John Wiley & Sons, 512 pages page n:6

[49] :Stevenson F, 1994, Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions, John Wiley & Sons, 512 pages page n:34

[50] :Justus von Liebig, 1840, Traité de chimie organique, Volume 1, Fortin, Page 1_2

[51] :Raoul Calvet, 2005, pesticides dans le sol: conséquences agronomiques et environnementales, France Agricole Editions, 637 pages, Page n :371-372

[52] :Peter William A, Loretta J, Leroy L, 2017 , Principes de chimie, De Boeck Superieur, 1088 pages p:380

[53] :Yves Bertrand, Ghislain de Halleux,2005,Chevaux et prairies, France Agricole Editions, 2005 - 223 pages p n:21 et 22

[54] :Raoul Calvet,2005, Les pesticides dans le sol: conséquences , France Agricole Editions, **2005** - 637 pages p:222

[55] :Raoul Calvet,2003, Le sol: propriétés et fonctions. Constitution, structure, phénomènes aux interfaces, Volume 1, France Agricole Editions, 455 pages p num:371-372-373

[56] :Raoul Calvet,2003, Le sol: propriétés et fonctions. Phénomènes physiques et chimiques, applications agronomiques et environnementales, Volume 2, France Agricole Editions, 511 pages page 65_66_67

[57] :Serge Payette, Line Rochefort , 2001, Écologie des tourbières du Québec-Labrador , Presses Université Laval, 621 pages, Chapitre 8, page:183

[58] :Antonio Bispo, Camille Guellier, Édith Martin, Jurgis Sapijanskas, Hélène Soubelet, Claire Chenu , 21 nov 2016 , Les sols: Intégrer leur multifonctionnalité pour une gestion durable , Editions Quae,384 pages ,p:124

[59] :Jacques Fortin, 2001, Comprendre le climat et l'environnement, Québec Amerique, 128 pages P:92

[60] :Lydie Suty, 2014, Les végétaux: Les végétaux Les végétaux Évolution, développement et reproduction, Editions Quae, ,64 pages p:35

[61] :Raoul Étongué Mayer, 2 sep 2014 , Notions de Géographie physique
Archives contemporaines, 485 pages p:115

[62] :Jérôme Labreuche, François Laurent, Jean Roger-Estrade, 09 déc 2014 ,Faut-il travailler le sol ?: Acquis et innovations pour une agriculture durable,Editions Quae, 192 pages p n:64

[63] :GOBAT J.M., ARAGNO M. et MATTHEY W., (2003)- Le sol vivant. Bases de pédologie. Biologie des sols. Edit. Presses polytechniques et universitaires romandes. 571P

[64] :**GOBAT J.M., ARAGNO M. et MATTHEY W., (2003)** - Le sol vivant. 2èmeEdition presses polytechniques et universitaires Romandes, p. 50-64.

[65]:CHAMAYOU H. et LEGROS J. P., (1989)-Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol. Technique vivante. Presses universitaires de France. Paris. pp 212-213.

[66]:Jean-Michel Gobat, Michel Aragno, Willy Matthey,2010, Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols PPUR Presses polytechniques, 817 pages , p:80

[67]: Maurice Cassan, 2005,Les essais de perméabilité sur site dans la reconnaissance des sols, Presses des Ponts, 568 pages p: 18

[68]:William G. Hopkins,17 juin 2003 ,Physiologie végétale, De Boeck Supérieur, 532 pages p: 78

[69] :Raoul Calvet, 2003, Le sol: propriétés et fonctions. Phénomènes physiques et chimiques, applications agronomiques et environnementales, Volume 2, France Agricole Editions, 511 pages P : 462 à 468

[70] : . **Deyn GB, Quirk H, Bardgett RD. La richesse,** l'identité et la productivité des espèces végétales influencent différemment des groupes clés de microbes dans des sols de prairie de fertilité contrastée. Biology Lett. **2011**; 7 (1): 75-78

[71] :Smith FE. Le traitement des effluents industriels métallifères au Japon. Dans les actes de Sudbury. **1995;** 95: 915-924

[72] :He S, Guo Z, Zhang Y, Zhang S, Wang J, Gu N. Biosynthèse des nanoparticules d'or à l'aide de la bactérie Rhodopseudomonas capsulata. Mater Lett. **2007**; 61 (18): 3984-3987

[73] :Linford N, Linford P, Platzman E. Datation des changements environnementaux à l'aide de bactéries magnétiques dans les sols archéologiques de la haute vallée de la Tamise, Royaume-Uni. J Archaeol Sci. **2005**; 32 (7): 1037-1043.

[74] :Daly MJ. Ingénierie de bactéries résistantes aux radiations pour la biotechnologie environnementale. Curr Opin Biotech. **2000**; 11 (3): 280-285

[75] :Fredrickson JK, Gorby YA. Processus environnementaux médiés par des bactéries réductrices de fer. Curr Opin Biotech. **1996**; 7 (3): 287-294

[76] :Garcia C, Moreno DA, Ballester A, Blazquez ML, Gonzalez F. Biorestauration d'une eau de mine d'acide industrielle par des bactéries sulfato-réductrices tolérantes aux métaux. Miner Eng. **2001;** 14 (9): 997-1008

[77] :Smith S.E. & Read D. 2008. Mycorrhizal Symbiosis, third ed. Academic Press, New York.

[78] : Strullu DG et Plenchette C, (1991) Les mycorhizes en horticulture. PHM Revue Horticole. 352: 50-55

[79] :Martin, M.A.E., Gindhart, J.G., Goldstein, L.S.B., Hays, T.S., Saxton, W.M. (1997). Mutations in kinesin, dynein and p150GLUED interact to disrupt axonal transport. Mol. Biol. Cell 8(Suppl.): 261a.

[80] :Lagrange A., 2009 -Etudes écologiques et microbiologiques des espèces du genre*Costularia* (Cyperaceae) pionnières des sols ultramafiques en nouvelle Calédonie: perspectives d'application à la restauration écologique. Thèse de Doctorat en sciences. Université de la nouvelle Calédonie

[81] : Selosse M.A., Baudoin E. and Vandenkoornhuyse P., 2004 -Symbiotic micro-organisms, a key for ecological successand protection of plants. Comptes Rendus Biologies, 327,639-648.

[82] :Chakraborty R, Coates J. D.Anaerobic degradation of monoaromatic hydrocarbons. Appl Microbiol Biotechnol. **2004**.64: 437–446.

[83] :BOUSSEBOUA H., 2005. Eléments de microbiologie. Campus-Club, Algérie, (2ème Edition).

[84]:Verdin A., Lounès-Hadj Sahraoui A., Durand R. 2004. Degradation of benzo[a]pyrene by mitosporic fungi and extracellular oxidative enzymes. International Bioremediation and Biodegradation 53: 65-70.

[85] : Garcia, R., Baelum, J., Fredslund, L., Santorum, P., et Jacobsen, C. S. (2010).Influence of temperature and predation on survival of Salmonella enterica serovar Typhimurium and expression of invA in soil and manure-amended soil. Applied and environmental microbiology, 76, 5025-5031

[86] : Bui, X. T., Wolff, A., Madsen, M., et Bang, D. D. (2012). Interaction between food-borne pathogens (Campylobacter jejuni, Salmonella Typhimurium and Listeria monocytogenes) and a common soil flagellate (Cercomonas sp.). Journal o f Food Research, 1, 76

[87] :Hurst, C. J., and C. P. Gerba. 1979. Development of aquantitative method for the detection of enterovirusesin soil. Appl. Environ. Microbiol. 37:626-632.

[88] :Wellings, F. M., A. L. Lewis, C. W. Mountain, and I V. Pierce. 1975. Demonstration of virus in groundwaterafter effluent discharge onto soil. Appl. Microbiol. 29:751-757.

[89] :Tierney, J. T., R. Sullivan, and E. P. Larkin. 1977.Persistence of poliovirus 1 in soil and on vegetablesgrown in soil previously flooded with inoculated sewagesludge or effluent. Appl. Environ. Microbiol. 33:109-113.

[90] :Murphy, W. H., Jr., o. R. Eylar, E. L. Schmidt, and J. T. Syverton. 1958. Adsorption and translocation ofmammalian viruses by plants. 1. Survival of mousecephalomyelitis and poliomyelitis viruses in soil andplant root environment. Virology 6:612-622.

[91] :Bagdasaryan, G. A. 1964. Survival of viruses of theenterovirus group (poliomyelitis, echo, coxsackie) in soiland on vegetables. J. Hyg. Epidemiol. Microbiol. Immunol.8:497-505

[92] :Lefler, E., and Y. Kott. 1974. Virus retention and survivalin sand, p. 84-91. In J. F. Malina, Jr., and B. P. Sagik(ed.), Virus survival in water and wastewater systems.University of Texas, Austin.

[93] : Sagik**, B. P., B. E. Moore, and C. A. Sorber. 1978.** Infectious disease potential of land application of wastewater,p. 35-46. In State of knowledge in land treatmentof wastewater, vol. 1. U.S. Government Printing Office,Washington, D.C.

[94] :Aragno M., Rossi P., Roesti D., Fromin N. et Davanel N., 2003-Diversité et fonctions des rhizobactéries de la rhizosphère du blé:influence sur la qualité et la productivité du sol. Plant and Soil, 4, 1-6.

[95] : Bazot S., 2005 - Contribution à l'étude de l'allocation des photoassimilats récents dans la plante et la rhizosphère chez une graminée pérenne(Lolium perenne L.).Thèse de Doctorat INP**.**

[96] :Alami Y., 1997-Rôle d'une bactérie productrice d'exopolysaccharides (*Rhizobium*sp.,) dans l'agrégation du sol rhizosphérique du tournesol : conséquences de l'inoculation sur la structuration du sol et la nutrition minérale de la plante. Thèse de Doctorat de l'université Nancy

[97] : Channey K. and Swift R.S., 1986-Studies on aggregate stability.I. Re-formation of soil aggregates. Journal of Soil Science, 37, 329-335.

[98] :Hartmann A, Lemanceau P, Prosser JI (2008a) Multitrophic interactions in the rhizosphere—Rhizosphere microbiology: at the interface of many disciplines and expertises. FEMS Microbiol Ecol 65:179

[99] :McNear, D.H., Jr. 2013. The rhizosphere: Roots, soil and everything in between. Nat. Educ. Knowl. 4(3):1

[100] :Whipps JM., Lynch JM. 1985. Energy losses by the plant in rhizodeposition. Annual Process Phytochem Soc Europe 26, 59–71.

[101] : J. L Whitbeck, Z. G. Cordon, The Rhizosphere -An Ecological Perspective, eBook ISBN: 9780080493046. **(2007)** pp xi-71.

[102] :Liu N, Nguyen L, Chun RF, Lagishetty V, Ren S, Wu S, Hollis B, DeLuca HF, Adams JS, Hewison M. Altered endocrine and autocrine metabolism of vitamin D in a mouse model of gastrointestinal inflammation. Endocrinology. **2008**;149(10):4799–808.

[103] :Whipps J M 1990 Carbon economy. *In* The Rhizosphere. Ed. J MLynch. pp 59–97. John Wiley, Chichester.

[104] :Lagrange A., 2009 -Etudes écologiques et microbiologiques des espèces du genreCostularia (Cyperaceae) pionnières des sols ultramafiques en nouvelle Calédonie: perspectives d'application à la restauration écologique. Thèse de Doctorat en sciences. Université de la nouvelle Calédonie, 142p.

[105] :Richardson AE, Barea J-M, McNeill AM, Prigent-Combaret C (2009) Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. Plant and Soil 321:305–339

[106] :Priest FG, Goodfellow M, Todd C. A numerical classification of the genus Bacillus. J Gen Microbiol. **1988**;134:1847–82

[107] :Ash C, Farrow J, Wallbanks S, Collins M. Phylogenetic heterogeneity of the genres Bacillus revealed by comparative analysis of small-subunit-ribosomal RNA sequences. Lett Appl Microbiol. **1991**;13:202–6.

[108] :Ash C., Priest F.G. and Collins M.D., 1993-Molecular identification of RNAr group 3 *Bacillus* using PCR probe test proposal for the creation of a new genus *Paenibacillus*. Ant. Van Lee., 64, 253-260.

[109]:Ash C, Priest F, Collins MD. Molecular identification of rRNA group 3 bacilli (Ash, Farrow, Wallbanks and Collins) using a PCR probe test. Antonie Van Leeuwenhoek. **1993**;64:253–60

[110]:Heyndrickx M, Vandemeulebroecke K, Scheldeman P, Hoste B, Kersters K, De Vos P, et al. Paenibacillus (Formerly Bacillus) gordonae (Pichinoty et. al. 1986) Ash et al. 1994 is a later subjective synonym of Paenibacillus(Formerly Bacillus) validus (Nakamura 1984) Ash et al. 1994: emended description of P. validus. Int J Syst Bacteriol. **1995**;45:661–9

[111]:Shida O, Takagi H, Kadowaki K, Nakamura I, Komagata K. Transfer of Bacillus alginolyticus, Bacillus chondroitinus, Bacillus curdlanolyticus, Bacil-lus glucanolyticus, Bacillus kobensis, and Bacillus thiaminolyticus to the genus Paenibacillus and emended description of the genus Paenibacil-lus. Int J Syst Bacteriol. **1997**;47:289–98.

[112] :Collins MD, Lawson PA, Willems A, Cordoba JJ, Fernandez-Garayzabal J, Garcia P, et al. The phylogeny of the genus Clostridium: proposal of five new genera and eleven new species combinations. Int J Syst Bacteriol. **1994**;44:812–26

[113]:Raza W., Yong X., Wu H., Wang Y., Xu Y.C. and Shen Q., 2009 - Isolation and characterization of fusaricidine-type compound-producing strain of *Paenibacillus polymyxa* SQR-21 active against *F.oxysporum* f.s.p *nevium*. Eur. J. Plant Pathol., 125, 471-483.

[114]: Munch J.C., 1991- Nitrous oxide emission from soil as determined by the composition of denitrifying microbial population. Dev. Geochem., 6, 309-316.

[115]:Park S.Y., Kim R., Ryu C.M., Choi S.K., Lee C.H., Kim J.G. and Park S.H., 2008- Citrinin, a mycotoxin from *Penicillium citrinum*, plays a role in inducing motility of *Paenibacillus polymyxa*.F.E.M.S. Microbiol. Ecol., 65 (2),229-37.

[116]:Claus D. and Berkeley CW.,1986- The genus *Bacillus.In*:Bergey's Manuaof Systematic Bacteriology. Sneath PHA Williams, Wilkins, Baltimore, 34 (2),1105-1139**.**

[117]: Bergey's Manual of systematic bacteriology, **1984**- 1st Edition, Williams and Wilkins Publ., Baltimore.

[118]:Euzéby J.P., 1999- Dictionnaire de Bactériologie Vétérinaire.

[119]:Timmusk S., Grantcharova N., Wagner E. G. H. (2005)- *Paenibacillus polymyxa* Invades Plant Roots and Forms Biofilms. *Applied and Environmental Microbiology*, **71**: 7292-7300.

[120]:Lindberg, T., and U. Granhall. 1984. Isolation and characterization of dinitrogen- fixing bacteria from the rhizosphere of temperate cereals and forage grasses. Appl. Environ. Microbiol. **48:**683–689.

[121]:Holl, F. B., C. P. Chanway, R. Turkington, and R. A. Radley. 1988. Response of crested wheatgrass (*Agropyron cristatum* L.), perennial ryegrass (*Loliumperenne* L.) and white clover (*Trifolium repens* L.) to inoculation with *Bacillus polymyxa*. Soil Biol. Biochem. **20:**19–24.

[122]:Holl, F. B., and C. P. Chanway. 1992. Rhizosphere colonization and seedling growth promotion of lodgepole pine by *Bacillus polymyxa*. Can. J. Microbiol. **38:**303–308.

[123]:Shishido, M., H. B. Massicotte, and C. P. Chanway. 1996. Effect of plant growth promoting *Bacillus* strains on pine and spruce seedling growth and mycorrhizal infection. Ann. Bot. **77:**433–441.

[124]:Petersen, D. J., M. Srinivasan, and C. P. Chanway. 1996. *Bacillus polymyxa* stimulates increased *Rhizobium etli* populations and nodulation when coresidentin the rhizosphere of *Phaseolus vulgaris*. FEMS Microbiol. Lett.**142:**271–276.

[125] :Kajimura, Y., and M. Kaneda. 1996. Fusaricidin A, a new depsipeptide antibiotic produced by *Bacillus polymyxa* KT-8. Taxonomy, fermentation, isolation, structure elucidation, and biological activity. J. Antibiot. **49:**129–135.

[126] :Coughlan MP. 1990. Cellulose degradation by fungi. Microbial enzymes and biotechnology, 2nd ed. Elsevier, New York, NY.

[127] :Geddes CC, Nieves IU, Ingram LO. 2011. Advances in ethanol production. Curr. Opin. Biotechnol. **22**:312–319.

[128] :Clarke AJ. 1997. Biodegradation of cellulose: enzymology and biotechnology. Technomic Publishing Co., Inc., Lancaster, PA.

[129] :Dowe N. 2009. Assessing cellulase performance on pretreated lignocellulosic biomass using saccharification and fermentation-based protocols. Methods Mol. Biol. **581**:233–245.

[130] :Bhat MK, Bhat S. 1997. Cellulose degrading enzymes and their potential industrial applications. Biotechnol. Adv. **15**:583– 620.

[131] :Beguin P, Aubert JP. 1994. The biological degradation of cellulose. FEMS Microbiol. Rev. **13**:25–58.

[132] :Teeri TT. 1997. Crystalline cellulose degradation: new insight into the function of cellobiohydrolases. Trends Biotechnol. **15**:160 –167.

[133] :Stephanopoulos G. 2007. Challenges in engineering microbes for biofuels production. Science **315**:801– 804.

[134] :Adlakha N, Rajagopal R, Kumar S, Reddy VS, Yazdani SS. 2011. Synthesis and characterization of chimeric proteins based on cellulase and xylanase from an insect gut bacterium. Appl. Environ. Microbiol. **77**:4866.859–4

[135] :Gonzalez-Candelas L, Ramon D, Polaina J. 1990. Sequences and homology analysis of two genes encoding beta-glucosidases from *Bacillus polymyxa*. Gene **95**:31–38.

[136] :Hashimoto W, et al. 1998. Molecular cloning of two genes for beta-Dglucosidase in Bacillus sp. GL1 and identification of one as a gellandegrading enzyme. Arch. Biochem. Biophys. **360**:1–9.

[137] :Isorna P, et al. 2007. Crystal structures of *Paenibacillus polymyxa* betaglucosidase B complexes reveal the molecular basis of substrate specificity and give new insights into the catalytic machinery of family I glycosidases. J. Mol. Biol. **371**:1204 –1218.

[138]: Nagel C.W. and Vaughn R.H., 1961 -The degradation of oligogalacturonides by the polygalacturonase of *Bacillus polymyxa*. Arch. Bioch. Bio.Physio., 94, 328- 332.**[142]: Nagel C.W. and Wilson T.M., 1970 -** Pectic acid lyases of *Bacillus polymyxa*. Appl. Microbiol., 20, 374- 383.

[139]: Mavingui P., 1992. Adaptation des *Bacillus polymyxa* du sol à la rhizosphère du blé: approche populationnelle de la diversité. Thèse de Doctorat- Nancy I, 147p.

[140]: Chet I. and Huttermann., 1980 –Chemical composition of hyphal walls of fanes annosus. Env. J.Forest Pathol., 10,65-70.

[141]: Sivan A. and Chet I.,1989 - Cell wall composition of *Fusarium oxysporum*. Soil. Biol. Biochem.,21,869-876

[142]: Chet I., Ordentlich A.,Shapira R. and Openheim A., 1991 – Mechanisms of biocontrol of soil-borne plant pathogens by rhizobacteria. In:the rhizosphere and plant growth., 14. Keister D.L and Cregan P.B.(Eds.). Kluver Academic publ.,Nederlands.

[143]: Campbell R., 1983-Ultrastructure studies of *Gaeumannomyces graminis* in the water films on weat roots and the effect of clay the interactions between this fungus and antagonistic bacteria. Can. J. Microbiol., 29,39-45.

[144]: Campbell R. and Ephgrave J.M., 1983 -Effect of bentonic clay on the growth of *Gaeumannomyces graminis* var.*tritici* and on its interaction with antagonistic bacteria. J.Gen. Microbiol., 129.771-777

[145]: Mavingui P.,1992- Adaptation des *Bacillus polymyxa* du sol à la rhizosphère du blé: approche populationnelle de la diversité .Thèse de l'université de NancyI.pp147

[146]: Guemouri-Athmani, S.; Berge, O.; Bourrain, M.; Mavingui, P.; Thiéry, J.M.; Bhatnagar, T.; Heulin, T. Diversity of *Paenibacillus polymyxa* populations in the rhizosphere of wheat (*Triticum durum*) in Algerian Soils. *Eur. J. Soil Biol.* 36 **(2000)**149-159.

[147]:Woyczikowska B., Pass L., Gird moyn M. and Raczynska- Bojanowska K., 1973-Proteolytic degradation of polymyxins by the enzymes of *Bacillus polymyxa*. Acta Biochim. Polon., 20,285-296.

[148]:Liu, J.; Luo, J.; Ye, H.; Zeng, X. Preparation, antioxidant and antitumor activities *in vitro* of different derivatives of levan from endophytic bacterium *Paenibacillus polymyxa* EJS-3. *Food Chem. Toxicol.* **2012**, *50*, 767–772.

[149]:Rafigh, S.M.; Yazdi, A.V.; Vossoughi, M.; Safekordi, A.A.; Ardjmand, M. Optimization of culture medium and modeling of curdlan production from *Paenibacillus polymyxa* by RSM and ANN. *Int. J. Biol. Macromol.* **2014**, *70*, 463–473.

[150]:Han, Y.W.; Clarke, M.A. Production and characterization of microbial levan. *J. Agric. Food Chem.* **1990**, *38*, 393–396.

[151]: **Liu, J.; Luo, J.; Ye, H.; Sun, Y.; Lu, Z.; Zeng, X.** Medium optimization and structural characterization of exopolysaccharides from endophytic bacterium *Paenibacillus polymyxa* EJS-3. *Carbohydr. Polym.* **2010**, *79*, 206–213.

[152]: **Guemouri S., 1992**- Isolement et caractérisation des souches de *Bacillus polymyxa* isolées de différents sols algériens. Thèse Mag., U.S.T.H.B, Alger, 111p.

[153]: **Mavingui P., Laguerre G., Berge O. and Heulin T., 1991**- Diversity of*Bacillus polymyxa* associated with the wheat rhizosphere: a populational

approach.Appl. Env. Microbiol., 4, 112-117.

[154]: **Berge O., 1988-** Etude et inoculation des Bacillus fixateurs d'azote de la rhizosphère du maïs. Thèse Doc. I.N.P.L-E.N.S.A.I.A., Nancy, 236p.

[155]:**Christiaens S., Van Buggenhout S., Houben K., Jamsazzadeh Kermani Z., Moelants K.R.N., Ngouemazong E.D., Van Loey A., Hendrickx M.E.G**. Process-Structure-Function Relations of Pectin in Food. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. **2016**;56:1021–1042. doi: 10.1080/10408398.2012.753029.

[156]:**Chan S.Y., Choo W.S., Young D.J., Loh X.J**. Pectin as a rheology modifier: Origin, structure, commercial production and rheology. Carbohydr. Polym. 2017;161:118–139. doi: 10.1016/j.carbpol.**2016**.12.033.

[157]:**Liu, Y.; Dong, M.; Yang, Z.; Pan, S.** Anti-diabetic e_ect of citrus pectin in diabetic rats and potential mechanism via PI3K/Akt signaling pathway. Int. J. Biol. Macromol. **2016**, 89, 484–488.

[158]:**Ruvolo, P.P**. Galectin 3 as a guardian of the tumor microenvironment. Biochim. Biophys. Acta Mol. Cell Res. **2016**, 1863, 427–437.

[159]: **Prado, S.B.R.; Shiga, T.M.; Harazono, Y.; Hogan, V.A.; Raz, A.; Carpita, N.C.; Fabi, J.P**. Migration and proliferation of cancer cells in culture are di_erentially a ected by molecular size of modified citrus pectin.Carbohydr. Polym. **2019**, 211, 141–151.

[160]:**Lebuhn, M., Heulin, T., Hartmann, A**., 1997. Production of auxin and other indolicand phenolic compounds by Paenibacillus polymyxa strains isolated fromdifferent proximity to plant roots. FEMS Microbiol. Ecol. 22 (4), 325–334.

[161]: **Timmusk, S., Grantcharova, N., Wagner, E.G**., 2005. Paenibacillus polymyxa invadesplant roots and forms biofilms. Appl. Environ. Microbiol. 71 (11),7292–7300

[162]: **Khan, Z., Kim, S.G., Jeon, Y.H., Khan, H.U., Son, S.H., Kim, Y.H**., 2008. A plant growthpromoting rhizobacterium, Paenibacillus polymyxa strain GBR-1, suppressesroot-knot nematode. Bioresour. Technol. 99 (8), 3016–3023.

[163] :Athmani-Guemouri S., 2006-Adaptation des populations de Paenibacillus polymyxa aux racines du blé dur cultivé sur des sols algériens. Thèse de Doctorat. USTHB-Alger,189p.

[164] :Chabot R., Antoun H. et Cescas M.P., 1993-Stimulation de la croissance du maïs et de la laitue romaine par des micro-organismes dissolvant le phosphore inorganique. Can.J. Microbiol., 39 , 941-947

[165] :Cornu M., 1997- Analyses physico-chimiques sur les engrais, dans le cadre d'un laboratoire industriel de contrôle. Circuit culture, engrais, 305(6), 1-16.

[166] :Hamouni M., Touaf L. et Chekired Z., 2004- Analyse du sol, intérêt agronomique. Institut National des Sols, de l'irrigation et du drainage (INSID)-Alger, 1-28.

[167] :Henin S., Maurin M. et Mustin M., 1969- Le profit de cultural. Masson, Paris, 70p.

les Annexes

V. Annexes:

Annexe 1 :

Les milieux de culture, la solution tampon et les réactifs utilisés:
1-Les milieux de culture :

- **La gélose nutritive**

La gélose nutritive (NA) Prolabo est utilisée pour la culture, la purification et la conservation des souches bactériennes. Elle se compose comme suit :
Peptone..... 5g/L
Extrait de viande de bœuf.....3g/L
Gélose.....15g/L
pH…….....……6.8

- **Le milieu LB**

Le milieu LB de Luria Bertani (Maniatis et *al*., 1982), dont la concentration en NaCl a été diminuée , et utilisé pour la culture des souches en milieu liquide.
Sa composition est la suivante
Tryptone..... .....10g/L
Extrait de levure (Bio Mérieux)...5g/L
NaCl(Prolabo)..... 5g/L
Eau distillée (qsp)..... .....1000 mL
pH.....6.8

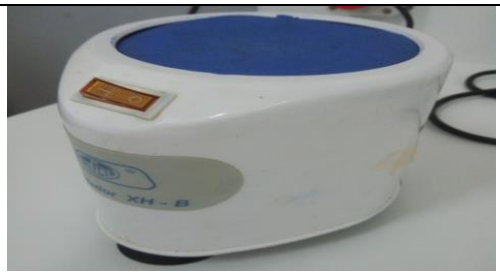
2-La solution tampon :

- **Tampon phosphate**

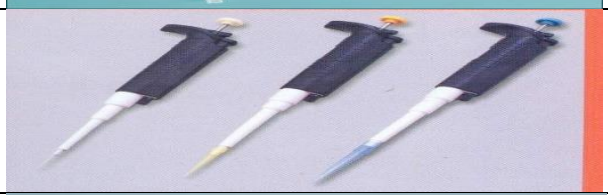
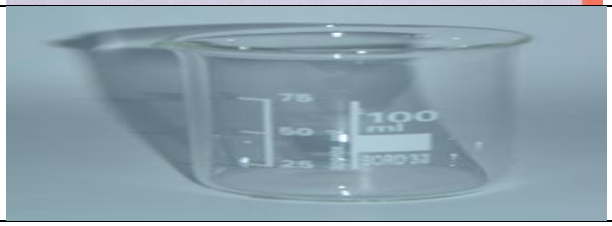
K_2HPO_4..... .....60g/L
KH_2PO_4.....40g/L
Eau distillée (qsp).....1000 mL
pH.....6.8
La stérilisation des milieux de culture et de la solution tampon se fait par autoclavage à une température de 120 C° pendant 20 minutes.

Annexe II :1-Liste du matériel utilisé durant les étapes du traitement:

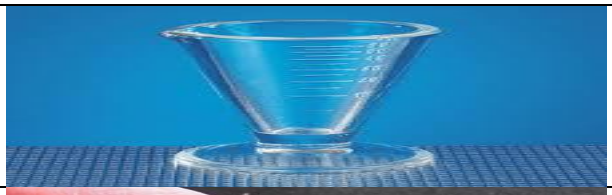
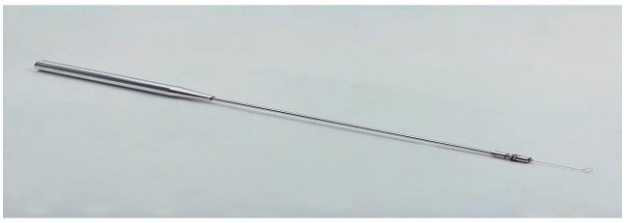
Instruments	Utilisation	Type d'appareillage
1- Bec bensène	Pour assurer une stérilisation instantanée.	
2- Bain marie	pour la transfusion des milieux de culture	
3-Autoclave	stérilisation á la vapeur	
4-Réfrigérateur	conservation des souches et des réactifs	
5-Microscope optique	Observation des micro-organismes	
6-Balance de précision	Pèse les produit et les composantes des milieux	

7-Agitateur magnétique de type vortex	Agitation et homogénéisation des solutions	
8-Incubateur	Incubation des cultures de micro-organismes	
9-Centrifugeuse	Séparation des fractions des solutions	

2-Verrerie :

1-Pipettes Pasteur et pipettes en plastique	-pour l'inoculation et l'ensemencement -coloration de Gram	
2-Micropipettes	pour une prise très précise	
3-Bechers á différents volumes	Contenir les solutions, les suspensions	

L'Annexes

4-Verre á pied (200cc, 60cc)	Utilisation pendant la filtration	
5-Lames et lamelles	Faciliter l'observation microscopique	
6-Tubes à essai	Préparation des dillutions des suspensions bactériennes	
7-Boites de Pétri	Mise en culture dans des milieux nutritifs	
8-Anse de platine	Ensemencement des colonies bactériennes	
9-Portoirs	Porte les tubes à essai	
10-Poires	Aspirer les solutions	