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

Présenté Par : - Kaouar Lynda Yasmine

- Mekati Siham

THEME :

Dynamique des populations microbiennes de *Paenibacillus polymyxa*, interactions et gestion de la qualité physique des sols Algériens.

Soutenu publiquement le : 25 / 06 / 2020, devant le jury composé de :

M^{r} : kirdi B	MAA	A l'U.Y.F.M	Président.
M^{r} : Chami B.	MAA	A l'U.Y.F.M	Promoteur.
M^{r} : Ainas M	MCB	A l'U.Y.F.M	Examinateur.
M^{r}: Bennadji M	MAA	A l'U.Y.F.M	Examinateur.

Année universitaire : 2020-2021

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord le bon Dieu qui m'a donné le courage et la patience pour terminer ce modeste travail.
Je tiens à exprimer mes remerciements et ma profonde gratitude à notre encadreur Mr Chami B Pour sa prise en charge et ses bons conseils,
qui ont abouti à l'élaboration d'un travail qui, nous l'espérons, sera satisfaisant.

Je remercie les membres du jury qui m'ont honoré on acceptant d'examiner ce travail.
Mr kirdi B qui m'a fait l'honneur de présidé ce jury.
Mr Ainas M d'avoir d'accepté de faire partie du jury .
Mr Bennadji qui m'a fait le grand honneur d'accepter de faire partie du jury.

Mes sincères remerciements vont également à toute l'équipe du service du laboratoire du département science de la nature et de la vie, pour leur précieuse aide et collaboration.
Et enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

DÉDICACE

Je dédie ce Mémoire à :

Mon Père.

La lumière de mes jours, la source de mes efforts et mon bonheur ;

Ma mère

Celles qui m'ont toujours aidée, écoutée, soutenue et encouragée tout au long de mon parcours; celles qui ont toujours été présentes pour moi.

A mon cher frère Mohamed Anis

Ceux qui ont plus particulièrement assuré le soutien affectif de ce travail :

Tous mes cousines particulièrement : Noudjoud ; Rihab ; Hayet et Hanane

A tous ma famille

A mon aimable binôme Siham

Tous ceux que j'aime et tous ceux qui me sont chers.

Tous ceux avec qui j'ai passé des bons moments durant toute ma vie.

yasmine

DÉDICACE

Je dédie ce Mémoire à :

L'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu le garde dans son vaste paradis ;

Mon Père elhadj moussa (mohamed)

La lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ;

Ma mère

Celles qui m'ont toujours aidée, écoutée, soutenue et encouragée tout au long de mon parcours; celles qui ont toujours été présentes pour moi, Mes très chers frères et sœurs.

Ceux qui ont plus particulièrement assuré le soutien affectif de ce travail :

Mon marie

Ma fille Elina

A mon aimable binôme yasmine

Tous ceux que j'aime et tous ceux qui me sont chers.

Tous ceux avec qui j'ai passé des bons moments durant toute ma vie.

Siham

Sommaire

Sommaire……..…….…….I
Liste des abréviations ……...…….…….VI
Liste des figures……..…….....VII
Liste des tableaux ……..... .IX
Introduction ……..01

Chapitre I –synthèse bibliographique

1- le sol……03
1.1-Aspects historiques: ...……03
1.2-Les différents types des sol au niveau national **:** ……..04
a- le sol salonneux : ……..04
b- le sol argileux : ……..…05
c- le sol humifére(organique) : ……..……05
d- Le sol calcaire : ……05
e- Le sol franc : ……05
1.2.1- Répartitition géographique des différents types des sols en Algérie: 05
1.3-Etude pédologique : ……...……07
1.3.1-Pédogeneèse: ……..…….....07
1.3.2-Classification: ……..……...….08
1.3.3.Caractéristiques du sol : ……..……09
1.3.3.1. Caractères physiques ……...…09
a. Structure : ……09
b.Texture : ……10
c.Perméabilité du sol à l'eau et à l'air : ……10
d. Rétention de l'eau Sous forme de vapeur ou liquide: ……...……10
e. Porosité : ……...……10
f. Connectivité : ……11
1.3.2.2. Caractères chimiques ……...……...……11
a. Capacités d'échange cationiques et anioniques : ……...……..11
b. pH du sol : ……...……...……..11
c. Matière organique : ……...……...……11
d. Teneur en éléments nutritifs……...…….....…12
1.4-Cycle biogéochimique des éléments chimiques dans le sol: ……..……12
1. Cycle de L'azote: ……...……..…12

2- Cycle du carbone : ……13
3 – Cycle de L'oxygène ……14
4- Cycle de L'hydrogène ……15
5 Cycle du Soufre ……16
6. Cycle de Phosphate ……17
1.5. L'eau dans le sol ……18
1.5.1. Les types d'eau dans le sol ……19
a. L'eau de constitution ……19
b. L'eau en phase vapeur ……19
c. L'eau hygroscopique ……19
d. L'eau pelliculaire ……19
e. L'eau capillaire ……20
f. L'eau libre ou gravifique ……20
1.6-Importance écologique du sol: ……20
1.7-. Problèmes écologiques des sols :……21
1.7.1- Erosion des sols ……21
1.7. 1. 1. Types d'érosions des sols ……21
a. Érosion hydrique ……21
b-Érosion éolienne ……25
c. Érosion liée au travail du sol ……26
2. Micro-organismes telluriques : ……26
2.1 -Les bactéries saprophytes : ……27
2.1.2- Les mycorhizes : ……27
2.1.3. Les champignons ……27
2.1.4. Les protozoaires ……28
2.1.5. Les virus ……28
2.2 – Interaction :sol - plantes –microorganismes ……28
2.2.1-Définition de la rhizosphère: ……28
2.2.2. Différentes parties de la rhizosphère ……28
a- L'ectorhizosphère ……29
b- L'endorhizosphère……29
2.2.3-La rhizodéposition: ……29
a- Les exsudats ……30

b-Les sécrétions ……30
c- Le mucilage……30
d- Les lysats……30
e-Les gaz ……30
2.2.4 -Localisation: ……30
2.2.5- Composition : ……31
a- Les composés volatils: ……31
b- Les composés solubles: ……31
c- Les composés insolubles :……31
d- Les débris cellulaires: ……31
2.2.6- L'effet rhizosphère: ……31
2..2.7. Influence de la plante sur la rhizosphère: ……32
2.2.8. Influence des rhizobactéries sur le sol: ……32
3-La rhizobactérie P.polymyxa : ……33
3.1-Création du genre : ……33
3.2-Evolution récente du genre : ……33
3.3-Description du genre : ……34
3.4-L'espèce P.polymyxa : ……35
3.2.1-Description de l'espèce : ……35
3.2.2-Classification ……37
3.2.3- Propriétés des *P. polymyxa* ……37
a-Fixation d'azote ……37
b-Activité cellulolytique ……38
c-Activité pectinolytique ……39
d-Activité chitinolytique ……40
e-Activité xyloglucanase ……41
f-Activité protéolytique ……42
g-Production de phytohormones ……42
h-Effet de la production d'exopolysaccharides par *P.polymyxa* sur le sol ……42
3.2.4-Abondance relative de la population de P.polymyxa parmi les peuplements de bactéries telluriques: ……43
3.2.5- ***P. polymyxa*** **outil en biotechnologie :**……44

4-Matériel et Méthodes ……..……...……46
4-1-Matériel ……46
4.1-Les micro-organismes……...……...……46
a- Les souches bactériennes ……..……...……46
b-Les milieux de culture, la solution tampon et les réactifs utilisés……46
c-Le sol : ……..…….……46
4-2-Méthodes : ……...……..47
4-2.1-Méthodes appliquées au sol : ……..……..……47
4-2-1-1-Analyse de caractérisation : ……..……...……48
4-2-1-2- Etape pré-laboratoire : ……..…..……48
4-2-1-2-1- Délimitation des unités de sols homogènes : ……48
4-2-1-2-2- Prélèvement dans une unité de sol homogène : …….....……48
4-2-1-2-3- Recommandations pour le prélèvement du sol : ……..……..49
4-2.1.3. Analyses physico-chimiques: ……..…….……...…49
4-2.1.3.1-Granulométrie: ……..……...……49
4-2.1.3.2- La perméabilité (K): …….……...…50
4-2.1.3.3- Acidité du sol (pH eau): ……..……50
4-2.1.3.4- Dosage du carbone organique par la méthode de Anne: ……..……..……50
4-2.1.3.5- Matière organique (MO): …….…….…...…50
4-2.1.3.6- Le taux d'azote total (N): ……...…….....51
4-2.1.3.7- Le rapport carbone organique sur azote total (C/N): ….……..……51
4-2.1.3.8- La teneur en carbonate de calcium (CaCO3): …….……51
4-2.1.3.9- La teneur en phosphore assimilable (P2O5): ……...……...……51
4-2.1.3.10- La teneur en potassium assimilable (K2O) : ……...……..……51
4-2.1.3.11- La salinité d'un sol: ……..……...…52
4-2.1.3.12- La capacité d'échange cationique (CEC): ……...……...…52
4.2.1.4- Stérilisation du sol : ……...…52
4.2.2-Méthodes appliquées aux micro-organismes : ……...……52
4.2.2.1-préparation de l'inoculum bactérien : ……...……..52
4.2.2.4.2-Quantité d'inoculum apportée par pot: ……..……...…53
4.3.6.1-Inoculation du sol par aspersion ……..…55
4.3.6.2-Conditions climatiques : …….……55
4.3.6.3- Dispositif expérimental …….……..……55
4.3.7-Dynamique des souches bactériennes dans le milieu édaphique : …….……56

4.3.7.1. Production des EPS par P. polymyxa : **…….……...…...56**
4.3.7.2. Effet de l'introduction des deux souches sur les caractères physiques du sol **.....…57**
a. Appréciation de la texture : **……...……57**
b. Détermination des paramètres physiques : **……...……..58**
b.1.Indice de battance : IB **……...……58**
b.3.La stabilité structurale : IS **……...…….…….59**
b.4. le potentiel matriciel hydrique : **……...…….……61**
b.4.1.Capacité de stockage pour l'eau : CSE**……...……...…61**
b.4.2.La perméabilité : **…….……...….61**
b.4.3.Réservoir utilisable maximale (RUM) **…….……...……62**
Bibliographiques **……...……..64**
Annexes

Liste d’abréviations :

U SCS : Unified Soil Classification System

LPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

G.T.R: Guide des terrassements routier

CEC: La capacité de retenir des cations

CEA: La capacité de retenir des anions

M.O.F La matière organique fraîche

EPS : Exopolysaccharide

IAA : L’acide indole-3-acétique

TOL : L’indole 3 éthanol

RP : Rhizoplan

SNR : Sol non rhizosphérique

SR sol rhizosphérique

LB: Luria Bertani

Liste des figures et tableaux

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.	**6**
Figure 2 : Schéma représentatif des principaux processus de pédogenèse.	**7**
Figure 3: Classification triangulaire des sols fins (contenant moins de 30% d'éléments de diamètre supérieur à 2 mm	**8**
Figure 4 : Cycle biogéochimique de l'azote	**13**
Figure 5 : Cycle biogéochimique du carbone.	**14**
Figure 6 : Cycle biogéochimique de l'oxygène.	**15**
Figure 7 : Cycle biogéochimique du souffre.	**17**
Figure 8 : Cycle biogéochimique du phosphate.	**18**
Figure 9 : Force érosive de l'eau.	**25**
Figure 10 : Force érosive du vent dans un champ non protégé	**25**
Figure 11 : L'érosion liée au travail du sol entraîne un déplacement progressif du sol vers le bas de la pente.	**26**

2. Micro-organismes telluriques

Figure 12 : Différentes parties de la rhizosphère.	**29**

3-La rhizobactérie *Paenibacillus polymyxa*

Figure 13 : Observations microscopiques (microscope électronique à balayage, microscope optique) et macroscopique de *P. polymyxa*.	**36**

II- matériel et méthodes

Figure 14 : Préparation de l'inoculum bactérien	**55**
Figure 15 : Préparation du dispositif expérimentale en pots.	**56**
Figure 16 : Dispositif expérimental représente l'agencement de l'essai en premier jour de l'inoculation du sol en pots (lab. de Biologie fac. Sciences).	**57**
Figure 17 : Protocole d'extraction des EPS des deux souches bactérienne .	**58**

Liste des tableaux

Partie	Page

I –Généralités

Tableau I : Historique de l'évolution de la science du sol	**3**
Tableau II : Evolution du genre *Paenibacillus*.	**33**

II- matériel et méthodes

Tableau III : Critères des deux souches SGH1 et SGK2 destinées	**47**
Tableau IV : Appréciation de l'indice de battance	**59**
Tableau V : Appréciation de la charge en éléments grossier : %EG	**60**
Tableau VI: Appréciation de la stabilité structurale : IS	**62**

Résumé :

Le sol est une fine couche de matières minérales et organiques qui permettent la rétention et la circulation de l'eau et de l'air à la surface de la terre. Cette fine couche, dont l'épaisseur varie de quelques cm à quelques m, fait vivre pratiquement toutes les formes de vie de la planète. Le sol est une ressource « non-renouvelable » qui, lorsqu'il subit une forte érosion, est perdu à l'échelle de millénaires.
Aujourd'hui, l'érosion des sols participe à plusieurs grands problèmes environnementaux qui perturbent la planète.

La dégradation du sol provoque inévitablement une perte d'habitat pour divers espèces à la surface de la terre et dans l'écosystème, 'la perte du sol 'dans les milieux semi-arides conduit à la création de vastes zones « stériles » et des conditions de sécheresse aggravée par une augmentation du ruissellement et par la diminution de la réserve hydrique du sol où l'augmentation de l'érosion joue un rôle important dans la dégradation de ces environnements.

Ce travail, a pour but de présenter de manière expérimentale le thème de l'écologie microbienne des sols, de l'analyse pratique de l'influence des deux souches bactériennes de *Panibacillus polymyxa* SGH1 et SGK2 dans la gestion de la qualité physique et la conservation des sols.

Mots clés : Sols Algériens; Erosion; *Paenibacillus polymyxa*

Abstract :

The soil is a thin layer of mineral and organic matter that allows the retention and circulation of water and air to the surface of the earth. This thin layer, whose thickness varies from a few cm to a few m, makes live practically all the life forms of the planet. Soil is a "non-renewable" resource that, when heavily eroded, is lost on a millennial scale.

Today, soil erosion contributes to several major environmental problems that are disruptive to the planet. Soil degradation inevitably leads to habitat loss for various

This work aims to present in an experimental way the theme of the microbial ecology of soils, of the practical analysis of the influence of the two bacterial strains of Panibacillus polymyxa SGH1 and SGK2 in the management of physical quality and soil conservation.

Keywords: Algerian soils; Erosion; *Paenibacillus polymyxa*.

ملخص :

التربة عبارة عن طبقة رقيقة من المواد المعدنية والعضوية التي تسمح باحتفاظ وتداول الماء والهواء على سطح الأرض. توفر هذه الطبقة الرقيقة ، التي يتراوح سمكها من بضعة سنتيمترات إلى بضعة أمتار ، الحياة لجميع أشكال الحياة على الكوكب. التربة هي مورد "غير متجدد" ، عندما تتعرض للتآكل الشديد ، تضيع على نطاق آلاف السنين.

اليوم ، ينطوي تآكل التربة على العديد من المشاكل البيئية الرئيسية التي تزعج الكوكب .

يؤدي تدهور الأراضي حتمًا إلى فقدان موائل لأنواع مختلفة على سطح الأرض وفي النظام البيئي ، ويؤدي "فقدان التربة" في البيئات شبه القاحلة إلى إنشاء مناطق "قاحلة" كبيرة و تفاقمت ظروف الجفاف بسبب زيادة الجريان السطحي وانخفاض احتياطي لمياه التربة حيث تلعب زيادة التآكل دورًا مهمًا في تدهور هذه البيئات.

يهدف هذا العمل إلى أن يقدم بطريقة تجريبية موضوع علم البيئة الميكروبي للتربة ، والتحليل العملي لتأثير سلالتي البكتيريا من Panibacillus polymyxa SGH1و SGK2 في إدارة الجودة الفيزيائية والمحافظة على التربة.

الكلمات المفتاحية: التربة الجزائرية ؛ التعرية ؛ Paenibacillus polymyxa

Introduction

I. Introduction :

Les sols ne sont pas que cette chose brune qui colle aux semelles. Ils forment un monde en soi, un écosystème méconnu et pourtant très riche de vie. Il est vrai que ce dernier est formé majoritairement d'êtres microscopiques, et que la terre est assimilée aux rites funéraires. Les sols rendent pourtant de multiples services insoupçonnés : production d'aliments, régulation du cycle et de la qualité de l'eau, accumulation du carbone, limitation de l'effet de serre, recyclage des matières organiques, entretien de la biodiversité, fourniture de matériaux de construction et industriels.

Les sols sont le résultat de l'altération de la roche superficielle par des facteurs abiotiques (géologiques) et biologiques. Se crée ainsi une couche de quelques décimètres ou mètres, au bout de plusieurs milliers ou dizaines de milliers d'années. La vie dans le sol est à la fois intense et variée. On estime à deux millions le nombre d'espèces de bactéries et de champignons. Ils nourrissent une faune de vers, nématodes, tardigrades… Ces êtres décomposent la matière organique, formant des éléments assimilables par les plantes grâce à leur réseau racinaire.

Les sols sont des systèmes multiphasiques complexes et hétérogènes, en raison de sa composition et de l'activité biologique qui s'y déroule **[1],** à l'intérieur du substances minérales et organiques, de gaz et d'eau se déroule simultanément des phénomènes de dégradation et de synthèse à cause de son hétérogénéité , il abrite des populations de micro-organismes, a des particularités biologiques et biochimiques très divers. l'activité de ces populations est influencées par divers facteurs : température, pH, profondeur du sol , humidité et présence des substances organiques et inorganiques **[2].**

Malheureusement, l'équilibre des sols est menacé par l'action humaine qui les exploite à court terme. L'Union européenne a repéré huit menaces sur les sols : **érosion, tassement, salinisation, perte de matières organiques, perte de biodiversité, contamination, imperméabilisation, inondations, glissements de terrain**.

« Les sols sont fragiles et malheureusement non renouvelables à l'échelle humaine **»**.

La diversité microbienne est une ressource majeure pour les produits et procédés biotechnologiques. Les bactéries sont le groupe le plus dominant de cette diversité qui produit une large gamme de produits d'importance industrielle. *Paenibacillus polymyxa* (anciennement *Bacillus polymyxa*), un bacille non pathogène et endospore, est l'une des

bactéries anaérobies facultatives les plus importantes du point de vue industriel. Il se produit naturellement dans le sol, la rhizosphère et les racines des plantes cultivées et dans les sédiments marins.

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 lutte biologique contre les mycètes et les bactéries pathogènes du sol.

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

- **D'étudier la dynamique des deux souches bactériennes de *P. polymyxa* SGH1 et SGK2 dans le milieu édaphique.**
- **De contrôler l'impact de l'introduction des deux bactéries sur la modification des caractères physiques du sol testé.**
- **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 physique du sol de la zone de Médéa (Algérie).**

Chapitre I

I-Généralités

1-Le sol

1.1-Aspects historiques:

L'histoire des idées et des méthodes d'étude mises en œuvre dans un domaine scientifiquement de mieux comprendre les connaissances d'aujourd'hui. C'est pourquoi ce paragraphe revient sur les étapes marquantes de l'évolution de la science du sol .toutefois, il ne s'agit pas ici de se substituer à l'historien ou au pédologue historien, mais seulement de faire appel à leurs principaux travaux. Beaucoup d'information sont tirées de l'ouvrage très complet de **[3]**, histoire des pédologues et de la science des sols, mais aussi, entre autres, des textes de **[5] (Tableau I).**

Tableau I : Historique de l'évolution de la science du sol **[3].**

Dates	Auteurs	Connaissances	Ouvrages
500 av.J.C. a 400 av.J.C.		Peu de Connaissances, mais l'agriculture utilise les sols perception par les agriculteurs chinois de la variété des sols	
1er Siècle	Auteures grecs	Perception du role des sols dans la croissance des plantes et de l'importance de l'eau	Denatura pueri : premier écrit de science du sol
1500	Columelle Pline l'Ancien	Première approche du rôle des sols dans la nutrition des végétaux	Dere rustica
	Bernard palissy	Le sol est reconnu comme la source d'élément inorganique des plantes	Traité des sels divers et de l'agriculture
1830	J-B .Boussingault	Perception du caractère pluridisciplinaire de la science du sol	Economie rurale considérée dans ses rapports avec la chimie ,la physique et la météorologie
1840	Justus von Liebig	Théorie de la nutrition minérale des végétaux	Chimie organique appliquée a la physiologie végétaleet à

			l'agriculture
1860	S.N. Winogradsky	Début de la microbiologie des sols	
1870	E.W. Hilgard	Publication d'un traité de géologie qui est l'un des fondements de la pédologie	Report on the geology and Agriculture of the state of mississipi
1900	V.V .Dokoutchaev et l'école russe	Enoncé des principes de base de la description des sols et de leurs genèses. -Première classification des sols	Revue Pochvovedeniye PREMIER livre exposant les idées de VV Dokoutchaev par HSibirtzev
	Sir John RUSSEL	Description des relations sols/plantes	Soil Conditions and Plant Growth
	C.F.Marbut	Propose une classification des sols	
	H.Darcy, E.Buckingham, L.J.Briggs;	Hydrostatique et hydrodynamique du sol	
1940	H.Jenny	Le sol considéré comme un écosystème	The Soil Resource

1.2-Les différents types des sols:

Les sols forment la couche supérieure de l'écorce terrestre. Ils sont le résultat de l'action de facteurs climatiques et biologiques sur les matériaux géologiques. Leur nature et leurs propriétés déterminent notamment leurs aptitudes agronomiques et forestières, avec des conséquences directes sur l'utilisation du territoire et la structure des paysages **[4].**

a .Le sol sablonneux :

Le sol sableux (nommé aussi sol siliceux) est constitué d'au moins **70%** de sable, il est de couleur ni trop claire ni trop foncée et a une texture assez rêche. Il est facile à travailler mais ne retient pas l'eau. Très difficile, voire impossible à compacter, elle file entre les doigts.

Le sol sablonneux se réchauffe assez rapidement du fait qu'il ne retient pas l'eau, il est sec et pauvre car il laisse filer les nutriments de la terre du fait qu'il est perméable à l'eau.

b. Le sol argileux :

Le sol argileux est un sol lourd, humide, collant, impact, qui retient l'eau, mais qui évite aussi le dessèchement. On reconnait ce type de sol par la présence pâquerettes, liserons, boutons d'or.

c. Le sol humifère (Organique) :

C'est un sol fertile, il est de couleur foncée et est plutôt compact, ressemblant au sol argileux mais avec un apport nutritif bien plus élevé.

Ce type de sol est assez gluant par temps de pluie et se tasse vite. Son défaut : son acidité qui peut limiter la plantation de certaines espèces.

d . Le sol calcaire:

De couleur clair, c'est un sol qui est sec et très friable en été et peut vite devenir boueux lors de grosses averses ; l'eau y pénètre facilement, il s'assèche vite dès les premiers rayons de soleil. Enfin, il draine l'eau mais aussi les nutriments de la terre, donc moins d'apports nutritifs pour les plantes. Il se travaille assez bien dès le printemps.

e. Le sol franc :

Ce type de sol est un mélange équilibré de ces 4 types de sol qui en fait le sol idéal pour toutes sortes de cultures florales ou potagères **[5] .**

1.2.1- La diversité des sols en Algérie :

La classification des sols de l'Algérie de Del Villar **(1956)** est fondée sur la définition d'un certain nombre de «types», selon la méthode classique. Mais, adaptée aux sols méditerranéens, au lieu de se fonder sur la structure ou le degré de lessivage, elle est fondée sur la distinction du métabolisme propre de chaque type de sol, métabolisme variant d'après sa composition et le milieu. Ainsi, trois grands types de sols sont distingués en Algérie : **types sodiques** (sols salins ou alcalins), **types calcaires** (les plus répandus) et **types sialferriques** (correspondant aux pédalfers de la classification de Robinson), Classification plus systématique que la précédente et sans doute plus rationnelle, mais orientée plutôt vers une nomenclature d'échantillons typiques que vers l'étude des combinaisons, des rapports du sol et du milieu, et de l'extension spatiale des différents sols en Afrique du Nord. D'où la

difficulté pour le géographe d'utiliser les travaux de Del Villar. Le sol, élément du milieu où il exprime l'équilibre entre le jeu de plusieurs facteurs antagonistes de pédogenèse, actifs (climat, végétation) et passifs (roche-mère, modelé), doit être défini comme tel et non comme une entité analysée comme un simple corps chimique. Ce qui fait le grand intérêt de l'ouvrage deM. Durand pour les géographes, c'est que c'est précisément une optique essentiellement géographique qui a guidé son étude.

En effet la classification des sols d'Algérie qu'il présente est d'abord fondée sur le facteur climatique qui a joué le rôle essentiel dans la formation du sol (vent, pluie, température), ensuite sur le degré d'évolution du sol (nombre d'horizons différenciés), enfin, accessoirement, sur le degré de lessivage. Les sols d'Algérie peuvent ainsi être regroupés, en fonction du facteur climatique dominant dans leur formation, en trois grands groupes de sols zonaux ayant chacun leurs caractères propres déterminés par les conditions du milieu commandant les processus de pédogenèse :

— Sols sahariens où le facteur dominant de formation des sols est le vent (mais peut-on considérer comme négligeable, comme le dit l'auteur, la température et la sécheresse qui permettent justement l'action du vent);

— Sols des régions semi-arides où le sol zonal serait dû à l'équilibre climatique vent-pluie (ou plus exactement à l'équilibre : action du vent résistance de la végétation);
— Sols des régions telliennes humides où humidité et végétation deviennent les principaux facteurs de formation des sols zonaux. Il serait d'ailleurs peut-être plus juste de les qualifier d' « extra-zonaux » ou mieux de sols locaux, car ces sols se forment non pas sous l'influence de facteurs « azonaux », mais bien de facteurs locaux qui créent, à l'intérieur d'une zone climatique, des microclimats donnant à l'évolution du sol des conditions spéciales **(Figure 01)**.

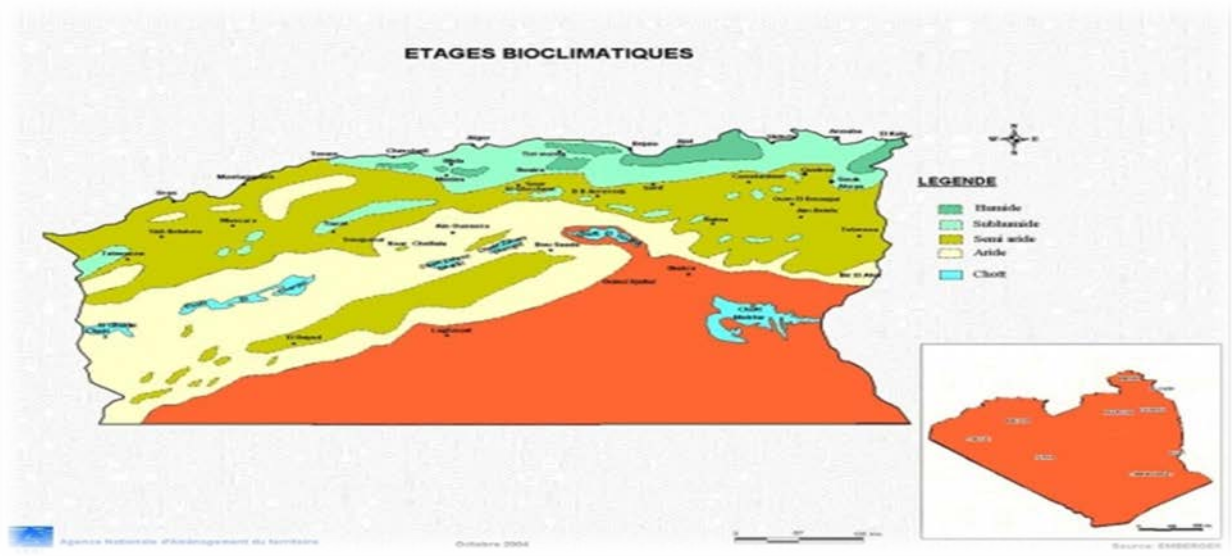


Fig 01 : Diversité pédologique et répartition des fiffétrents types des sols selon les étages climatique s en Algérie **[6].**

1.3-Etude pédologique :

1.3.1-Pédogenèse:

Ensemble des processus (physiques, chimique et biologiques) qui, en interaction les uns avec les autres, aboutissent à la formation, la transformation ou la différenciation des sols.

La pédogénèse passe par plusieurs étapes.ces étapes au nombre de trois sont les suivantes:

a- Désagrégation et altération d'une roche mère:

Ce sont des phénomènes de transformations physico-chimiques et chimiques.

La désagrégation physique des roches aboutit à la formation du squelette du sol compose, de cailloux ,de graviers, de sables grossiers et de sables fins et des limons.

b- Enrichissement en matière organique:

Sous l'action du climat le minéral devient plus soluble et change de structure en se fragmentant plus facilement. Cette transformation aboutit à la formation du complexe d'altération compose de : argile, silice, oxydes de fer et d'alumine et de sels plus ou moins solubles de calcium ,sodium, magnésium etc.

c- Déplacements verticaux ou migration de substances donnant au sol son profil:

Ces déplacements accélérés ou freinés par le climat, par la perméabilité du sol et le type d'humus vont créer dans le sol des couches plus ou moins distinctes qu'on appelle horizons. La succession des horizons appelle profil **[6] (Figure 02).**

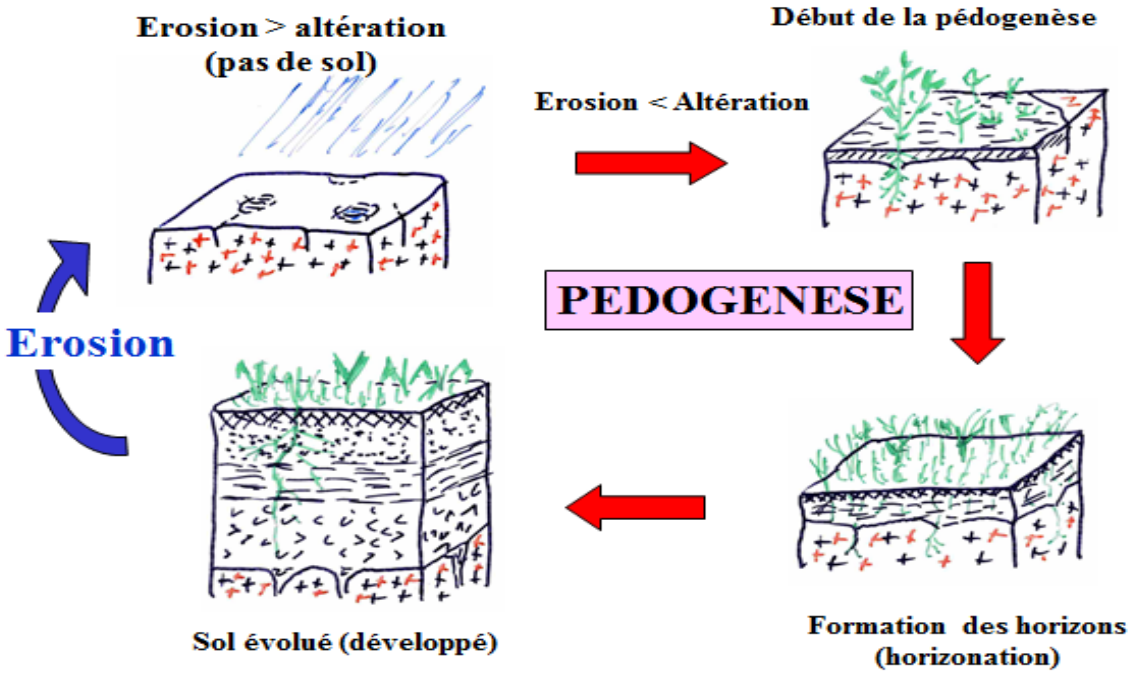


Fig 02 : Schéma représentatif des principaux processus de pédogenèse.

1.3.2-Classification:

Les systèmes de classification des sols ont pour but de ranger les sols en familles présentant les mêmes caractéristiques géotechniques ou des caractéristiques très voisines. Il existe de très nombreux systèmes de classification des sols: les uns sont basés sur l'aptitude du sol pour un emploi particulier du génie civil. les autres sont basés sur certains essais d'identification qui se réfèrent uniquement à la granularité du sol **(GTR :diagramme triangulaire**, **Figure 03)** et diffèrent par les seuils granulométriques adoptés . D'autres utilisent simultanément la granularité et la plasticité du sol « **classification LPC »,** qui n'est autre que la classification **USCS** (Unified Soil Classification System), adaptée aux seuils granulométriques utilisés en France (1965), puis la classification **LPC** modifiée pour mieux décrire les sols contenant des matières organiques (1974/1980) **[4][6][7][13][14].**

La classification GTR : Elle tient compte des mêmes caractéristiques de base que la classification LPC/USCS, mais elle est beaucoup plus précise pour les particules argileuses, qui ont une grande influence sur la conduite des terrassements, et tient compte de l'altérabilité des matériaux au cours du temps.

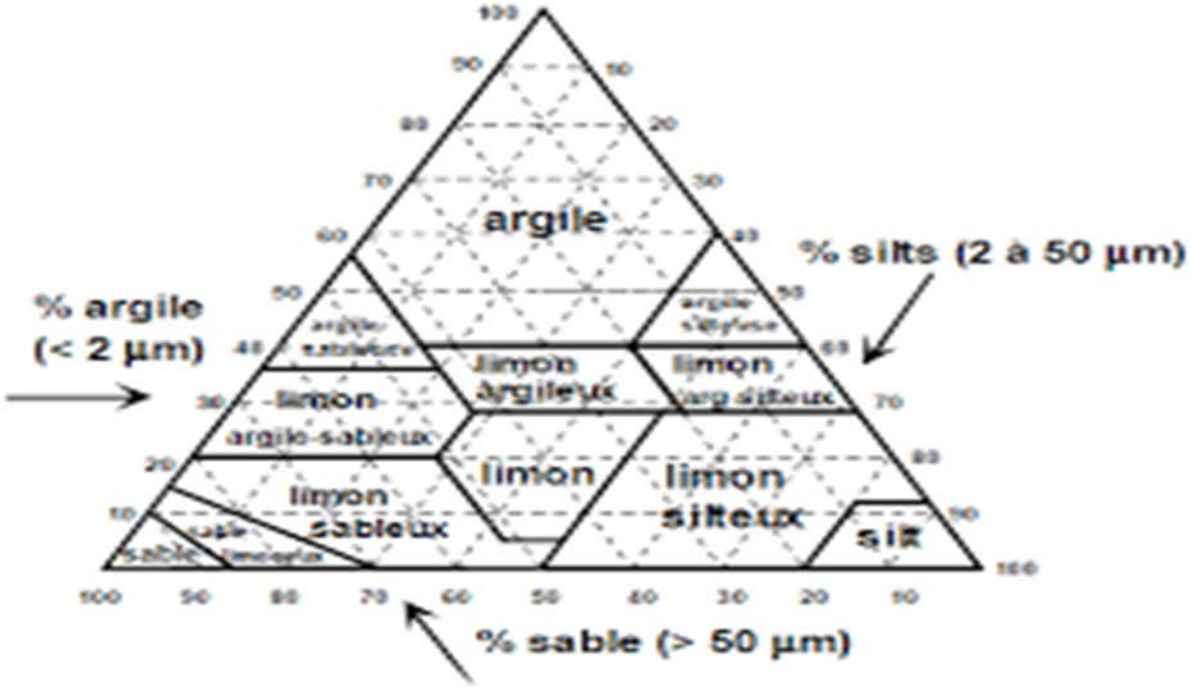


Fig 03 : Classification triangulaire des sols fins (contenant moins de 30% d'éléments de diamètre supérieur à 2 mm) **[7].**

1.3.3. Caractéristiques du sol :

1.3.3.1. Caractères physiques :

a. Structure :

La structure d'un sol est l'assemblage, a un moment donnée, de ses constituants solide. La stabilité structurale dépend de la matière organique des sols. Le complexe argilo-humique joue un rôle structurale, ce rôle est plus ou moins important selon les teneurs en eau du sol et varie en fonction du type d'argile. La matière organique augmente la stabilité des agrégats. Une mauvaise structure peut donc empêcher l'écoulement des eaux dans le sol, les échanges gazeuses entre le sol et l'atmosphère. Une bonne structure va assurer une grande facilité de circulation d'eau, donc laisse s'écouler l'excès, assure une bonne aération des racines, une

bonne germination, une pénétration profondes des racines et une bonne exploration par les racines des ressources nutritives du sol **[09].**

b.Texture :

La texture du sol est à la base de toutes les autres propriétés, c'est la propriété du sol qui traduit de manière globale la composition granulométrique de la terre fine **[10].** La texture constitue un caractère fondamental du sol, car elle influe sur :

c.Perméabilité du sol à l'eau et à l'air :

La perméabilité est indépendante du taux de la matière organique. Le critère retenue pour mesurer la perméabilité est la vitesse de percolation de l'eau exprimée en **Cm^3/h**. Le taux élevé de la matière organique n'implique pas forcément une bonne perméabilité **[11].** Cependant, son degré de décomposition a une influence sur cette dernière ; plus la matière organique est décomposé, plus la perméabilité est faible et vice-versa.

d. Rétention de l'eau Sous forme de vapeur ou liquide :

L'eau occupe environ un ¼ du volume d'un sol, quand ce dernier est saturé, l'eau qui percole à travers une tranche du sol le fait sous l'influence de la gravité **[12].** La teneur en air est complémentaire de la teneur en eau, puisque ces deux fluides se partages l'espace portal **[13].**

Porosité totale (% vol) =humidité (%) +teneur en air (%)

e. Porosité :

La porosité d'un sol est une grandeur physique qui exprime le rapport entre le volume occupé par ses pores et son volume totale. Considérons un échantillon de matériau terreux. Soient ***va :*** le volume total de cet échantillon qui est qualifié d'apparent puisque c'est le volume qui est directement aperçu et ***vs*** : le volume occupé par les particules du sol.

La porosité totale θt :est définie par l'équation **[14]:**

$$\theta t = 1 - vs/va$$

f. Connectivité :

Elle exprime l'importance des connexions entre les pores qui est un déterminant de la continuité de la phase gazeuse, donc de l'écoulement de l'air **[15].**

1.3.3.2. Caractères chimiques :

Les propriétés chimiques du sol correspondent aux teneurs et disponibilités des éléments minéraux nutritifs pour les plantes et aux paramètres chimiques du sol en lien avec leur restitution ou disponibilité **[16].**

a. Capacités d'échange cationiques et anioniques:

Elles mesurent la capacité d'un sol à retenir et fournir des éléments nutritifs à une culture: **CEC:** la capacité de retenir des cations ; **CEA**: la capacité de retenir des anions

b. pH du sol :

Le pH d'un sol est une mesure de l'acidité du sol, ou la concentration hydrogène (H^+). Dans une échelle de 1 à 14, un milieu est neutre quand son pH est de 7. En dessous, il est acide, au-dessus, il est basique ou alcalin. Les sols calcaires sont en général basiques, alors que les sols sableux ou très riches en matière organique sont plutôt acides. La plupart des plantes s'accommodent d'un pH autour de la neutralité (de 6 à 7,5). Certaines exigent cependant une terre acide (plantes acidophiles) ou au contraire calcaire.

Le pH est important pour plusieurs raisons : La disponibilité des éléments nutritifs et les problèmes de toxicité **[17]**

c. Matière organique:

La portion du sol la plus active chimiquement

- Elle affecte les propriétés physiques et chimiques
- Elle est responsable pour au moins la moitié de la capacité d'échange cationique des sols
- Elle est un excellent fournisseur d'éléments nutritifs pour les plantes.
- Elle peut retenir de grandes quantités d'eau qui permet aux éléments nutritifs de se déplacer du sol vers les racines des plantes.

d. Teneur en éléments nutritifs :

16 éléments nutritifs sont considérés essentiels pour les plantes **[18].**

Ils peuvent être répartis en deux groupes:

-Eléments nutritifs minéraux: proviennent en grande partie du sol.

La teneur en éléments minéraux dépend essentiellement de deux facteurs: Facteur génétique lié au pouvoir d'absorption spécifique de la plante et la disponibilité des éléments minéraux dans la solution du sol. Ainsi, la teneur en un élément varie d'une espèce à l'autre et selon la concentration de l'élément dans le sol **[19]**.

1.4-cycle biogéochimique des éléments chimiques dans le sol :

En écologie et plus généralement en pédologie, un **cycle biogéochimique** est le processus de transport et de transformation cyclique d'un élément ou composé chimique entre les grands réservoirs que sont **la géosphère**, l'**atmosphère**, **l'hydrosphère**, dans lesquels se retrouve la biosphère.

Un tel cycle induit souvent des passages de l'état organique à l'état minéral au sein de la biosphère. Les divers cycles en interaction confèrent à la biosphère une capacité de régulation, appelée homéostasie. Celle-ci est à la base de la pérennité des écosystèmes, grâce à la grande stabilité qu'elle assure, tout du moins en dehors des interventions humaines et phénomènes géoclimatiques exceptionnels.

Les cycles les plus importants sont :

- le cycle de l'azote ;
- le cycle du carbone ;
- le cycle de l'hydrogène ;
- le cycle de l'oxygène ;
- le cycle du phosphore ;
- le cycle du soufre.

1. Cycle de l’azote :

L'azote est un composé de base de la matière organique, en particulier pour la synthèse des acides aminés constituant les protéines et les bases nucléiques de l'ADN. De ce fait, la réduction

de N_2 est considérée comme aussi essentielle à l'évolution et à la perpétuation de la vie sur terre que la photosynthèse.

D'autre part, les composés de l'azote participent au métabolisme cellulaire, comme matériau à oxyder en milieu oxygéné, ou au contraire comme oxydant accepteur d'électrons en milieu anoxique.

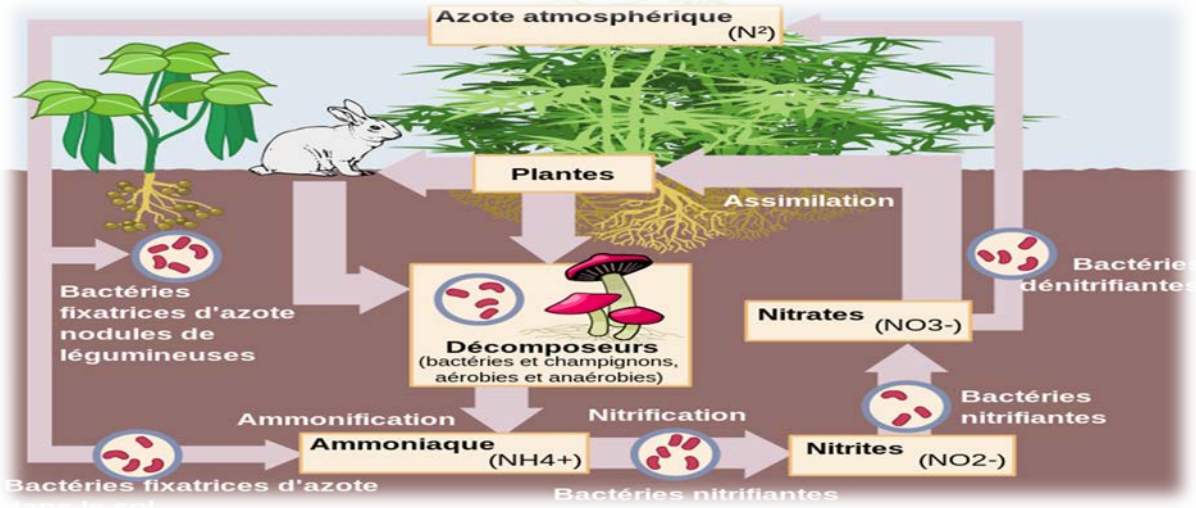


Fig 04 : Cycle biogéochimique de l'azote **[**20**] .**

2. Cycle du carbone :

Le cycle biogéochimique du carbone sur une planète, celui de la terre est rendu plus complexe par l'existence d'importantes masses d'eau océaniques, et surtout par le fait que la vie y tient une place importante. Il est caractérisé par l'importance relative des stocks emmagasinés dans les quatre grands réservoirs naturels de carbone de la planète (atmosphère, biosphère, hydrosphère et lithosphère), par les échanges entre ces réservoirs, et le renouvellement dynamique (appelé turnover) général du carbone du sol (pédosphère) qui inclut généralement la minéralisation (conversion du carbone organique en CO_2) et la transformation d'un pool (ou réservoir) de carbone à un autre (matière organique du sol fraîche et matière organique humifiée).

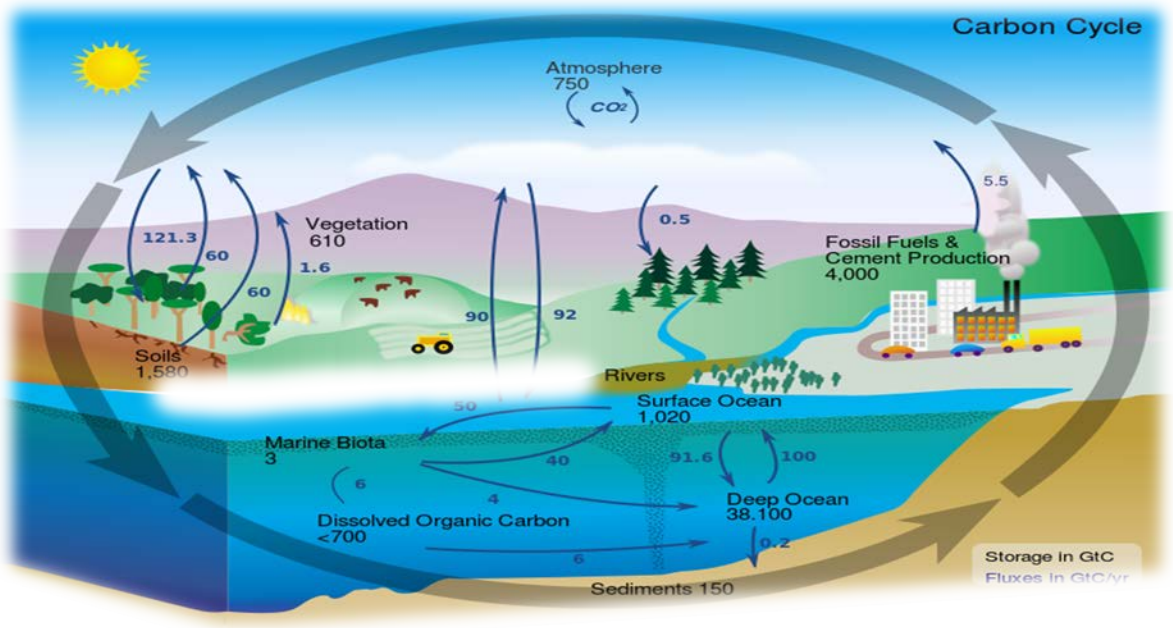


Fig 05 : Cycle biogéochimique du carbone **[17].**

3. Cycle de l'oxygène :

L'oxygène est l'un des éléments les plus abondants sur la terre et représente une grande partie de chaque réservoir principal. Les processus du cycle de l'oxygène sont considérés comme biologique ou géologique et sont évalués en tant que « source » (production) ou « puits » (consommation) de O_2. 22

Ce cycle est indissociable du cycle du carbone puisque celui-ci s'effectue grâce au dioxyde de carbone utilisé lors de la photosynthèse. Cette dernière produit du dioxygène, qui, par le biais de la respiration, brûle les composants carbonés produits par la photosynthèse pour redonner du dioxyde de carbone. En dernière analyse, photosynthèse et respiration sont à l'origine de la production et de l'équilibre des gaz atmosphériques. Les deux mécanismes :

1. $CO_2 + H_2O \rightarrow$ sucres + dioxygène.
2. Conditionnent la circulation du carbone et de l'oxygène.

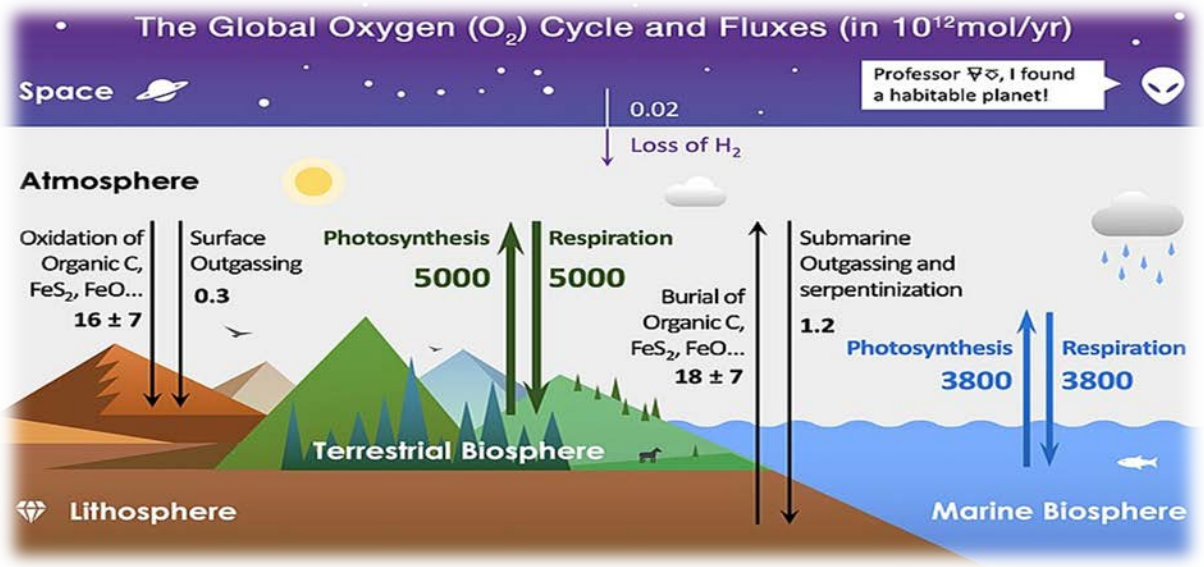


Fig 06 : Cycle biogéochimique de l'oxygène **[16].**

4. Cycle de l'hydrogène :

L'élément hydrogène est un des composants de l'eau. Il est recyclé dans des cycles biogéochimiques. Il participe activement au cycle du carbone, de l'azote, du soufre et de l'oxygène.

L'un de ces nombreux processus est appelé "transfert d'hydrogène interespèces". Ce processus a été décrit comme une symbiose entre certaines archées méthanogènes et des bactéries anaérobies non méthanogènes. Dans cette symbiose, les bactéries anaérobies non méthanogènes décomposent les substances organiques et produisent, entre autres produits, de l'hydrogène moléculaire (H_2). Cet hydrogène est pris par les bactéries méthanogènes qui le convertissent en méthane (processus de méthanisation).

Une particularité importante de ce transfert d'hydrogène interespèces est que la concentration de l'H_2 dans l'environnement microbien est très bas. Maintenir une concentration d'hydrogène basse est essentiel car le processus de fermentation anaérobie devient de plus en plus défavorable d'un point de vue thermodynamique à mesure que la pression d'hydrogène augmente. C'est la différence majeure comparée aux autres cycles biogéochimiques car du fait de sa faible masse moléculaire, l'hydrogène peut s'échapper de l'atmosphère de la terre. Il a été suggéré que c'est ce qui se serait passé à grande échelle dans le passé et qui ferait que la terre est très grande partie oxydée **[23].**

5. Cycle du souffre :

terre, l'atmosphère, océans, continents, mais aussi chez tous les êtres vivants sous forme de molécules organiques : les acides aminés soufrés constituants de protéines

(méthionine et cystéine) **[23, 24, 25, 26].**

Dans l'atmosphère, on rencontre le soufre sous forme de gaz : dioxyde de soufre (SO_2), hydrogène sulfuré (H_2S) ; de soufre réduit comme dans le diméthylsulfure (DMS) dont la formule est CH_3SCH_3 et le carbonyle de sulfure (COS) ; ainsi que dans les sulfates volatils (SO_4^{2-}). Le SO_2 et l'H_2S proviennent de la minéralisation de la matière organique selon le pH du milieu ou du métabolisme de certaines bactérie (Désulfovibrio spp. et Claustridium sulfitoreductrices).

Dans le sol, le soufre se rencontre à l'état minéral, en grande quantité, dans les schistes bitumineux, charbon et hydrocarbures, ainsi que sous forme de sulfites et sulfates, indispensables à la croissance des végétaux. Les minéraux tels que la pyrite (FeS_2) sont également riches en soufre ; ils se sont formés lors de phases sédimentaires et pourront être réintroduits dans le cycle par l'érosion et le volcanisme **[24, 25, 26, 27].**

Les principales étapes du cycle du soufre sont :

- la minéralisation du soufre organique en une forme inorganique : le sulfure d'hydrogène (H_2S).
- l'oxydation des sulfures, du soufre élémentaire (S) et de ses composés connexes en sulfates (SO_4^{2-}).
- la réduction des sulfates en sulfures.
- l'immobilisation microbienne des composés soufrés et leur incorporation dans une forme organique du soufre.

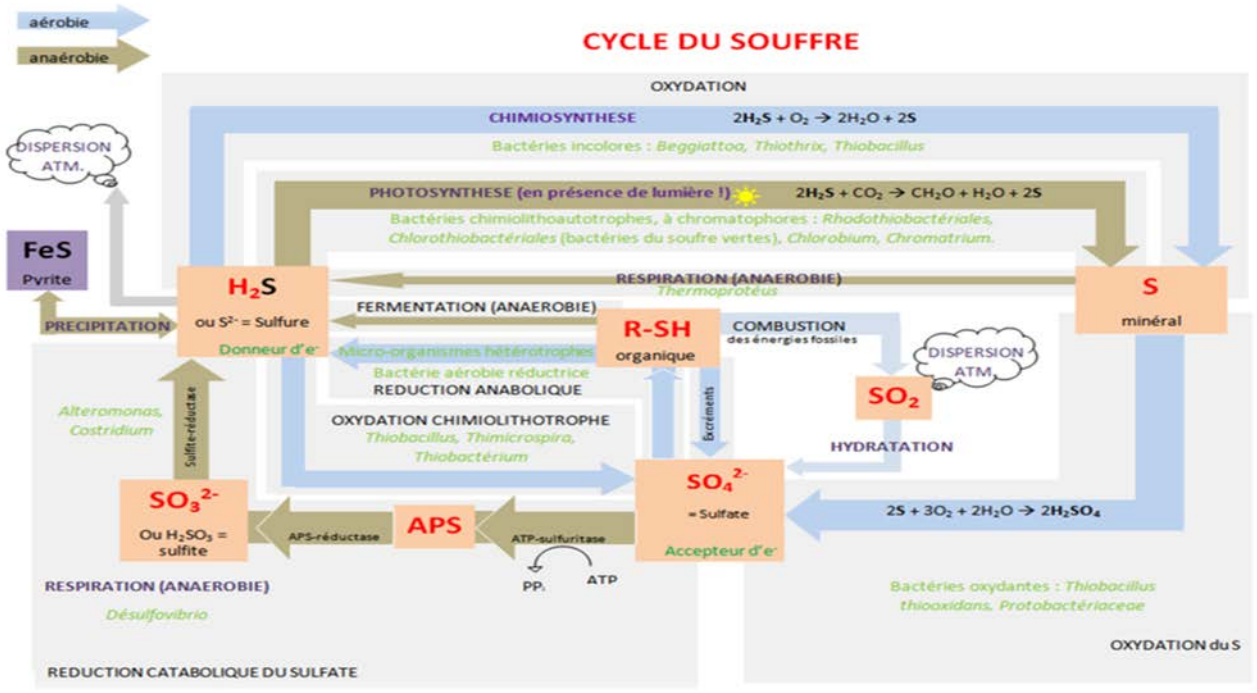


Fig 07 : Cycle biogéochimique du souffre **[**26**].**

6-cycle du phosphate :

Le phosphore est un constituant indispensable de la matière organique, même si son importance pondérale est relativement faible par rapport à l'azote ou au potassium. Son rôle est lié au stockage et transfert d'énergie (ATP), et à la formation de nombreux composés structurels (acides nucléiques, nucléotides, phospholipides, coenzymes,…).

Le phosphate est un **élément limitant** de nombreux écosystèmes terrestres, faute de réservoir atmosphérique; car sa disponibilité est directement liée à l'altération superficielle des roches. Le cycle du phosphore est unique parmi les cycles biogéochimiques majeurs, car il ne possède pas de composante gazeuse ; il n'affecte pratiquement pas l'atmosphère.

De plus, l'effet limitant du phosphore est perturbé par des apports anthropiques, ce qui peut causer des problèmes environnementaux d'eutrophisation

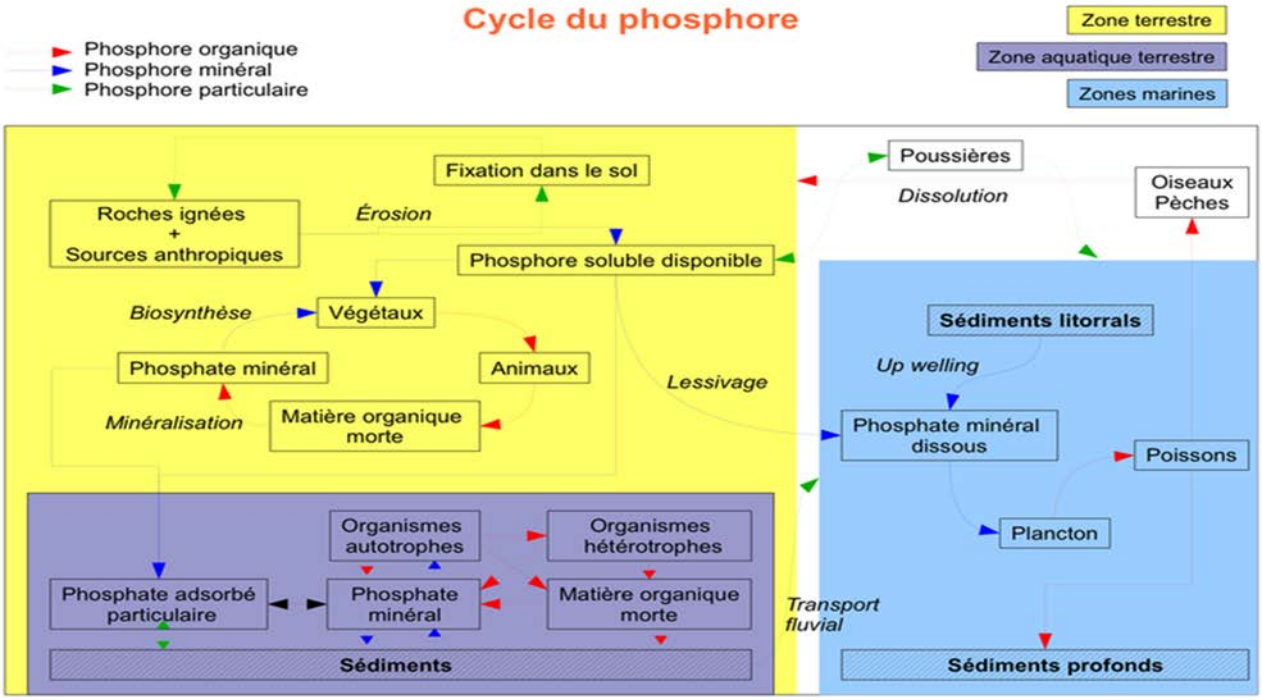


Fig 08 : Cycle biogéochimique du phosphate **[**25**].**

1.5-L'eau dans le sol :

Du point de vue géotechnique, on définit un sol comme faisant partie des roches meubles d'une formation géologique superficielle résultant de l'altération des roches de l'écorce terrestre.

La présence de l'eau dans le sol joue un rôle très important, on s'intéresse à l'eau libre qui peut circuler entre les particules, cette eau saturant un massif de terrain construit une nappe souterraine, le plus souvent à surface libre ou parfois localisée entre deux formations imperméables c'est la nappe captive.

Une fois reconnue la présence d'eau dans un terrain, il faudra s'attacher aux problèmes qu'elle pose et qui se ramènent pratiquement tous, soit à son élimination, soit à une réduction de sa charge (drainage) **[28].**

1.5.1. Les types d'eau dans le sol:

L'eau qui se trouve dans les sols est soumise à plusieurs forces. Les molécules d'eau subissent d'abord une attraction réciproque constituant la cohésion de l'eau, et leur permettant de rester groupées entre elles.

Mais elles subissent aussi une attraction moléculaire de la part des substances étrangères au contact desquelles elles se trouvent, cette cohésion fixe la molécule d'eau aux parois.

De plus, l'eau dans le sol est soumise à l'influence de la pesanteur qui, suivant la grandeur des forces qui lui sont opposées par les attractions moléculaires, permettra ou ne permettra pas à l'eau de se mouvoir.

En fin, la tension de vapeur d'eau de l'atmosphère surmontant l'eau, provoquera des mouvements d'eau soit par évaporation, soit par condensation. Ainsi il y a lieu de distinguer différentes catégories d'eau dans un sol **[29].**

a. L'eau de constitution : Qui fait partie de la constitution chimique des masses minérales présentes dans la phase solide du sol.

b. L'eau en phase vapeur : D'une manière générale un sol non saturé a l'atmosphère de ses pores saturés en vapeur sauf si une circulation importante d'air est possible.

c. L'eau hygroscopique : C'est de l'eau adhérant fortement par adsorption à la surface des particules du sol, elle est maintenue à la surface des particules par des forces d'attraction moléculaire. Elle provient de l'humidité de l'atmosphère en contact avec les particules et forme autour d'elles une pellicule adhésive dont l'épaisseur varie suivant la nature et la surface spécifique du minéral d'une part, la tension de vapeur d'autre part.

d. L'eau pelliculaire: Entoure les particules de sol et leur eau hygroscopique. Elle est soumise à des forces d'attraction moléculaires de la part de la couche d'eau hygroscopique qui diminuent rapidement quand on s'éloigne de la particule. Le jeu des forces moléculaires entre particules voisines peut permettre à cette eau de se déplacer sous forme liquide.

Les eaux hygroscopique et pelliculaire sont en quelque sorte une eau liée dont les propriétés physiques sont bien différentes de celles de l'eau libre à la même température.

Elle a une forte viscosité, ne transmet pas les pressions hydrostatiques et ne se déplace pas sous l'effet de la pesanteur. Ses propriétés sont, de plus, fortement influencées par les cations présents dans l'eau libre et qui, attirés par l'eau liée, pénètrent en elle, et forment le complexe d'adsorption dont l'étude est fort instructive pour expliquer le comportement des sols argileux. On estime souvent à 0.1 la distance à la surface de la particule à partir de laquelle les forces d'attraction moléculaire deviennent négligeables, la fraction hygroscopique ne peut être extraite que par un vide poussé ou par dessiccation. La fraction pelliculaire peut être extraite par centrifugation poussée.

Alors que la teneur en eau hygroscopique est très faible (de l'ordre de 0.2 à 0.5 %) pour des sables, elle peut atteindre pour les argiles, ayant une forte surface spécifique (montmorillonite), 15 à 20 %. De même la teneur en eau pelliculaire des sables ne sera que de quelques pourcents, alors que celle des argiles peut atteindre 40 à 45 % **[29].**

e. L'eau capillaire:

Elle est retenue dans les pores du sol par les forces de capillarité dues à la tension superficielle qui se développe à l'interface eau-air. Elle est soumise à l'action de la pesanteur et elle transmet les pressions.

f. L'eau libre ou gravifique:

C'est celle qui obéit uniquement à la pesanteur, s'écoule dans le sol et peut être extraite par des techniques simples. Elle transmet la pression hydrostatique, et sous l'action de différences de pression, elle peut circuler librement **[30].**

1.6. Importance agro-écologique du sol :

Les sols ont une vocation principale de production agricole et sylvicole et assurent le développement de la végétation naturelle, support de la biodiversité. Les sols sont aussi des réacteurs biologiques qui assurent de nombreuses fonctions environnementales. En ralentissant l'écoulement de l'eau de pluie qu'ils absorbent partiellement, les sols participent de la prévention des inondations et des coulées de boue. Ils jouent un rôle de filtre et stockent en partie des molécules introduites par l'homme (métaux lourds, produits phytosanitaires…), étant ainsi des acteurs indirects de la qualité de l'eau. Après les océans, les sols sont le deuxième réservoir de carbone (C), en contact avec l'atmosphère **[31].**

1.7. Problèmes écologiques de dégradation des sols :

1.7. 1. Erosion des sols :

Indépendamment du model du relief, tous les sols sont naturellement soumis à l'érosion. En agriculture, l'érosion du sol renvoie à l'amincissement de la couche arable d'un champ sous l'effet des forces érosives naturelles de l'eau et du vent, ou sous l'effet des activités agricoles, comme le travail du sol.

Que la cause de l'érosion soit l'eau, le vent ou le travail du sol, dans tous les cas, le sol : se détache, se déplace, puis se dépose. La couche arable, fertile, vivante et riche en matière organique, est emportée ailleurs sur le terrain, où elle s'accumule avec le temps, ou hors du terrain, dans les réseaux de drainage. L'érosion du sol abaisse la productivité de la terre et contribue à la pollution des cours d'eau, des terres humides et des lacs adjacents. Le phénomène peut être lent et passer relativement inaperçu. Il peut aussi se produire à un rythme alarmant et causer alors de lourdes pertes de terre arable. Le compactage du sol, l'appauvrissement du sol en matière organique, la dégradation de la structure du sol, un mauvais drainage interne, des problèmes de salinisation et d'acidification du sol sont d'autres causes de détérioration du sol qui en accélèrent l'érosion.

1.7. 1. 1. Types d'érosions des sols :

a. Érosion hydrique : La vitesse et l'ampleur de l'érosion causée par l'eau dépendent des facteurs suivants (**figure 09**) :

Pluie et ruissellement :

Plus grandes sont l'intensité et la durée d'un épisode de pluie, plus grand est le risque d'érosion. L'impact des gouttes de pluie sur la surface du sol peut briser les agrégats et disperser les particules de sol. Les particules les plus légères, dont les particules très fines de sable, de limon, d'argile et de matière organique, sont facilement emportées par les éclaboussures d'eau de pluie et les eaux de ruissellement. Il faut davantage d'énergie transmise par les gouttes de pluie et un écoulement plus important pour emporter les particules plus grossières de sable et de gravier.

Érodabilité du sol :

L'érodabilité d'un sol est une estimation, fondée sur les caractéristiques physiques du sol, de la vulnérabilité de ce sol à l'érosion. L'érodabilité est surtout influencée par la texture du sol, mais elle l'est également par sa structure, sa teneur en matière organique et sa perméabilité. En général, les sols qui affichent une plus grande résistance à l'érosion sont ceux dans lesquels l'eau s'infiltre plus rapidement, ceux qui sont riches en matière organique et ceux dont la structure est améliorée. Les sables, les LOAMS sableux et les sols loameux ont tendance à être moins vulnérables à l'érosion que les limons, les sables très fins et certains sols argileux.

Pente et longueur de pente :

Plus la pente d'un champ est raide et plus cette pente est longue, plus les risques d'érosion sont grands. L'érosion hydrique augmente aussi avec la longueur de la pente à cause de l'augmentation du ruissellement. La fusion de petits champs pour en faire de plus grands a souvent pour conséquence d'allonger les pentes. Le débit de l'eau étant alors plus rapide, le transport des sédiments augmente, ce qui donne lieu à des risques accrus d'érosion et d'affouillement.

Cultures et végétation :

Le risque d'érosion augmente si le sol n'est pas suffisamment protégé par le couvert végétal et/ou une couche de résidus de culture. Les résidus et la végétation protègent le sol de l'impact des gouttes de pluie et des éclaboussures d'eau. Ils ont aussi tendance à réduire la vitesse d'écoulement de l'eau et à favoriser l'infiltration de l'eau dans le sol.

L'efficacité de la végétation et des résidus à réduire l'érosion dépend du type, de l'étendue et de la densité du couvert végétal. La meilleure façon de combattre l'érosion est de miser à la fois sur un couvert végétal et sur des résidus de culture (p. ex., forêts et pâturages permanents) qui couvrent complètement le sol et qui interceptent les gouttes de pluie à la surface du sol et près de celle-ci.

L'efficacité d'un couvert végétal à réduire l'érosion dépend aussi de la protection qu'il offre à différentes périodes de l'année en fonction de l'importance des précipitations érosives reçues au cours de ces périodes.

Pratiques culturales :

L'érosion hydrique est influencée par les opérations culturales, notamment par la profondeur de travail du sol, le sens dans lequel celui-ci se fait, le moment des labours, le type d'instruments aratoires et le nombre de passages. Généralement, moins le travail du sol perturbe la végétation ou la couche de résidus en surface ou près de la surface, moins le travail du sol engendre d'érosion hydrique. Le travail réduit du sol et le semis direct sont des moyens efficaces de limiter ce type d'érosion.

Les conséquences directes de l'érosion des berges sont, entre autres : la perte de terre arable; le sapement de la base des ouvrages, tels que les ponts; les exigences accrues de nettoyage et d'entretien des canaux de drainage; et le ravinement des voies de circulation et des superficies longeant les clôtures.



(a) : Force érosive de l'eau attribuable à la concentration de l'écoulement des eaux de ruissellement.

.



(b) : Accumulation de sol et de débris de culture à l'extrémité basse de ce champ est un indice d'érosion en nappe.

.



(c) :Le tracé distinct formé par les eaux de ruissellement est un signe d'érosion en rigoles ayant emporté le sol.



(d) : Sans intervention, l'érosion en rigoles peut mener à l'érosion par ravinement.

.



(e) : L'érosion des berges résulte du sapement et de l'affouillement des berges des cours d'eau naturels et des canaux de drainage.

Fig 09 : Force érosive de l'eau.

b-Érosion éolienne :

L'érosion éolienne s'observe dans les régions vulnérables, mais elle ne touche qu'un faible pourcentage des terres, essentiellement les terres sableuses et les terres noires. Sous les conditions qui y sont favorables, l'érosion éolienne peut occasionner des pertes de sol et de terrain considérables **(Figure 10).**

Il existe trois modes de déplacement des particules de sol : la suspension, la saltation et le roulement. Le mode varie selon la grosseur des particules et la puissance du vent.

La vitesse et l'ampleur de l'érosion causée par le vent dépendent de plusieurs facteurs comme l'érodabilité du sol, rugosité de la surface du sol, le climat, longueur exposée des champs, couvert végétal **[32].**



Fig 10 : Force érosive du vent dans un champ non protégé **[32].**

c. Érosion liée au travail du sol :

L'érosion liée au travail du sol vient de la redistribution du sol par la machinerie et la gravité (Figure 11). Elle amène un déplacement progressif du sol vers le bas des pentes. Il s'ensuit des pertes de sol considérables dans le haut des pentes et des accumulations dans le bas des pentes. Cette forme d'érosion pave la voie à l'érosion hydrique.

La vitesse et l'ampleur de l'érosion causée par le travail du sol dépendent des facteurs: type d'instruments aratoires, sens du travail du sol, vitesse d'avancement , profondeur de travail et nombre de passages **[31].**



Fig 11 : L'érosion liée au travail du sol entraîne un déplacement progressif du sol vers le bas de la pente **[31].**

2. Micro-organismes telluriques :

Les micro-organismes du sol sont constitués de 5 principaux groupes : les virus, les bactéries, les actinobactéries, les champignons et les algues **[33].**

Certains micro-organismes participent à la santé et à la croissance des plantes, dont les plus étudiée sont les symbioses rhizobiennes et mycorhiziennes. La composante microbienne participe aussi activement aux cycles biogéochimiques du soufre, du phosphore, du fer et de l'azote, sans oublier leurs rôles essentiels dans le cycle du carbone, les micro-organismes du sol, hétérotrophes pour la plupart, font partie des acteurs principaux contrôlant la décomposition de la matière organique **[34].**

2.1. Biodiversité microbienne dans le sol :

.1-Les bactéries saprophytes :

Les bactéries aérobies prolifèrent dans les milieux les plus riches en azote, et peu acides; elles sont surtout abondantes autour des racines de certaines plantes (graminées, légumineuses), au sein de la rhizosphère. La plupart d'entre elles sont **hétérotrophes** et saprophytes, **elles décomposent les celluloses, les sucres**, qui constituent des sources d'énergie, et sont pour la plus grande part, minéralisées sous forme de gaz carbonique. Certaines bactéries, plus spécialisées, sont **autotrophes** : elles tirent leur énergie de l'oxydation de certains composés (soufre, ammoniac, fer ferreux,...) et assimilent le carbone du CO_2.

2.1.2- Les mycorhizes :

Intermédiaires entre bactéries et champignons, les actinomycètes jouent un rôle important dans la décomposition des litières d'une part, dans l'humification d'autre part. Ils semblent jouer un grand rôle dans la transformation de certains composés organiques et minéraux du sol, mais ce rôle est encore mal connu : ils seraient susceptibles de décomposer les composés de la M.O.F. tels que la lignine et certains tannins, et d'élaborer certains acides humiques.

Les actinomycètes ont aussi d'autres fonctions : certaines espèces, en particulier *Frankia alni*, forment des nodosités avec les racines des aulnes, et sont à l'origine d'une fixation active d'azote atmosphérique qui explique le rôle améliorant de cette espèce.

2.1.3. Les champignons :

Les champignons sont des eucaryotes dotés d'une structure filamenteuse végétative appelée mycélium. La plupart sont des Eumycètes ils ont une membrane chitineuse et leur organe reproducteur est dépourvu de flagelles **[33].** La majorité des grands groupes taxonomiques de champignons sont tous hébergés dans le sol **[35].**

Les champignons représentent une grande diversité, il ya approximativement 1,5 millions d'espèces **[36].** Les champignons jouent des rôles très importants dans les cycles des nutriments du sol **[37],** notamment dans la décomposition de la matière organique. Les champignons jouent un rôle aussi dans le recyclage des déchets, des sécrétions chimiques et excrétions des racines des plantes, des animaux et des microorganismes **[39].**

Certains champignons sont associés aux racines des plantes et des arbres, en formant des **mycorhizes**, à vie symbiotique, qui facilitent la croissance et la nutrition des espèces concernées.

2.1.4. Les protozoaires :

Ils sont abondants dans les milieux très humides et s'attaquent à la flore bactérienne et aux actinomycètes. Ces organismes sont très nombreux dans le sol. Leur vie exige l'existence d'un haut degré d'humidité. Ils s'enkystent par sécheresse. Ils se nourrissent surtout de bactéries. à ce titre, ils jouent un rôle important dans la composition et les activités microbiologiques du sol **[40].**

2.1.5. Les virus :

Ils sont nombreux dans le sol et dans les litières : après les protozoaires, ce sont les plus abondants colonisateurs du sol comme les bactériophages qui exercent donc un certain contrôle sur la microflore **[40].**

2.2. Interaction : Sol - plantes - microorganismes

2.2.1-Définition et structure de la rhizosphère :

Le terme rhizosphère (du grec rhiza, la racine et de sphère, domaine d'influence) a été utilisé pour la première fois par Lorenz Hiltner . pour définir la zone de sol sous l'influence des racines des légumineuses **[41]**. La rhizosphère définit aujourd'hui le lieu d'interaction entre le sol, la plante et les micro-organismes. Ces interactions dépendent des conditions physico-chimiques du milieu et des organismes mis en jeu.

La rhizosphère est en fait un micro-habitat dont les limites sont mal définis car il représente un gradient microbiologique et physico-chimique allant des racines elle-même, au contact de laquelle la microflore présente les différences les plus marquées, jusqu'à une distances plus ou moins grande (1 à 5 cm) au-delà de laquelle l'« effet rhizophérique » disparaît **[42].**

2.2.2. Différentes parties de la rhizosphère :

Selon Pinton **[43]** et Gobat **[44],** la rhizosphère se distingue par plusieurs parties :

a- L'ectorhizosphère :

L'ectorhizosphére correspond au volume de sol colonisé ou potentiellement colonisable par les micro-organismes (bactéries et champignons) et influencée par ceux-ci. Sa définition peut s'étendre à la mycorhizosphère correspondant au volume de sol qui environne une racine colonisée par un champignon mycorhizien permettant d'augmenter le volume de l'ectorhizosphère **[45].**

b- L'endorhizosphère :

L'endorhizosphère correspond au volume de tissus racinaires. On distingue dans cette partie le rhizoplan correspondant à la surface même du tissu racinaire, l'histosphère correspondant à la région intra-tissulaire et extracellulaire de la racine où se trouvent les micro-organismes et la cytosphère correspondant à la région intra-tissulaire et intracellulaire de la racine où se trouvent les micro-organismes **[46] (Figure 12).**

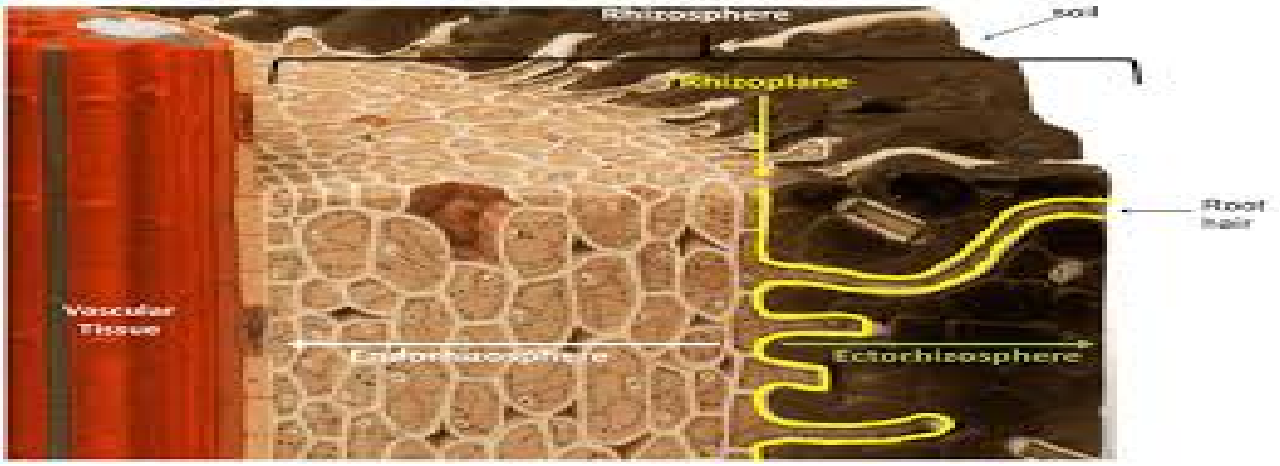


Fig 12 : Différentes parties de la rhizosphère **[46].**

2.2.3. La rhizodéposition :

Lynch et Whipps **[47]** définissent la rhizodéposition comme tout les éléments émis par le système racinaire, il s'agit des exsudats hydrosolubles ou non, des lysats, des cellules desquamées et des gaz (CO_2, l'éthylène,…).

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 nécessaire pour la microflore du sol, ayant pour conséquence la stimulation de la vie microbienne dans la rhizosphère **[48].** Le système racinaire des plantes peut en effet exsuder

dans le sol des molécules organiques diverses, leurs qualités ainsi que leurs quantité dépendent étroitement de l'espèce végétale. Différents types de rhizodépôts peuvent être considérés :

a- Les exsudats: Ce sont des molécules hydrosolubles de faibles poids moléculaires émises dans le sol, sans dépense énergétique. Cette diffusion passive s'effectue selon un gradient de concentration. Les sites de libération sont présents sur l'ensemble des racines, au niveau des parois et au niveau des jonctions cellulaires, ces exsudats regroupent essentiellement des sucres, des acides organiques, des vitamines (B1, B2, B6, la thiamine, ….), et certaines hormones **[49].**

b-Les sécrétions: Les sécrétions sont généralement des enzymes telles que les invertases, les cellobiases, les phosphatases et les nucléases pour le maïs **[50],** libérées dans le sol grâce à des processus actifs.

c- Le mucilage : Le mucilage, d'aspect gélatineux, est produit aux apex racinaires suite à l'exocytose de vésicules golgiennes issues des dictyosomes et est également détectée au niveau des poils absorbants **[51].**

d- Les lysats: ll Sont constitués des produits d'autolyse de cellules épidermiques desquamées. La dégradation microbienne des parois permet de libérer le contenu cytoplasmique de ces cellules suivie d'une colonisation dense de bactéries **[52].**
e-Les gaz : Les racines libèrent des composés volatils tels que le CO_2, l'éthylène (hormone végétale), des alcools (éthanol, méthanol) et des aldéhydes qui peuvent influencer à distance la germination des spores fongiques **[53].**

2.2.4-Localisation :

La libération de composés par la racine est ni qualitativement, ni quantitativement homogène le long de la racine et varie d'une espèce à l'autre. Dans le cas des arbres et des graminées, les sites majeurs de libération se situent au niveau des apex et des zones d'élongation racinaire. Selon la zone de la racine, la nature de la rhizodéposition varie **[54]**. Il apparaît que la libération de glucides a lieu tout au long de la racine **[56].** alors que la libération d'acides aminés et d'acides organiques a lieu préférentiellement dans les zones apicales .De même, les photosynthétats récemment assimilés sont majoritairement alloués vers les jeunes racines **[56]**.

2.2.5- Composition :

a. Les composés volatils: Parmi les produits primaires, le CO2 provenant de la respiration est de loin le plus important (70 à 80% de l'ensemble) **[53]**, mais on a aussi rapporté la présence habituelle d'acides organiques et d'éthylène dans la rhizosphère de nombreuses espèces. Dans les composés secondaires, on peut signaler par exemple des terpènes, des alcools, de l'acide cyanhydrique, etc.. **[56].**

b. Les composés solubles: Une liste des principaux produits primaires (acides aminés et organiques, sucres) sont retrouvés chez sept espèces végétales importantes. En sus de ces substances, on trouve de façon normale des enzymes, pigments et nucléotides dans les exsudats de nombreuses plantes. Les composés secondaires sont très nombreux **[58]** et peuvent, d'après **(Mathieu C. et Pieltain F., 2003) [55]**, être classés en cinq catégories : phényl- propanes , acétogénines, terpénoïdes, stéroïdes et alcaloïdes.

Sur le plan quantitatif, les produits solubles émis par les racines représentent de 0.3 à 0.8 % du carbone assimilable journellement par voie photosynthétique **[55].**

c. Les composés insolubles: Il s'agit essentiellement des polysaccharides sécrétés par l'appareil de Golgi suivant un mécanisme qui commence à être bien connu et qui opèrerait lors de la formation des parois cellulaires primaires de toutes les espèces Greaves et Darbyshire **[55]** ont notamment montré que toute la surface des racines de diverses plantes, en conditions axéniques ou non, était recouverte par une couche de polysaccharides .Mais c'est surtout au niveau des cellules de la coiffe que ces composés sont abondants, formant des gouttelettes caractéristiques.

d. Les débris cellulaires: Ils résultent du phénomène de desquamation des racines vivantes, dont les poils absorbants, les cellules de la coiffe et du parenchyme cortical sont constamment renouvelés.

2.2.6-L'effet rhizosphère :

L'apport trophique racinaire influence la densité des populations bactériennes présentes dans la rhizosphère. En effet, Lynch et Whipps **[56]** , 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 **[56]**. En effet, 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 (Il s'ensuit par conséquent une modification de la structure et de la composition des populations bactériennes au contact des racines **[57]**. En d'autres termes, la rhizodéposition influence largement le développement de la flore rhizobactérienne qui s'en nourrit, sélectionnant probablement des espèces physiologiquement bénéfiques pour la nutrition de la plante **[58]**.

La composition de ces populations rhizosphériques, pour un même sol, varie d'une plante à une autre, voire d'un cultivar à l'autre. Ainsi, chez le blé, **[59]**, ont remarqué que la rhizosphère du cultivar Rescue héberge beaucoup plus de bactéries pectinolytiques et cellulolytiques que celle du cultivar Cadet.

2.2.7- Influence de la plante sur la rhizosphère:

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 **[60]**. 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 **[60]**. 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 **C** par le biais de la rhizodéposition **[61]**.

2.2.8- 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 **[53]**. En général, de la stabilité de ces agrégats va dépendre 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**[62]** . Il résulte d'un tel effet une modification de la porosité **[53]**, 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 **[53]**.

3-La rhizobactérie *Paenibacillus polymyxa* :

3.1-Création du genre *paenibacillus* :

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 3 **[63]**. La même année, quelques membres du comité ont publié la description d'un genre nouveu Paenibacillus, pour définir les bactéries du groupe 3 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 **[63]**, cinq de ces groupes ont été reclassés a des genres nouveaux et qui sont :Alicyclobacillus, Paenibacillus, Halobacillus, Brevibacillus et Aneurinibacillus.

Le genre Paenibacillus comportait onze espèces lors des sa création **[63]**: P.polymyxa qui est l'éspece type du genre nouveau ,P.alvei, P.gordonae, P.larvae, P.pulvifaciens, P.macerans, P.azotofixans, P.macquariensis ,P.amylolyticus et P.validus.

3.2-Evolution récente du genre :

De nombreuses nouvelles espèces apparaissent tous les ans , par exemple jusqu'à 2010,le genre comportait 120 espèces et 4 sous espèces. Le tableau suivant résume les espèces de *paenibacillus* apparues ces dernières années.

Tableau II : Evolution du genre *Paenibacillus*.

Années	Espèces de genre Paenibacillus
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* (Dsouza et *al*., 2014), *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* (Moon et *al*., 2014),*P.relictisesami* …(Shimoyama et *al*.,2014), *P.dongdonensis* (S on et.*al*., 2014), *P.shirakamiensis* (Tonouchi et *al*.,2014),*P.quercus* (Wang et *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* (Wang et *al*., 2016), *P. radicis* (Gao et *al*., 2016), *P. arachidis* (Sadaf et *al*., 2016), *P. baekrokdamisoli* (Lee et *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* (Madhaiyan et *al*., 2017), *P. tritici* (Menendez et *al*., 2017) et *P. aquistagni* (Simon et *al*., 2017).

3.3-Description du genre :

Depuis les travaux de **[63]**, la description du genre *Paenibacillu*s a évolué. Actuellement, elle est la suivante : Bacilles présentant la structure des bactéries à Gram positif

mais pouvant apparaître Gram positif ou Gram négatif ou Gram variable, le plus souvent mobiles grâce à une ciliature péritriche, formant une spore ovale déformante, aéro-anaérobies, ouaérobies stricts ne produisant pas de pigment soluble.

Caractères positifs : croissance inhibée par 10% de NaCl, acidification de certains sucres.

Caractères négatifs : H2S (Sulfure d'hydrogène).

Caractères variables : Présence d'un cristal parasporal, croissance à pH 5.6, croissance à 50°C, croissance en présence de 0.001% de lysozyme, catalase (généralement positive sauf pour P.larvae),oxydase, nitrate réductase, Voges-Prauskauer (VP), indole, uréase, hydrolyse de la caséine, de l'amidon, de la tyrosine, de la thiamine et des polysaccharides.

La croissance peut nécessiter des milieux complexes et est optimale pour une température de 28 à 40°C (à l'exception de P.macquariensis qui cultive mieux pour des températures comprises entre 20 et 23°C) et pour un pH de 7 (toutefois, certaines espèces sont alcalophiles) Les amorces PAEN 515F (5`-GCTCGGAGAGTGACGGGTACCTGAGA et 843 F (5`-TCGATACCCTTGGTGCCGAAGT) peuvent être utilisées pour un diagnostic de genre.

3.4-L'espèce *P.polymyxa* :

3.2.1-Description de l'espèce :

La description de *P.polymyxa* est identique à celle de *Bacillus polymyxa* telle qu'elle est donnée dans la 2^{éme} édition de «Bergey's Manual of SystematicBacteriology».

P. polymyxa est un bacille à Gram positif , aéro-anaérobie **[54]** qui peut exploiter la dénitrification comme processus respiretoire relayant la respiration aérobie **[55]**. l'intérét de l'aptitude dénitrifiante de *P.polymyxa* réside dans le fait qu'elle est capable de s'adapter à la présion de sélection imposée par l''environnement rhizosphérique qui peut constituer un milieu assez pauvre en oxygène .

Elle est de 2 à5 µm de longueur sur 0.6 à 0.8 µm de diamètre, mobile grâce à une ciliature péritriche, (**Mathieu C. et Pieltain F., 2003) [56]**ont montré que la mobilité de la souche *P.polymyxa* E681 a été fortement induite par un métabolite sécondaire, la citrinine, produit par *Penicillium citrinum* KCTC 654.

Cette espèce bactérienne forme une spore ovale, déformante, subterminale non accompagnée par un cristal parasporal **(Figure 13.b**) ce qui lui confère une certaine résistance aux stress de différentes origines.

P.polymyxa synthétise des lévanes à partir du saccharose et s'entoure alors d'un matériel muqueux (capsule) qui ne diffuse pas dans le milieu environnant **(Figure 13c).**

Sur gélose nutritive, les colonies sont petites et elles présentent une tendance à l'étalement (Figures13.d).La culture n'est pas obtenue au-dessus de 45C^0 ou an dessous de 5 C^0 **[56].**

Caractères positifs : croissance à pH 5.7, catalase, réduction des nitrates en nitrites, VP ,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 du citrate, phénylalanine désaminase, dégradation de la tyrosine.

Caractères variables : croissance en présence de 0.01% de lysozyme.

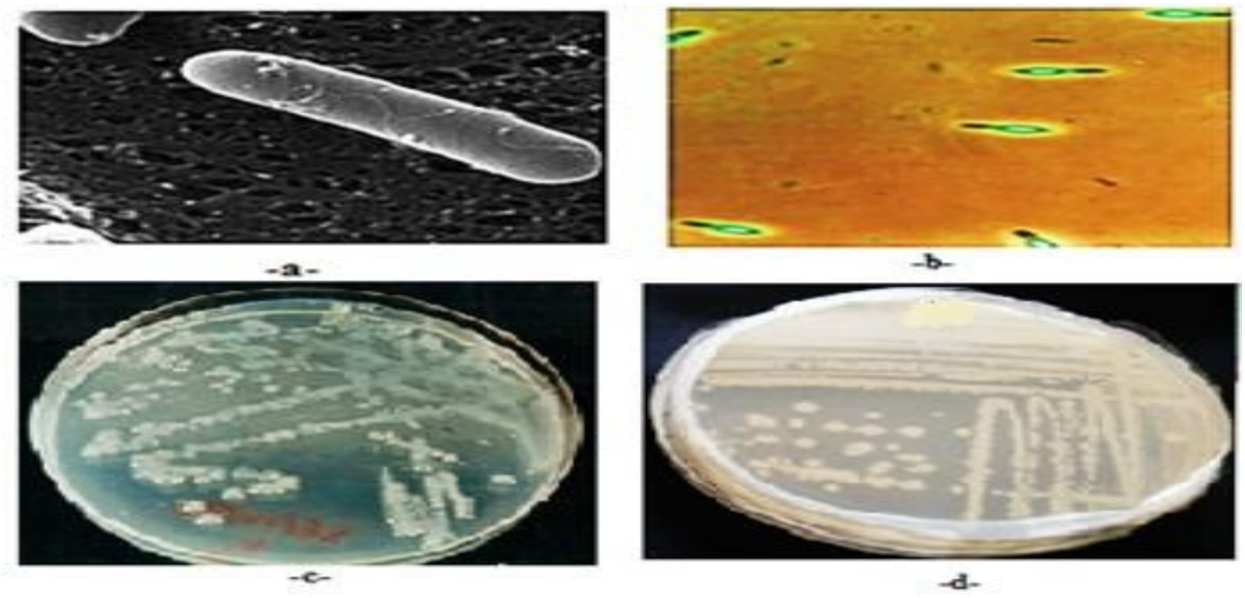


Fig 13: Observations microscopiques (microscope électronique à balayage, microscope optique) et macroscopique de *P. polymyxa.*

a : Micrographie au microscope électronique des cellules de*P. polymyxa* (Gr×30 000)(Raza et *al.*, 2008) ;

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.

3.2.2-Classification : La classification actuelle de *P. polymyxa* est la suivante :

Règne	**Procaryotae.**
Division	Firmicutes.
Classe	Bacilli.
Ordre	Bacillales.
Famille	Paenibacillaceae.
Genre	*Paenibacillus.*
Espèce	*P.polymyxa.*

3.2.3- Propriétés des *P. polymyxa*:

a-Fixation d'azote :

Mavingui **[66]** a montré que les souches bien identifiées à *P. polymyxa* fixent toutes l'azote de l'air puisqu'elles réduisent l'acétylène en éthylène.

Bien que la fixation d'azote n'ait pas de valeur taxonomique, au sein du genre Paenibacillus seules quatre espèces, *P.polymyxa*, *P.macerans*, *P.circulans* et *P. azotofixans* ont été décrites comme fixatrices d'azote (Seldin et *al.*, 1984 *in* **[67].**

L'activité nitrogénasique des souches de *P.polymyxa* a été mesurée par Athmani-Guemouri(2006) **[68]**. Une ou deux souches représentatives des 22 génotypes ERIC générés par l'analyse ERIC-PCR (Enterobacterial Repetitive Intergenic Consensus-Polymerase Chain Reaction) de 109 souches ont été sélectionnées. Seuls 13 types parmi les 22 ont montré une aptitude à réduire l'acétylène en éthylène, ce qui démontre qu'elles possèdent une nitrogénase

active. Certaines de ces souches sont très actives : SGH1 (isolée d'un sol cultivé avec le blé dur depuis 5ans), réduit l'acétylène avec un taux similaire à celui de *P. azotofixans* ATCC 35681^{T}qui est considérée comme étant l'espèce la plus active pour la fixation d'azote au sein du genre Paenibacillus**[67].** . La souche *P.polymyxa* ATCC 842 ^{T}testée par **[66]**, est incapable de réduire l'acétylène bienqu'elle possède le gène nif H.

Certaines souches de *P.polymyxa* isolées dans des sols algériens appartenant à des groupes phénotypiques différents sont aussi inactives **[66].** .

P.polymyxa est une bactérie anaérobie facultative qui peut exploiter la dénitrification comme processus respiratoire relayant la respiration aérobie. La capacité dénitrifiante de *P.polymyxa* a été clairement établie par**[65]**. Cet auteur a montré que l'oxygène influait sur la production par la souche *de P. polymyxa* S55 des oxydes nitreux, NO et NO2. Par ailleurs, des résultats préliminaires de l'étude de la dénitrification de la souche type de *P. polymyxa* ATCC 842^{T} et la souche *P.polymyxa* CF43 semblent montrer que les deux bactéries possèdent l'enzymeNO2-réductase, puisque l'adjonction de l'acétylène entraîne l'accumulation du NO2 dans le milieu de culture. L'acétylène inhibant, par compétition la réduction du NO2 en N2, en raison de l'analogie structurale des deux substrats**[66]** .L'intérêt de l'aptitude dénitrifiante des bactéries réside dans le fait qu'elles sont capables de s'adapter à la pression de sélection imposée par l'environnement rhizosphérique des plantes, qui constitue un milieu assez pauvre en oxygène. A ce titre, la proportion plus importante de souches dénitrifiantes de *P. polymyxa* isolées du rhizoplan peut être corrélée avec le fait que sur le rhizoplan une compétition pour l'oxygène est supérieure à celle qui prévaut dans le sol **[66]**.

b-Activité cellulolytique:

Les enzymes cellulolytiques (exo et endoβ-1,4-glucanases, et β-D-glucosidase ou cellobiase) sont certainement importantes pour les micro-organismes telluriques, quand on sait que 20% de photosynthétats d'une plante sont relargués par les racines sous formes de débris des cellules du cortex, de mucilage et d'exsudats solubles. La dégradation de ces macromolécules par les enzymes extracellulaires comme les cellulases, les lipases et les protéases conduit à la libération de composés de faibles poids moléculaires qui servent de nutriments à la microflore tellurique.(**Mavingui P., 1992)[66]** ont rapporté qu'un mutant de *Trichoderma harzianum*, hyperproducteur de cellulase, colonisait mieux les racines de blé que la souche sauvage.

Les *P. polymyxa* produisent des enzymes cellulasiques **[66]**. De plus, les gènes de la cellobiase etde l'endo –β- 1.4- glucanase de *P.polymyxa* ont déjà été identifiés et clonés avec succès chez *Escherichia coli* **[67].**

Mavingui **[66]** a voulu comparer la capacité cellulolytique de *P.polymyxa* en fonction de leur compartiment d'isolement (Rhizoplan, sol rhizosphérique, sol nu). Les résultats trouvés par ce chercheur montrent que toutes les souches, quelque soit le compartiment d'isolement, présentent une activité carboxyméthylcellulasique, avec des diamètres similaires de lyse. La souche cellulolytique *Cellulomonas uda* 20108 a donné un diamètre de lyse deux fois plus important. L'activité cellulolytique détectée par la carboxyméthylcellulose n'est pas discriminante pour les souches du sol et de la rhizosphère. . Cependant, l'activité carboxyméthylcellulasique ne reflète pas l'efficience des souches pour la dégradation de la cellulose native, de nature plutôt microcristalline. De plus, les souches de *P.polymyxa* ne sont pas connues pour être de véritables cellulolytiques contrairement à celles appartenant au genre *Cellulomonas*. Il a pu montrer, en utilisant une cellulose plus cristallisée (la MN300), que le pouvoir dégradant des souches de *P.polymyxa* est beaucoup moins élevé que celui de la souche de C*ellulomonas uda* 20108. Les zones de lyses causées par *P.polymyxa* paraissaient nettement plus réduites. De plus, certaines souches du sol non rhizosphérique et rhizosphérique ayant exhibées une activité carboxyméthyl- cellulasique ne dégradaient visiblement pas la MN300. Les deux souches du rhizoplan donnant des zones de lyse plus nettes. L'activité cellulolytique en relation avec d'autres enzymes telles les pectinases peut permettre aux souches de *P.polymyxa* les plus proches des racines, comme celles du rhizoplan, d'utiliser les macromolécules glucidiques présentes dans cet environnement.

c-Activité pectinolytique:

Les substances pectiques sont des macromolécules glucidiques d'origine exclusivement végétale, où elles participent à l'organisation de la lamelle moyenne et de la paroi primaire en formant un ciment qui lie les cellules les unes aux autres. Elles constituent, à ce titre, une barrière de protection. C'est pour ces raisons que les enzymes pectinolytiques des rhizobactéries pourraient leur permettre de pénétrer les cellules du cortex de la racine et coloniser ainsi l'endorhizosphère.

Pour tester la capacité pectinolytique de ses souches, **[66]** a utilisé tout d'abord une pectine peu méthylée qui permet la mise en évidence des enzymes de dépolymérisation

(polygalacturonases et pectine-transéliminases). Les résultats obtenus montrent que toutes les souches de *P.polymyxa*, quel que soit le compartiment d'isolement, présentent une activité dépolymérisante de la pectine en milieu gélosé, au même titre que la souche type pectinolytique de *Erwinia chrysanthemi* DSM 30179.Le diamètre des zones de lyse est dans l'ensemble équivalent. **[67]** ont rapporté des résultats similaires avec 13 souches deP.polymyxade la collection de l'Institut Pasteur, en utilisant le même substrat. Cependant, le test sur milieu gélosé ne permet pas de distinguer les souches selon leur niveau d'attaque de la pectine.

Il lui a semblé intéressant d'évaluer les niveaux d'activité pectinolytique en milieu liquide. En effet, de nombreux travauxont montré que les souches de *P.polymyxa* excrètent dans le milieu extracellulaire d'importante quantité d'enzymes pectinolytiquesde typeendo, notamment la pectatelyase encore appelée transéliminase **[67]**.

Une souche de *P.polymyxa* isolée du sol non-rhizosphérique et deux souches du sol rhizosphérique présentent les activités les plus élevées, alors que les deux souches du rhizoplan ont des activités deux fois plus faibles. Ces résultats laissent penser que les activités pectatelyases 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. En effet, il convient de souligner qu'une pathogénicité de *P.polymyxa* a déjà été décrite chez la pomme deterre et la tomate **[68]**. Il n'est pas impossible que les enzymes pectinolytiques produites par *P.polymyxa* en soient la cause, car ces enzymes sont impliquées dans de nombreux cas de pathogénicité **[67].** Cependant à l'étatactuel de nos connaissances nous ne pouvons établir la relation entre la pectinolyse et l'adaptation à l'environnement racinaire. On peut signaler le rôle nutritionnel des enzymes pectinolytiques bactériennes, puisque des souches de *P.polymyxa* et d'*Azospirillumirakense* sont capables de fixer l'azote de l'air en présence de la pectine comme seule source de carbone**[67]** .

d-Activité chitinolytique:

Les parois cellulaires d'un grand nombre de champignons phytopathogènes contiennent de la chitine, un polymère de N-acétyl-D-glucosamine.

Plusieurs travaux portant sur l'étude du contrôle biologique de pathogènes ont rapporté le rôle important joué par des enzymes chitinolytiques d'origine bactérienne, dans la protection des plantes **[65]** ainsi que **[67]** ont montréune lyse des hyphes mycéliens du

champignon *Gaeumannomyces graminis* var. tritici (Ggt) agent causal du piétin échaudage du blé, par des *Paenibacillus*, suivi d'une réduction importante de la maladie. Les bactéries chitinolytiques peuvent donc être considérées comme de bonnes compétitrices dans la rhizosphère des plantes. L'activité chitobiasique de divers genres bactériens a été corrélée avec leur aptitude à dégrader la chitine sur milieu gélosé.

De plus, ces auteurs ont montré que le test chitobiasique était plus sensible, puisque des souches incapables de dégrader la chitine en milieu gélosé se sont avérées positives pour l'activité chitobiasique.(**Mavingui P., 1992) [66]** a évalué la capacité chitinolytique de quelques souches de *P. polymyxa* par la mesure de l'activité de la chitobiase.Les résultats trouvés, montrent que les souches du rhizoplansont les plus actives et toutes sont chitobiase positive. Dans le sol non-rhizosphérique et rhizosphérique la proportion des souches chitobiase positive est respectivement de 72.5% et 81.1%, et l'on note la présence des souches dépourvues de l'activité chitobiasique. La différence est statistiquement significative ($P<0.01$) entre les compartiments rhizoplan et sol non rhizosphérique. Les souches de *P. polymyxa* du rhizoplan, de par leur activité chitinolytique plus élevée et plus fréquente, pourraient être plus antagonites vis-à-vis de champignons phytopathogènes que les souches du sol non-rhizosphérique. Toutefois, il serait intéressant de relier l'activité chitobiasique au pouvoir antifongique des souches **[66]**.

e-Activité xyloglucanase:

Les membres du genre *Paenibacillus s*ecrètent une variété d'enzymes extracellulaires parmi lesquelles figurent plusieurs types de β xyloglucanases (Priest, 1977). Les enzymes peuvent être divisées en deux catégories selon leur localisation *in vivo* : les endoenzymes, sont synthétisées et utilisées entièrement à l'intérieur de la cellule ; les exoenzymes, 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.

[68] réalisé un test de dégradation du xyloglucane sur vingt neuf souches de *P.polymyxa* isolées de la rhizosphère du blé dur dans des sols algériens. Les résultats ont montré que toutes les souches de *P.polymyxa* sont capables de dégrader ce polymère. Les fortes activités de dégradation duxyloglucanepar les vingt neuf souches peuvent être reliées à leur activité d'antibiose vis-à- vis des mycètes pathogènes et à leur vie saprophytique dans le sol.

f-Activité protéolytique:

P. polymyxa est caractérisée 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 **[68]**. 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.polymyxapourraient 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 ; autoprotection contre les molécules antagonistes produites par d'autres *P. polymyxa.*

g-Production de phytohormones:

P.polymyxa produit des auxines telles que l'acide indole-3-acétique (IAA) **[68]**.Ces phytohormones stimulent l'élongation du coléoptile et des racines, contrôlent l'abscission, participent dans le développement des ovaires en fruits, etc…

L'indole 3 éthanol (TOL), également produit par *P.polymyxa*, peut aussi avoir une importance particulière car il est facilement assimilé par la plante qui peut alors le convertir en phytohormone active IAA par l'enzyme TOL oxydase en présence de faible concentration en oxygène. A une forte concentration, le TOL devient toxique pour les plantes.

Synthétise des cytokinines. Ces phytohormones favorisent la germination des graines, la formation de nouveaux bourgeons et la stimulation de l'expansion foliaire (Mok, 1994), elles favorisent aussi la formation des racines **[69]**.

h-Effet de la production d'exopolysaccharides par *P.polymyxa* sur le sol:

Cette thématique était née de l'observation des quantités de sol adhérent aux racines du blé cultivé au champ. Dans des expérimentations d'inoculation en parcelles, ces quantités augmentent significativement quand la plante est inoculée avec une souche de *P. polymyxa* **[66].**.

L'hypothèse du rôle de la production d'exopolysaccharide bactérien dans l'augmentation de la quantité de sol rhizosphérique est avancée. Les *P.polymyxa* sont connus pour leur production delévane, synthétisé par la lévane-saccharase qui hydrolyse le saccharose, polymérise les résidus fructose et libère les résidus glucose utilisables par d'autres

voies métaboliques. On sait également que le saccharose est présent dans les exsudats racinaires du blé. Pour tester cette hypothèse, un mutant de *P.polymyxa* pour cette enzyme est construit par **[67]**, ces chercheurs montrent que la quantité de sol adhérent aux plantules de blé inoculées par ce mutant EPS- n'est pas différente de celle du témoin non inoculé, alors qu'elle est augmentée par l'inoculation de la souche sauvage EPS+ sur deux sols de texture différente.

Les bactéries produisant des exopolysaccharides se développent en biofilm dans la rhizosphère de plantes variées et ce phénomène semble assez répandu. L'EPS est bien produit in situ et plutôt dans les parties âgées du système racinaire. Les déterminants de cette production localisée sont à rechercher **[53].**

La production d'EPS bactérien change la porosité du sol dans la rhizosphère avec pour conséquence, une meilleure alimentation en eau et en nutriment de la plante **[54].**

3.2.4-Abondance relative de la population de *P.polymyxa* parmi les peuplements des bactéries telluriques ;

La méthode d'immunopiégeage, a permis à **[66].** 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 par 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 par 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 par 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 par 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). Ils 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 **[66]** .

(Mavingui P., 1992)[66]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 **[66].** et 1 à 5.10^5 bactéries/g de sol rhizosphérique sec .

3.2.5- *P. polymyxa* outil en biotechnologie :

Paenibacillus polymyxa est classé comme une bactérie formant une endospore et une bactérie à Gram positif, qui ont des propriétés bénéfiques innées dans les applications biotechnologiques modernes. elle favorisant la croissance des plantes qui ont directement profité aux plantes en améliorant la fixation de l'azote atmospherique, augmenter la solubilisation du phosphore et l'acquisition de fer dans la production de sols et de phytohormones.

Cela pourrait réduire la dépendance aux engrais chimiques, qui est maintenant une source de conflit environnemental et semble nocif pour l'homme. Par conséquent, l'application de *P. polymyxa* se concentre uniquement en tant qu'espèce microbienne fonctionnelle dans la production de biofertilisants. La découverte dans l'industrie microbienne de cette bactérie est la production de composés bioactifs comme les exopolysaccharides (EPS). L'EPS n'est pas seulement établie comme biofilm pour la colonisation des microbes et agit comme un puits pour les nutriments sur les racines des plantes dans la rhizosphère. Par conséquent, l'EPS de *P. polymyxa* agit également comme des agents de lutte biologique productifs contre les agents pathogènes. Par conséquent, *P. polymyxa* ayant une large gamme de métabolites antibactériens et de composés antifongiques, informe des compouds organiques volatils, des peptides et de l'hydrolyse enzymes, ces composés et biomatériaux pourraient être commercialisés en tant qu'agents de biocontrôle et application pharmaceutique.

De nos jours, le chercheur a examiné en détail et concentré son attention sur l'avantage potentiel de *P. polymyxa* avec de multiples fonctions biologiques qui ne peuvent être ignorées pour la santé humaine et le bien-être **[69].**

4-Matériel et Méthodes

4-1-Matériel

4 -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 : piège à gène» **[3]**. 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 **[68]** . Les critères utilisés pour le choix de ces souches sont mentionnés dans le Tableau III.

Tableau III : 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 (milieu LB et la gélose nutritive) , la solution tampon (tampon phosphate)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 m^2 (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)

4-2-Méthodes :

4-2.1-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.

4-2-1-1-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 **[70]**.

4-2-1-2- 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**[70]**.

4-2-1-2-1- Délimitation des unités de sols homogènes :

Les points de repères pour la délimitation de l'unité homogène sont les suivants **[70]**:

***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.

***abondance de cailloux** : 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 (11- 25 cm) .

4-2-1-2-2- 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.

4-2-1-2-3- 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 kg 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 **[70]**.

4-2.1.3. Analyses physico-chimiques:

4-2.1.3.1-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.

4-2.1.3.2- La perméabilité (K):

La perméabilité exprime la quantité d'eau qui traverse un sol à l'état saturé en une unité de temps **[70]**. 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 (**Henin S., Maurin M. et Mustin M., 1969) [71]** .

4-2.1.3.3- 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 **[70]**.

4-2.1.3.4- Dosage du carbone organique par la méthode de Anne:

La méthode dite de « Anne » est utilisée pour déterminer le Carbone organique dans les sols agricoles Cette méthode permet le dosage direct du Carbone organique par colorimétrie après oxydation de la matière organique par du bichromate de potassium en excès, en milieu sulfurique et à 135°C. En effet, la quantité de chrome +III formée est proportionnelle à la teneur en carbone organique présente dans le sol.

4-2.1.3.5- 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

4-2.1.3.6- 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.

4-2.1.3.7- 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 **[70]**.

4-2.1.3.8- 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) **[70].**

4-2.1.3.9- 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) **[70].**

4-2.1.3.10- 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 **[72]** .

4-2.1.3.11- 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) **[70].**

4-2.1.3.12- 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) **[70].**

4.2.1.4- 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.

4.2.2-Méthodes appliquées aux micro-organismes :

4.2.2.1-préparation de l'inoculum bactérien :

Les inoculums bactériens ont été produits selon la méthode décrite par **(Chabot R., Antoun H. et Cescas M.P., 1993**) **[73]**. 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 100 rpm/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 14).**

4.2.2.4.2-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), en utilisant une numération directe sur spectrophotomètre à (**λmax = 660 nm)**

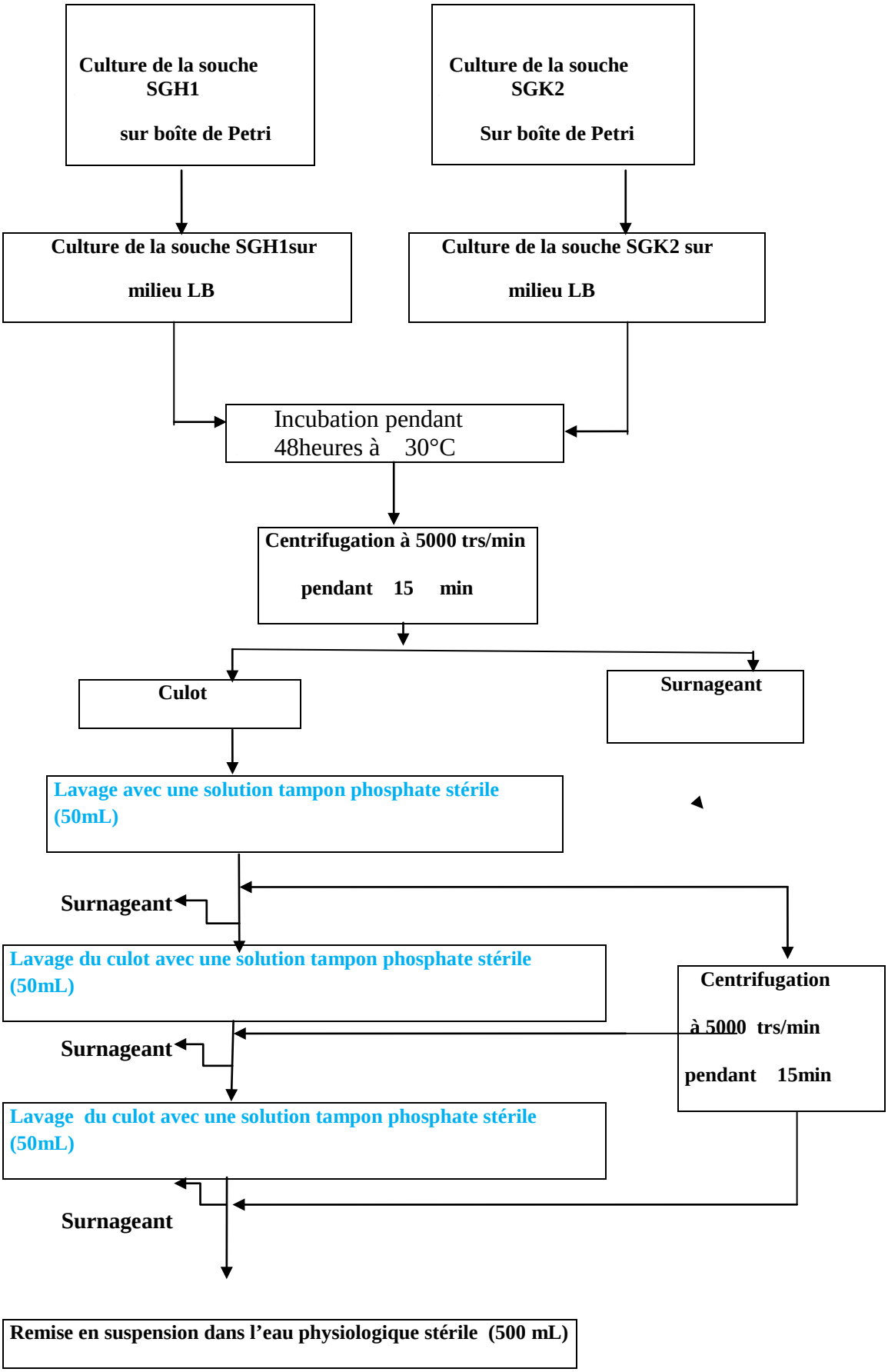


Fig 14: Préparation de l'inoculum bactérien **[73]**.

4.3.6.1-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 15 : 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) **[53]** .(CAC (100%)=70ml CAC (60%)=42ml).

4.3.6.2- Conditions climatiques : Les pots on été placés dans un laboratoire de la faculté des sciences (université de Médéa) sous une température de 20 à 30°C, dans un local indifféremment clair ou obscur.

4.3.6.3- Dispositif expérimental

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

T0 **: témoin aspergé avec l'eau physiologique :**

T1 **: traitement d'inoculation avec la souche SGH1 10^4 , bactérie /mL,**
T1 **: traitement d'inoculation avec la souche SGH1 10^6 bactérie /mL**
T1 **: traitement d'inoculation avec la souche SGH1 10^8 bactérie /mL**

T2 **: traitement d'inoculation avec SGK2 10^4 bactérie /Ml**
T2 **: traitement d'inoculation avec SGK2 10^6 bactérie /mL**

T2 **: traitement d'inoculation avec SGK2 10^8 bactérie /mL**

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) (**Figure 16**).

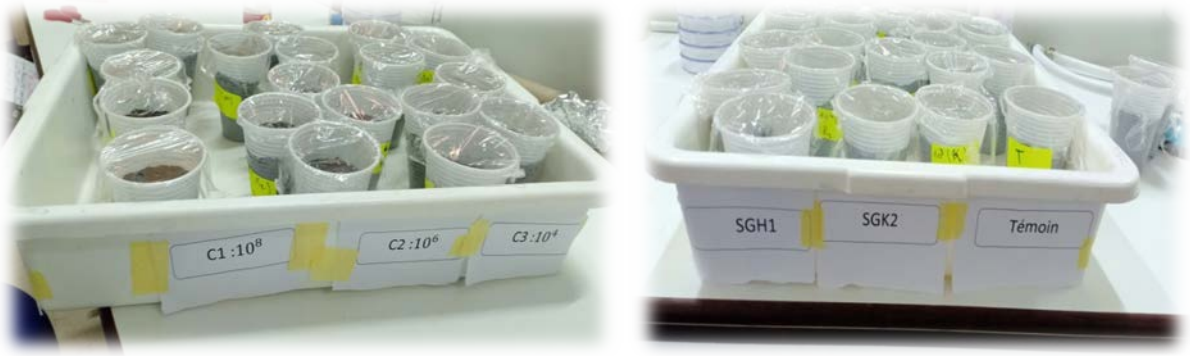


Fig 16 : Dispositif expérimental représente l'agencement de l'essai en premier jour de l'inoculation du sol en pots (lab. de Biologie fac. Sciences).

4.3.7-Dynamique des souches bactériennes dans le milieu édaphique :

4.3.7.1. 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 6000 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. Cette étape permet la purification de solution et la séparation par une membrane .

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 **[34].**

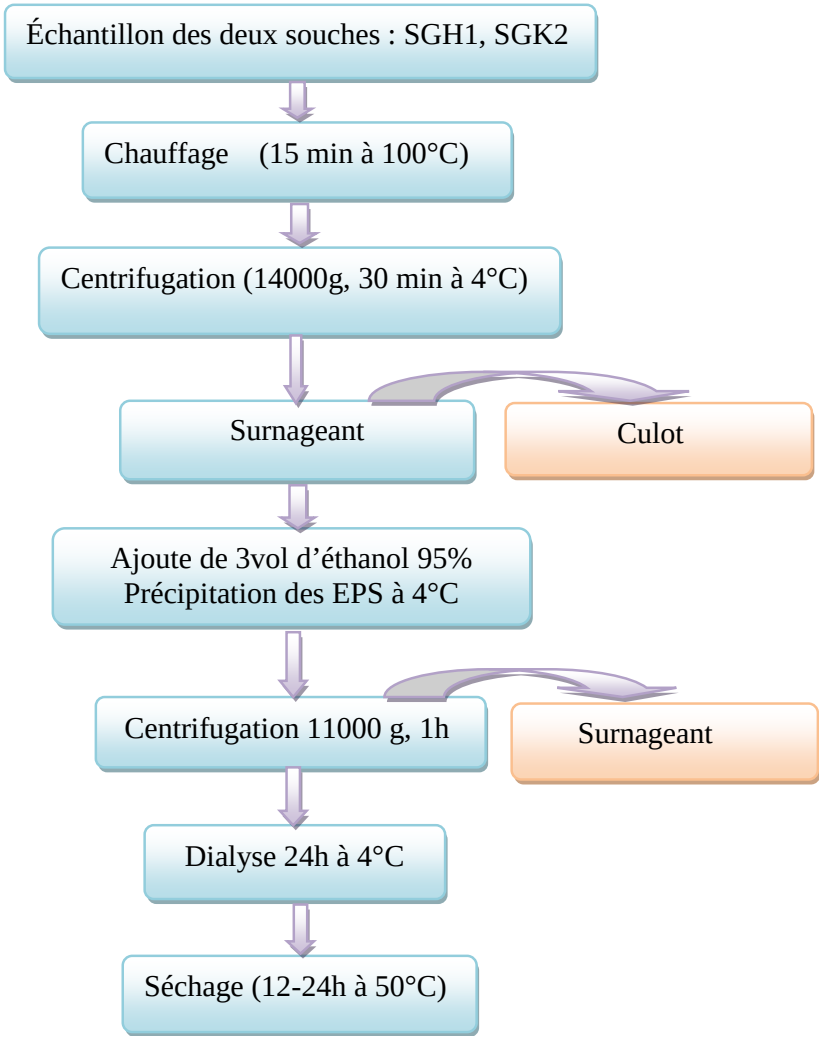


Fig 17: Protocole d'extraction des EPS des deux souches bactérienne **[34].**

4.3.7.2. Effet de l'introduction des deux souches sur les caractères physiques du sol

a. Appréciation de la texture :

La texture est déterminée suite à une analyse granulométrique d'un échantillon de terre fine (prélevé à partir de chaque pots après séchage du sol) .Il est à noter que différents traitements préalables (chimiques et/ou aux ultrasons) sont appliqués à l'échantillon de manière à obtenir une bonne dispersion des particules. Ces traitements servent donc à désagréger complètement les agrégats, ce qui implique de détruire les « ponts » qui constituent le « complexe argilo-humique » : un premier traitement assure la destruction de la

matière organique par l'eau oxygénée, un deuxième traitement utilisant un sel dispersant sera ensuite effectué.

b. Détermination des paramètres physiques :

b.1.Indice de battance : IB

Les sols riches en limons sont sensibles à la battance (tendance du sol à se tasser en surface sous l'effet de la pluie et à former une croûte imperméable à l'air et à l'eau). La battance se développe surtout dans les horizons de surface renfermant moins de 3 % de matière organique. La battance est le signe de risque d'érosion et d'une structure fragile, sensible au tassement. Le calcul de l'indice de battance (I.B.) permet de mieux apprécier les risques :

$$IB = \frac{(1.5 \text{ x } \%\text{limon fin}) + (0.75\text{x } \%\text{limon grossier})}{\%\text{ argile} + (10 \text{ x}\% \text{ matière organique}}$$

Tableau IV : Appréciation de l'indice de battance

Indice de battance	Appreciation
>2,0	Sol très battant
2,0>IB>1,8	Sol battant
1,8>IB>1,6	Sol assez battant
1,6>IB>1,4	Sol peu battant
IB<1,4	Sol non battant

b.2. Charge en éléments grossier : %EG

La présence d'éléments grossiers en quantité plus ou moins abondante peut induire des effets négatifs : gêne pour les semis et les plantations ;

diminution du volume prospectable par les racines et donc de la réserve en eau (dans le cas particulier de la craie, l'abondance des éléments grossiers augmente, au contraire, la réserve en eau) ; une forte pierrosité n'intervient pas en tant que telle comme un obstacle à l'enracinement des arbres (nombre de belles forêts sont installées sur des sols fort caillouteux). Par contre, la forme (aplatie ou arrondie,...) et la disposition (horizontale,...) des éléments grossiers influent de façon primordiale sur la capacité d'enracinement ; rupture des remontées capillaires (bancs de graviers en situations alluviales,...) ; obstacle ou gêne pour le

travail du sol.

La charge en éléments grossiers ou pierrosité est souvent exprimée en % du poids de l'échantillon :

$$\%\mathbf{E.G} = \frac{\textbf{Poids du refus sur passoire de 2mm de O}}{\textbf{Poids de la terre brute séché a l'air}} \text{x } 100$$

Il est toutefois souvent intéressant de passer à une **expression en volume**, pour estimer la réserve en eau des sols caillouteux, par exemple.

Pour la cartographie des sols de l'Aisne, Jamagne a fait évaluer la charge en volume des 40 premiers centimètres des sols, exprimée selon l'échelle suivante :

Tableau V : Appréciation de la charge en éléments grossier : %EG

Niveau de l'echelle	Signification
0	charge légère ou absente
1	charge faible
2	charge moyenne
3	charge importante
4	mécanisation rendue très difficile pour les machines agricoles courantes

b.3.La stabilité structurale : IS

La stabilité structurale est une estimation, ou une mesure, de la résistance des agrégats, donc des porosités structurales, face aux agents qui peuvent les détruire, et en particulier face à l'eau.

C'est ainsi que sur le terrain, on peut se rendre compte de la stabilité structurale des agrégats en en plaçant un dans un verre rempli d'eau distillée. On observe s'il reste stable ou s'il se détruit et, dans ce cas, la vitesse à laquelle la destruction, c'est-à-dire l'effondrement de l'agrégat, se fait.

Les tests **[71]** permettent de mesurer la stabilité des agrégats : La terre sèchée à l'air est forcée à la main à travers un tamis de 2 mm à mailles carrées. On prélève ensuite trois échantillons de terre tamisée :

un échantillon sera soumis à un pré-traitement à l'alcool ;

un deuxième échantillon sera soumis à un pré-traitement au benzène ;
le troisième échantillon ne subit pas de pré-traitement.

Les trois échantillons subissent pour finir un traitement consistant en un tamisage sous l'eau, sur un tamis de 0,2 mm. On détermine alors pour chaque échantillon : le % d'agrégats qui ont résisté ; la fraction inférieure à 0,2 mm qui reste en suspension.
On calcule alors un indice de stabilité Is de la façon suivante :

$$\mathrm{IS} = \frac{\%\ \textbf{particules inferieures 20 } \textit{micro}\ \textbf{m, maximum}}{\frac{\textbf{Aga + Agb + Age}}{\textbf{3}} - \textbf{0.9 SG}}$$

avec :

Aga : taux d'agrégats stables après prétraitement à l'alcool ; **Agb** : taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène ; **Age** : taux d'agrégats stables sans prétraitement

Les particules de moins de 0,2 mm sont, exprimées en %, celles mesurées à l'issue du pré-traitement le plus dispersant (en général celui au benzène).

Afin de pouvoir comparer les indices obtenus pour différents sols ou horizons, on a convenu de déterminer des classes de stabilité (Tableau ci-dessous) basées sur le logarithme décimal de Is x10, soit log 10 Is qui s'échelonne, en général, de 1 à 3 (les valeurs de Is pouvant quant à elles s'échelonner de 0,1 à plus de 100 !).

Tableau VI : Appréciation de la stabilité structurale : IS

— Classes de stabilité structurale d'après log 10 Is

Stabilité	log 10 Is	Evolution structurale probable
Très stables	< 1	— Aucune manifestation de désagrégation. — Effet durable des sous solages et labours profonds réalisés en conditions sèches.
Stables	1,0-1,3	— Battance peu probable et peu intense. — Prise en masse hivernale rare. — Sensibilité à l'érosion faible, même sur pentes fortes.
Stabilité médiocre	1,3-1,7	— Battance fréquente et accentuée en conditions pluvieuses. — Prise en masse lors d'excédents hydriques prolongés. — Erosion en rigole sur pentes fortes (> 3 %).
Instables	1,7-2,0	— Battance et prise en masse fréquentes en conditions climatiques normales. — Erosion fréquente sur pentes moyennes.
Très instables	> 2	— Battance et prise en masse généralisées. — Imperméabilité totale en fin d'hiver. — Erosion sur pentes très faibles.

b.4. le potentiel matriciel hydrique :

La simple teneur en eau du sol ne suffit pas pour caractériser la relation existant entre ce sol et sa teneur en eau. Il faut savoir avec quelle énergie cette quantité d'eau est retenue.

b.4.1.Capacité de stockage pour l'eau : CSE

Le réservoir total ou capacité de stockage pour l'eau (C.S.E) correspond au volume total d'eau que l'horizon ou le sol contient.

C.S.E = réservoir en eau utilisable + réservoir en eau non utilisable

b.4.2.La perméabilité :

La perméabilité d'un sol est d'autant plus élevée que sa macroporosité est plus forte : plus le sol est formé d'éléments arrondis et de même taille, plus il est perméable, que ces éléments soient des grains de sables ou des agrégats. Plus il est formé d'éléments de taille différente imbriqués les uns dans les autres, plus il est imperméable.

C'est pourquoi :

Les sols perméables sont :

soit des sols à texture grossière où dominent les sables et graviers peu enrobés de colloïdes.

Il s'agit de sols **filtrants**.

soit des sols à texture fine, mais à structure fragmentaire, surtout grumeleuse. Cette structure, rendue possible par un taux suffisant d'argile, doit être stabilisée par un taux suffisant d'humus et de calcium, faute de quoi, après une infiltration rapide des premières pluies, les colloïdes subissent une dispersion qui freine de plus en plus la percolation.

soit des sols humifères après une période sèche : la réhumectation très lente de l'humus, substance peu « mouillable » explique leur excellente perméabilité. Mais à l'état humide, ils se gonflent et retiennent beaucoup d'eau.

b.4.3.Réservoir utilisable maximale (RUM)

Il est important pour le forestier d'estimer la quantité maximale d'eau que le sol peut stocker. En effet, la réserve en eau constitue un facteur limitant de la productivité et de l'implantation de certaines essences forestières

Sur le terrain :

Des estimations rapides de la réserve en eau maximale (R.U.M.) peuvent être effectuées à partir de la seule appréciation de la texture.

En effet, cette méthode d'évaluation dite méthode des textures nécessite seulement :

des données que l'observateur peut apprécier sur le terrain : l'**épaisseur de l'horizon**, la **teneur volumétrique en éléments grossiers** et la **texture de la terre fine**

En laboratoire :

En ce qui concerne la **terre fine**, le R.U.M d'un horizon est estimé sur échantillons grâce à la mesure de deux niveaux d'humidités : **l'humidité à la capacité au champ**

Le R.U.M. de l'horizon se calcule de la façon suivante :

$$\textbf{R.U.M. (mm) = (C.R. - HPF) x E(mm) x da}$$

Avec : **E** = épaisseur de l'horizon (en mm).

C.R. et HPF étant exprimés en pourcentages pondéraux (g d'eau / 100g de terre fine exprimé en %), cette méthode de calcul nécessite également la mesure ou l'estimation de la densité apparente da (rapport entre le poids de l'échantillon sec et le poids d'un volume d'eau occupant le même volume apparent) de la terre fine de l'horizon.

Références bibliographiques

IV. Références bibliographiques :

[1] :Stemmer M., Gerzabek MH. Kandeler E, 1999 -Invertase and xylanase activity of bulk soil and particle-size fractions during maize-straw decomposition. *Soil Biology and Biochemistry* **31**:9-18 p.

[2] : Ameur, H , 2014 - Effet d'osmoprotecteurs naturels sur la restauration de croissance de *Streptomyces* et de plantes d'intérêt agricole sur sol salé ou aride. Université Ferhat Abbas Sétif 1, Faculté des Sciences de la nature et de la vie. Thèse de doctorat.

[3] : Guemouri S., 1992- Isolement et caractérisation des souches de *Bacillus polymyxa* isolées de différents sols algériens. Thèse de Magister, USTHB-Alger, 111p.

[4] : Raoul c .2018- le sol, France agricole, 2éme éditions,2013,678 pages .

[5] : **Chloropylle et mur pierres** ; https://chlorophylleetmurdepierres.com/quels-sont-les-differents-types-de-sol/ ;page consultée le 11/02/2020).

[6] : Soltner D, 2012 - publié par : Liliane Beauvais.

[7] :Identification et classification des sols ; consultez le 15/2/2020; /www.univ-setif.dz/facultes/ft/externe/departements/gc/cours-MDS-2TCGC-2016-chap2.pdf)

[8] : Jamagne, M. 1967 - Bases et techniques d'une cartographie des sols.

[9] :Soltner D , 2004-Distribution liquid et voie métabolliquec chez quatres bactéries *Gramnégative Hydrocarbonoclaste*. Variation En Fonction De Sources De Carbone. Doctorat De L'université PARIS 6 .

[10] :Gobat J.M, Aragno M et Matthey W ., 2010- Le Sol Vivant : Base De Pédologie Et Biologie Des Sols). 3eme Edition Revue Et Augmentée P150-165.

[11] : Didrich C et Verdure M , 1975- Le Comportement Physique Des Tourbes En Cours De Culture P H M. Revue Horticole.160 ; P 13-20.

[12] : Koller E, 2004-Traitement Des Pollutions Industrielles. Edition DUNOD Paris. P 277-347.

[13] : Blanc D, 1985- Les Structures Hors Sol INRA Ed Louis.Paris.409p.

[14] : Calvet, R, 2003 - « Le Sol Propriétés Et Fonctions », Tome 1, France Agricole DUNOD, 455 P.

[15] : Boudouch O, 2009- « Étude De Dépollution Des Sols Par Extraction Sous Pression Réduite .Application Au Traitement Des Composes Organique Volatiles ». Thèse De Doctorat. Institut National Des Sciences Appliquées De Lyon.

[16] : Benton J , 2001- Plant Nutrition and Soil Fertility Manual, Second Edition ; : Laboratoire de fertilité des Sols) ; institut nationnal de recherche agronomique (Alger)

[17] : Benton J , 2013- Notions sur les propriétés chimiques du sol et la nutrition des plantes : Laboratoire de fertilité des Sols) ; institut nationnal de recherche agronomique (Alger).

[18] : Falkowski G, Godfrey. V , Philos Trans R. ; 2008- Electrons, life and the evolution of Earth's oxygen cycle : Biol Sci. 2008 Aug 27; 363(1504): 2705–2716

[19] : Falkowski G, Godfrey. V , Philos Trans R. ; 2009- Electrons, life and the evolution of Earth's oxygen cycle : Biol Sci. 2009.

[**20] : Andrew H, Donald E , 2012-** Fundamentals of geobiology, Chichester, West Sussex, John Wiley & Sons ., 2012, 93–104 p.

[21] : Andrew H, Donald E , 2013- Fundamentals of geobiology, Chichester, West Sussex, John Wiley & Sons ., 2013, 90–100 p.

[22] : Andrew H, Donald E , 2014- Treatise on Geochemistry, Elsevier, 2014, 437–473 p. , « The Global Oxygen Cycle »

[22] : http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/293/5531/839

[23] :David C. Catling, K , Zahnle J and Christopher M ., 2001-Biogenic Methane, Hydrogen Escape, and the Irreversible Oxidation of Early Earth) Science 293 (5531), 839.

[24] : http://crdp.ac-amiens.fr/edd/air/air_maj_detail_p1_4.htm

[25] : http://www.unifa.fr

[26] : Écosystème, 3e édition, Dunod

[27] : Précis d'écologie, 8e édition, Dunod

[28] : Cambfort G, 2005 - l'eau dans le sol : consultée le 14/02/20020

[29] :Lareal L, 2005- l'eau dans le sol ; 2005.; consultée le 14/02/20020

[30] :Costet A, 1983- l'eau dans le sol ; 2005.; consultée le 14/02/20020

[31] : Le sol est vivant ; Propriétés médicinales du Pau d'arco, Fiches d'information INRA Préserver la qualité biologique des sols : http://www.inra.fr/internet/Directions/DIC/ACTUALITES/DOSSIERS/sol/pdf/fichechaussod.pdf

[32] : Fiche technique no 12-052 du MAAARO, Équation universelle des pertes en terre

[33] : Lavelle, P., et Spain, A. V. 2001 -Soil ecology. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, the Netherlands): 654 p.

[34] : Ranjard, L., et Richaume, A. 2001- Quantitative and qualitative microscale distribution of bacteria in soil. Research in microbiology, 152(8), 707-716.

[35] :Thorm, G, 1997- The fungi in soil. Modern Soil Microbiology. Marcel Dekker, New York, 63-128.

[36] : Moore, J. C., et de Ruiter, P. C. 1991- Temporal and spatial heterogeneity of trophic interactions within below-ground food webs. Agriculture,
Ecosystems & Environment, 34(1-4) : 371-397p.

[37] : Bloem, J., Lebbink, *G.*, Zwart, K. B., Bouwman, L. A., Burges, S., Devos .J. A. & De Ruiter, P.C. 1994- Dynamics of microorganisms, microbivores and nitrogen mineralization in whinterwheat fields under conventional and integrated management. Agriculture, Ecosystems and Environment 51:129- 143 p.

[38] : Moore et Ruiter, De Ruiter, P. c., Van Veen, J. A., Moore, J. c., Brussaard, L. & Hunt, H. W. (1993 - Calculation of nitrogen mineralization in soil food webs. Plant and soil 157,263-273 p.

[39] : Ruiter, P. D., Veen, J. V., Moore, J. C., Brussaard, L., & Hunt, H. W. 1993 - Calculation of nitrogen mineralization in soil food webs. *Plant and Soil*, *157*(2): 263-273 p.

[40] : Les constituants solides du sol . janvier 2010 ;3ème version

[41] : Lynch, J. M., & Leij, F. 1990 - Rhizosphere. John Wiley & Sons, Ltd.

[42] : Rovira A and Dayey B., 1971- Biology of the rhizosphere. In The Plant root and its Environnement, Ed C E.W. University Press of Virginia, Charlotes ville.

[43] : Pinton Rand Nannipoeri P., 2001- The rhizosphere, New York.

[44] : Gobat J.M. et Matthey W., 1998- Le sol vivant.Bases de pédologie, biolgie des sols. Presses Poly techniques et Universitaires Romandes, Collection Gérer l'Environement N° 14, Lausanne.569 p.

[45] : Clark F.E., 1949- Soil microorganisms and plant roots. Advances in Agronomy, 1, 241288.

[46] Sobtis L, 2013 - Isolement des bactéries telluriques résistantes aux effets de salinité. Mémoire magister. Microbiologie appliquée, université de KASDI –MERBAH, Ouargla. 38p.

[47] : Lynch J.M and Whipps J M, 1990-Substrate flow in the rhizosphere .Plant and Soil 129 :110.

[48] : MC Near Jr., 2013 - The Rhizosphere - Roots, Soil and Everything In between. Nature Education Knowledge 4(3):1.

[49] : Chang W , et Bandurski R.S ., 1964 - Exocellular enzymes of corn roots. Plant physiology. 39: 60-64.

[50] : Morre R.B., Tindall B INDALL B.J., et Palleroni N.J., 2006- Nonmedical: Pseudomonas, p.646-703. In M. Dworkin, S. Falkow, E.Rosenberg, K. H. Schleifer, et E. Stackebrandt (ed.), Prokaryotes, Springer, USA.

[51] : Revira D, 1973-Zones of exudation along plant roots and spatial distribution of microorganismes in the rhizosphere .Pesticide science .4 :361-366.

[52] : Prescot M., Harley J.P et Kleind D.A., 1999-Microbiologie (3ème Eds).DeBoeck Université.(Ed) Bruxelles Belgique.1014PP.

[53] : Alami Y., 1997-Rôle d'une bactérie productrice d'exopolysaccharides (Rhizobiumsp.,) 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 I,

[54] : Jones D.L. and Darrah P.R., 1994 – Amino-acid influx at the soil-root interface of Zea mays L. and its implications in the rhizosphere. Plant and Soil, 163, 1-12.

[55] : Mathieu C. et Pieltain F., 2003 - Analyse chimique des sols, méthodes choisies, Ed : Tec et Doc Lavoisier, 250p.

[56] : Lespinat P.A. et Berlier Y., 1975- Les facteurs externes agissant sur l'excrétion racinaire. C.R. Coll. " Rhizosphère". Bull. Soc. Bot. Fr., 122 , 21-30.

[57] : 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

[58] : Richardson A.E., Barea J.M., McNeill A.M. and Prigent-Combaret C., 2009- Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by micro-organisms. Plant and Soil, 321,305–339.

[59] : Neal J.L., Larson R.I. andArtkinson T.G., **1973** - Changes in rhizosphere populations of selected physiological groups of bacteria related to substitution of specific pairs of chromosomes in spring wheat. Plant and Soil., 39, 209- 212.

[60] : 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.

[61] : 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. Lorraine, 200 p

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

[63] : 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. Antonie van Leeuwenhoek, 64, 253-260.

[64] : 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.

[65] :Munch J.C., 1991 - Nitrous oxide emission from soil as determined by the composition of denitrifying microbial population. Developments in geochemistry, 6, 309-316.

[66] : 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.

[67] : Seldin L., Silva De Azevedo F., Alviano D.S., Alviano C.S. and De Freire M.C., 1999- Inhibitory activity of Paenibacillus polymyxa SCE 2 against humain pathogenic micro-organisms. Letters in Appl. Microbiol., 28, 423-427

[68] :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.

[69] : Sazwani Daud N, Jabir Mohd Din A, Azzuan Rosli M, Azam Z, Nor Zalina O , Roji Sarmidi M.,2019- *Paenibacillus polymyxa* bioactive compounds for agricultural and biotechnological applications. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*,18.P1-7

[70] :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

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

[72] : 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.

[73] : 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.

Annexes

Annexe

Annexe I :

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**

K2HPO4……..…… …..…60g/L

KH2PO4……..40g/L

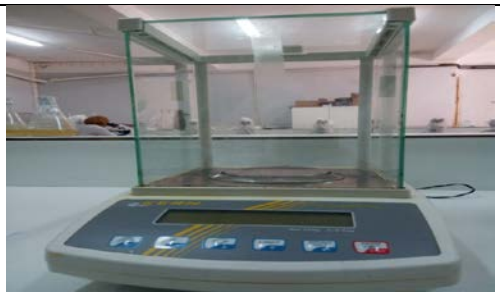
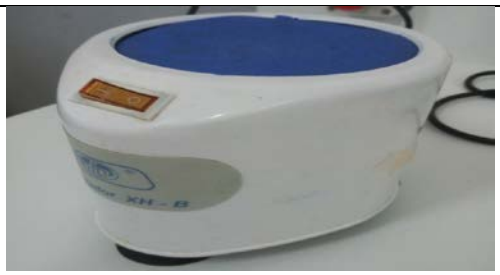
Eau distillée (qsp)……..…….….1000 mL

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:

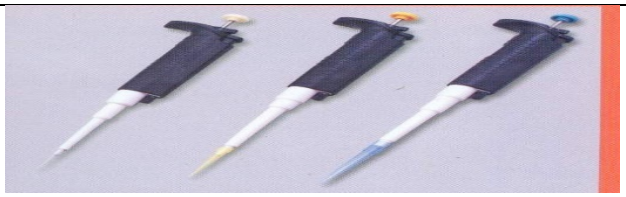
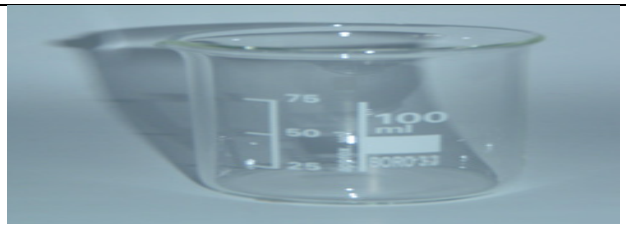
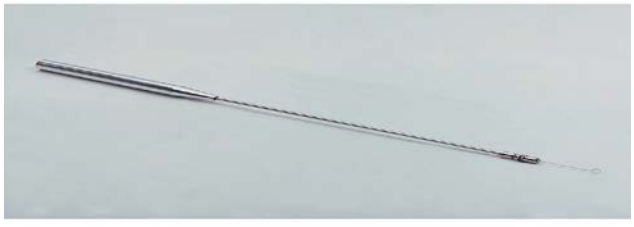
Instruments	Utilisation	Type d'appareillage
1- Bec bensène	Pour assurer une stérilisation instantanée.	
2- Bain marie	pour la transfusion des milieux de culture	
3-Autoclave	stérilisation á la vapeur	
4-Réfrigérateur	conservation des souches et des réactifs	
5-Microscope optique	Observation des micro-organismes	

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 en plastique	-pour l'inoculation et l'ensemencement -coloration de Gram	

Annexe

2-Micropipette	pour une prise très précise	
3-Becher á différents volumes	Contenir les solutions, les suspensions	
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 colonie bactériennes	

Annexe

9-Portoirs	Porte les tubes à essai	
10-Poires	Aspirer les solutions	