

La liste des abréviations

A : Argile

ADP: Adénosine diphosphates

ATP: Adénosine tri phosphates

C¹³⁷_s: Césium 137

CA : Calcaire actif

Ca : Calcium échangeable

CCaMK : Protéine kinase calcium et calmoduline dépendante

Ce: Conductivité électrique

CEC : Complexe d'échange cationique

CT : Calcaire total,

D10 : Parcelles d'expérimentations avec Double inoculation de la souche Rhizobienne S10+Myc

D14 : Parcelles d'expérimentations avec Double inoculation de la souche Rhizobienne S14+Myc

D24 : Parcelles d'expérimentations avec Double inoculation de la souche Rhizobienne S24+Myc

Ds/m : décisiemens par mètre

Facteur Myc : Les facteurs qui mènent à la mycorhization des racines

Facteur NOD : Facteurs qui aboutissent à la nodulation

FAO: Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

K : Potassium assimilable

L : limons

LF : Limons fins

LG : Limons grossiers

MA : Mycorhizes à arbuscules

MAP : Membrane péri arbusculaire

Mg: Magnésium échangeable

Mixte: Parcelles d'expérimentation d'Inoculation mixte avec les 3 souches rhizobiennes (S10 + S14 + S24) + endomycorhizes

MO: Matière organique

Mo : molybdène

MP fongique : Membrane plasmique fongique

MP végétale: Membrane plasmique végétale

mS/m : Millisiemens par mètre

MVA : Mycorhizes à vésicules et Arbuscules

Myc: Parcelle d'expérimentation, avec simple inoculation endomycorhizienne

N: Azote total

N₂ : L'azote atmosphérique

Na : Sodium échangeable

NFs : NOD factors (les facteurs NOD)

NH₄⁺: Ion d'ammonium

NO₃⁻ : Nitrate

P: Phosphore assimilable

PAM : Protéine kinase calcium et calmoduline dépendante

PAS : Espace péri arbusculaire

Pi: Phosphore minéral

PIT: Pre infection thread

PPA: Pre Penetration Apparatus

S : Sable

S10, S14, S24: Parcelles d'expérimentations, représentant des simples inoculations avec des souches Rhizobiennes S10, S14, S24

Sans acacia : Sol nue

SF : Sable fin

SG : Sable grossier

Sr⁹⁰ : Strontium-90

T1 : Premier trimestre d'expérimentation sur champs

T2 : Deuxième trimestre d'expérimentation sur champs

T3 : Troisième trimestre d'expérimentation sur champs

T4 : Quatrième trimestre d'expérimentation sur champs

T5 : Cinquième trimestre d'expérimentation sur champs

T6: Sixième trimestre d'expérimentation sur champs

USDA: United States Department of Agriculture

Liste Des Figures

	Page
Figure 1 : Exemple d'organismes fixateurs d'azote d'après Moat et al . , 2002.....	4
Figure 2: Arbre phylogénétique déraciné des séquences d'ADNr 16S de la sélection α -, β -et δ -protéobactéries d'après Masson-Boivin et al. , 2009	5
Figure 3 : Représentation schématique de la formation d'un nodule d'après E. Luyten et J. Vanderleyden, 2000	6
Figure 4 : Réponses physiologiques de la plante aux facteurs Nod..... d'après Downie et Walker, 1999	7
Figure 5 : Représentation schématique d'une coupe dans un nodule fonctionnelle d'après Dixon et Kahn., 2004	8
Figure 6 : Structure cristallographique de la nitrogénase d'après Dixon et Kahn., 2004	9
Figure 7: Processus de la fixation biologique de l'azote par le complexe enzymatique la nitrogénase d'après Moat et al., 2002.....	10
Figure 8 : La transamination ou l'aminotransfert. Le groupement aminé est transféré de l'acide aminé 1 sur un α -cétoacide pour former l'acide aminé correspondant (acide aminé 2) d'après Zinsou , 2013.....	12
Figure 9 : Types de symbioses mycorhiziennes chez les végétaux. D'après Selosse et Le Tacon ,1998	15
Figure 10 : La taxonomie actuelle des arbuscules mycorhizien d'après Dodd , 2000.....	16
Figure 11 : Établissement de la symbiose mycorhizienne à arbuscules d'après Parniske 2008 et Smith et <i>al.</i> ,2002.....	17
Figure 12 : Schémas du pre penetration apparatus (PPA) et du pre infection thread (PIT) d'après Parniske , 2008.....	18
Figure 13. Représentation schématique d'un arbuscule d'après Parniske 2008 et Smith et <i>al.</i> , 2002.....	19
Figure 14. Les différentes fonctions des arbuscules mycorrhiziens dans les écosystèmes terrestres d'après Garg et Chandel, 2009.....	21
Figure 15 : Le triangle de texture américain selon USDA d'après Giasson et Jaouich , 2008.....	24
Figure 16. La disponibilité des nutriments et de l'activité microbienne affectée par le pH du sol d'après Brady, 1990	26

Figure 17: Gammes de pH extrêmes pour la plupart des sols minéraux et gammes dans les régions humides et régions arides des sols d'après Brady et Weil, 2008.....	27
Figure 18: Le pH du sol et la croissance des plantes d'après Whiting et al., 2011.....	27
Figure 19 : Classification et rôle des organismes vivants dans le sol selon leur taille, leur habitat et leur fonction d'après Girard et al. 2005.....	32
Figure 20 : Comptage des grands groupes de microorganismes dans un sol fertile d'après Roger et Garcia, 2001.....	35
Figure 21. Le cycle de carbone selon d'après Fortin, 2011.....	39
Figure 22 : Le cycle de l'azote d'après Lianes, 2011.....	41
Figure 23 : Cycle du phosphore d'après Davet, 1996.....	42
Figure 24 : Le cycle du soufre d'après Lianes, 2011.....	43
Figure 25 : Le cycle biologique du fer d'après Gobat et al., 1998.....	44
Figure 26 : Rôle des polysaccharides dans l'agrégation du sol d'après Gobat et al, 2010.....	45
Figure 27 : Réseau de filaments mycéliens réunissant des particules minérales et organiques d'après Davet ,1996.....	46
Figure 28 : Carte de situation de la zone d'étude (Echelle. :1 /19.450.000e ; détail 1/ 2000 ^e).....	52
Figure 29 : Impact sur l'occupation des terre, ech : 1/10000 d'après E.I.E de la sablière de Terga, 2000.....	54
Figure 30 : Dispositif des parcelles d'expérimentation, en blocs complets à randomisation totale.....	56
Figure 31 : Les sites de re-végétalisation à différent temps après plantation T0, T1, T2, T3, T4,T5,T6.....	59
Figure 32 : Variation des teneurs en pH des sols au cours du temps T1, T2, T3, T4, T5,T6.....	69
Figure 33 Variation de la salinité des sols au cours du temps T1, T2, T3, T4, T5,T6.....	70
Figure 34 : Variation de la teneur du sodium échangeable des sols au cours du temps T1, T2, T3, T4, T5.....	71
Figure 35 : Variation des teneurs en potassium assimilable des sols au cours du temps T1, T2, T3, T4, T5.....	72
Figure 36 : Variation des teneurs en magnésium échangeable des sols au cours du temps T1, T2, T3, T4, T5.....	73
Figure 37 : Variation des teneurs en calcaire total des sols au cours du temps T1, T2, T3, T4, T5.....	74

Figure 38 : Variation des teneurs calcaire actif des sols au cours du temps T1, T2, T3, T4, T5, T6.....	74
Figure 39 : Variation des teneurs calcium échangeable des sols au cours du temps T1, T2, T3, T4, T5.....	75
Figure 40 : Variation des teneurs en phosphore assimilable des sols au cours du temps T1, T2, T3, T4, T5.....	76
Figure 41 : Variation des teneurs en azote total des sols au cours du temps T1, T2, T3, T4, T5.....	77
Figure 42 : Variation des teneurs en matière organique des sols au cours du temps T1, T2, T3, T4, T5.....	78
Figure 43 : Texture des dix parcelles.....	79

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les principaux taxons de microorganismes du sol d'après Roger et Garcia, 2001.....	36
Tableau 2 : Groupements fonctionnels de taxons de microorganismes du sol d'après Roger et Garcia, 2001.....	38
Tableau 3. Les bioéléments dans le sol et dans la plante d'après Gobat et al., 1998.....	40 .
Tableau 4 : Les caractéristiques physicochimiques des dix stations choisies de la sablière de Terga.....	53

Sommaire

Introduction	1
Partie I : Synthèse bibliographique et état des connaissances en la matière	
Chapitre 1. La fixation biologique de l'azote et la symbiose rhizobienne	3
1. Généralités	3
2. Les Rhizobia	3
3. L'infection et le développement de nodule.....	5
4. La biochimie de la fixation.....	9
• La nitrogénase.....	9
• La légghémoglobine.....	10
• L'assimilation de l'ammoniac.....	11
5. La génétique de la fixation	12
6. Intérêts agronomiques et environnementaux	13
Chapitre 2. Les champignons mycorhiziens et la symbiose mycorhizienne.....	14
1. Généralités.....	14
2. Les Mycorhizes à Arbuscules (MA).....	16
3. Établissement de la symbiose mycorhizienne à arbuscules.....	17
4. structure d'un arbuscule	18
5. Les intérêts agroforestiers, agronomiques, biologiques et écologiques des champignons mycorhiziens.....	19
6. Les facteurs qui affectent la symbiose mycorhizienne.....	22
Chapitre 3. Les caractéristiques physicochimiques et biologiques du sol	
1. Les caractéristiques physiques	23
1.1. Introduction.....	23
1.2. La texture	23
1.3. La structure.....	25
1.4. Le pH.....	25
1.5. La salinité	28
2. Les caractéristiques chimiques	29
2.1. Les cations échangeables.....	29
2.2. La matière organique.....	30
2.3. Le calcaire total.....	30
2.4. Le calcaire actif.....	30
2.5. Le Phosphore assimilable.....	30
2.6. L'azote total.....	30
3. Les caractéristiques biologiques.....	32
a. La pédofaune.....	32
b. La microflore et le sol.....	34
Chapitre 4. Le symbiote végétale <i>Acacia Saligna</i>	48
1. Généralités.....	48
2. Taxonomie.....	48
3. Ecologiques	49
4. Utilisation.....	49
5. La symbiose.....	50

Partie II : Matériels et méthodes	
Chapitre 1. Impact sur état des lieux.....	51
1. Le site d'étude.....	51
2. Historique sur la formation géologique du site.....	52
3. Les conditions climatiques.....	52
4. La flore de la station.....	53
5. Détermination des caractéristiques édaphiques du site.....	53
 Chapitre 2. Matériels	
1. Le dispositif expérimental du site de revégétalisation	56
2. Matériels biologiques et les inoculas microbiens utilisés.....	56
2.1 Les souches Rhizobiennes et préparation de l'inoculum rhizobien	56
2.2 Le test de l'inoculation rhizobienne en pépinière.....	57
2.3 La Préparation de l'inoculum mycorhizien.....	57
2.4 Le test de l'inoculation mycorhizienne en pépinière.....	59
3. Echantillonnage du sol.....	59
 Chapitre 3.Méthodologie	
1. Analyses physiques du sol.....	60
1.1. Mesure de pH.....	60
1.2. Mesure de la salinité.....	60
1.3. La granulométrie (Pipette Roninson-Köhn).....	60
2. Analyses chimiques du sol.....	62
2.1 Mesure de la matière organique par calcination.....	62
2.2.Mesure du calcaire total par le calcimètre de Bernard.....	62
2.3. Mesure du calcaire actif par la méthode de Drouineau – Galet.....	63
2.4. Mesure de l'azote total par la méthode Kjeldahl.....	63
2.5. Mesure du phosphore assimilable par la méthode d'Olsen.....	64
2.6. Mesure des cations échangeables.....	65
3. Analyse statistique des résultats obtenus	67
 Partie III-Résultats et discussion.....	68
1. Expressions des différents résultats et leur synthèse intégrée.....	68
1.1.Le pH du sol.....	68
1.2. La salinité du sol.....	69
1.3. Le potassium assimilable (échangeable).....	71
1.4. Le magnésium échangeable.....	72
1.5. Le calcaire total, le calcaire actif et le calcium échangeable.....	73
1.6. Le phosphore assimilable.....	76
1.7. L'azote total.....	76
1.8. La matière organique.....	77
1.9. La texture du sol.....	79
2. Discussion Générale.....	80
 Conclusion et perspectives.....	86
 Références bibliographiques.....	88

Introduction

Introduction

Le sol, constitue l'épiderme vivant de notre planète Terre, à l'interface entre l'atmosphère, les roches et le monde du vivant. C'est le point de rencontre du monde végétal, animal et minéral, il assure ainsi la production primaire, dont dépendent directement la population humaine : la flore et la faune. Il participe aux grands cycles d'énergie, d'eau et des éléments (Robert, 1996). Il est indispensable aux activités de l'homme, ainsi qu'au fonctionnement des écosystèmes terrestres. Le sol, n'est plus considéré comme un milieu inerte ; il évolue dans l'espace et dans le temps. Cette évolution lui confère, une variabilité dans ses propriétés morphologiques, physiques, chimiques et biologiques. Cependant, cinq facteurs interdépendants, peuvent contribuer à sa formation : le climat, la roche mère les organismes vivants, le relief et le temps (Collin , 2006 ; Schaetzland et Anderson , 2005). Un sol sain est mesuré par ses propriétés physicochimiques et par son état écologique. Le sol est un habitat de plusieurs micro et macro-organismes, qui constituent avec leurs matières organiques les éléments clés, de la fertilité et la viabilité des sols. Un sol sain est aussi, un sol qui n'est pas érodé, épuisé ou pollué (Peters et al ., 2009). Toutefois, la moderne industrialisation a mené - à l'échèle planétaire - à la destruction des habitats et biotopes, extinction de cératines espèces, à la surexploitation des ressources naturelles et à la pollution de l'environnement. Malheureusement, le sol n'est pas à l'abri de cet abus. (Peters et al ., 2009). Il reste une ressource non renouvelable, en raison de la longue période nécessaire aux processus de sa formation. Ainsi, sa préservation et réhabilitation par des moyens biologiques et non agressives pour le milieu naturel, constituent un enjeu majeur du développement durable. En effet, pour re - végétaliser un site dégradé d'une carrière situé à Terga (Wilaya d'Ain Témouchent, dans l'Ouest algérien), des plantes d'*Acacia saligna* et des inocula microbiens ont été cultivés et utilisés.

Originaire d'Australie, *Acacia saligna* est une plante légumineuse fixatrice d'azote, introduite en Algérie, qui se caractérise par une croissance rapide et une tolérance à la sécheresse, à la salinité et à l'alcalinité. Cependant, elle a une courte vie qui varie entre 10 et 20 ans (Maslin et Mc Donald, 2004). Toutefois, les inoculas microbiens ou bio-fertilisants qui ont été utilisés dans le sol, peuvent être définis comme une préparation contenant des cellules microbiennes vivantes et efficaces, capables de fixer l'azote atmosphérique ou de solubiliser le phosphore, dont le rôle est d'accroître le nombre de ces microorganismes et d'accélérer les processus microbiens, afin d'augmenter l'assimilation de la plante en certains éléments nutritifs, comme l'azote et le phosphore.

A cette fin, deux types de microorganismes ont été utilisés :

- *Les rhizobia* : Qui sont des bactéries nodulant les racines des légumineuses et qui assurent une fixation symbiotique d'azote atmosphérique, en le convertissant à la forme assimilable par la plante (Hopkins, 2003).
- *Les mycorhizes* : Qui sont des associations symbiotiques, entre certains champignons du sol et des racines de plantes et qui facilite l'assimilation du phosphore par les plantes (Hopkins, 2003).

Le but de notre travail est, d'étudier l'impact de cette bio - revégétalisation sur les aspects édaphiques du sol au cours du temps. En effet, les paramètres qui ont été étudiés, dans ce contexte sont, soit physiques comme le pH, la salinité et la texture du sol, soit chimiques comme, les cations échangeables, l'azote total, le phosphore assimilable et la matière organique.

Notre travail est organisé en trois parties, suivies par une conclusion générale et des perspectives.

La première partie de cette thèse comporte, une analyse bibliographique dans laquelle nous avons mis le point en l'état des connaissances en la matière en plusieurs chapitres : Deux chapitres qui éclairent le côté microbiologique de l'intitulé, où figure la fixation biologique de l'azote et la symbiose rhizobienne, ainsi que les champignons mycorhiziens et la symbiose mycorhizienne, un troisième chapitre qui illustre des notions clés de la dynamique du sol via ses caractéristiques physicochimiques et biologiques, une quatrième partie qui énonce le symbiote végétal *Acacia saligna*, sa taxonomie, ces caractéristiques écologiques, son utilisation et les types de symbiose, qui peuvent être établies avec cette plante.

La deuxième partie, est constituée également de plusieurs chapitres : Le premier consiste à exposer l'état des lieux de la zone d'étude, où nous avons décrit la localisation géographique du site, nous avons donné un aperçu sur sa formation géologique, ses conditions climatiques et sa propre flore, nous avons déterminé ainsi les caractéristiques édaphiques du site.

Le second est de décrire les matériels qui ont été utilisés, le troisième est de décrire les différentes méthodes d'analyses du sol qui ont été utilisées et leurs principes.

La troisième partie est consacrée aux résultats et la discussion ainsi leurs explications et éclaircissement. Enfin, viendra la clôture de notre thèse par une conclusion générale et des perspectives.

Partie I

Synthèse bibliographique et état des
connaissance en la matière

Chapitre 1- La fixation biologique de l'azote et la symbiose rhizobienne

1. Généralités

L'azote, est généralement considéré comme un facteur limitant et un élément nutritif vital, pour la croissance et la productivité des plantes. Il y a environ 78% de l'azote dans la composition des gaz atmosphériques, qui ne peut être assimilé directement, ni par les plantes, ni par les animaux. La fixation biologique, est une source efficace de l'azote N_2 et joue un rôle important, dans la re-médiation des terres et est l'un des processus les plus importants de l'écosystème, permettant ainsi l'assimilation de l'azote. Par ailleurs, un petit groupe de procaryote qui synthétise le complexe enzymatique de la nitrogénase, peut fixer le N_2 et le convertir en NH_3 , la forme qui est utilisée par les plantes (Kim et Rees, 1994 ; Bloom, 2011; Mohammadi et al ., 2012). En outre, les microorganismes qui synthétisent la nitrogénase, appelés aussi les diazotrophes, occupent une niche écologique indispensable et se présentent quasiment dans tous les écosystèmes. ils vivent, soit en symbiose avec des plantes (bactéries *Frankia*, *Rhizobium*,...), soit librement dans les sols (*Azotobacter*, *Clostridium*, *Azospirillum*,...) (Voir Figure 1) (Halbleib et Ludden, 2000 ; Moat et al ., 2002 ; Fuchs et Herisse , 1999).

En effet, le taux annuel de l'azote naturel fixé, est estimé à environ 24592 tonnes et 97% dépend de la fixation biologique de l'azote. Par ailleurs, les microorganismes non symbiotiques, produisent seulement une petite quantité d'azote fixée, qui est épuisée directement par la plante associée (Glick, 2012 ; Bloom, 2011).

2. Les Rhizobia

Sont connus, pour leur capacité à établir des interactions symbiotiques, avec les plantes légumineuses par la formation et la colonisation des nodules racinaires, où les bactéries fixent l'azote et le convertissent en ammoniac, qui est transporté dans les bactéroïdes, où il est assimilé en glutamine et asparagine (Pereira Alexandre, 2010).

Les Rhizobiums, appartiennent actuellement à 12 genres et plus de 70 espèces, d'alpha et bêta -protéobactéries (Sawada et al ., 2003) (Figure 02). Ces chiffres, sont régulièrement en croissance avec la continuation de la recherche des nouvelles symbiotes légumineuses. En effet, tous les genres alpha-protéobactéries, appartiennent à l'ordre Rhizobiales, alors que les genres bêta-protéobactéries appartiennent à l'ordre Burkholderiales (Masson-Boivin et al ., 2009).

Symbiotic Association of Various Genera with Leguminous Plants

Azorhizobium caulinans, tropical legume (*Sesbania rostrata*)
Allorhizobium undicola, lotus (*Lotus albus*)
Bradyrhizobium japonicum, soybean (*Glycine max*)
Mesorhizobium amorphae, false indigo (*Amorpha fruticosa*)
Rhizobium trifolii, clover (*Trifolium*, *Crotolaria*)
Sinorhizobium meliloti, alfalfa (*Medicago sativa*)

Symbiotic Association of Actinomycetes with Angiosperms

Frankia sp., alder (*Alnus*)
Frankia sp., bog myrtle or sweet gale (*Myrica*)
Frankia sp., oleasters (*Shepherdia*, *Eleagnus*, *Hippophae*)
Frankia sp., New Jersey tea (*Ceanothus*)

Symbiotic Association with Leaf-Nodulating Plants

Klebsiella aerogenes

Symbiotic Association of Marine Bacteria with Bivalves

Aerobic, chemoheterotrophic sp., bivalves (*Teredinidae*)

Symbiotic Association with Marine Diatoms

Richelia intracellularis (cyanobacterium), *Rhizosolenia*

Associative Interaction with Grasses

Azospirillum brasiliense, tropical grasses
Azospirillum lipoferum, tropical grasses, maize
Azotobacter paspali, tropical grass (*Paspalum notatum*)

Free-Living Bacteria and Cyanobacteria

Aerobic, heterotrophic

Azotobacter, *Derxia*, *Azomonas*, *Biejerinkia*, *Nocardia*, *Pseudomonas*

Aerobic, phototrophic

Anabaena, *Calothrix*, *Nostoc*, *Gleotheca*, *Cylindrospermum*,
Aphanocapsa

Facultative, heterotrophic

Enterobacter cloacae, *Klebsiella pneumoniae*, *Bacillus polymyxa*,
Desulfovibrio desulfuricans, *D. gigas*, *Achromobacter*

Anaerobic, heterotrophic

Clostridium pasteurianum, *C. butyricum*, *Propionispira arboris*

Anaerobic, phototrophic

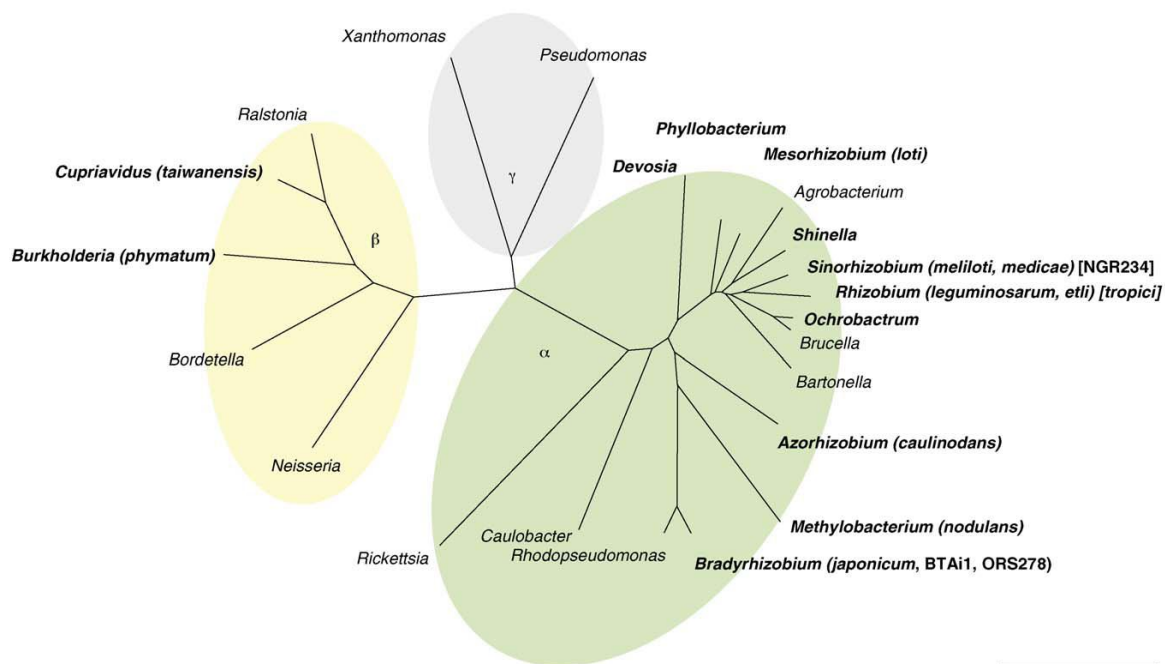
Chromatium vinosum, *Rhodospirillum rubrum*, *Rhodopseudomonas*
sphaeroides, *R. capsulata*, *Rhodomicrobium vernielli*, *Rhodocyclus*,
Chlorobium limicola

Nonphotosynthetic, autotrophic

Methanobacterium, *Methylococcus*, *Methylosinus*, *Methanococcus*,
Methanococcus, *Methanosarcina*

Figure 1: Liste de quelques organismes fixateurs d'azote d'après Moat et al., 2002.

Chaque rhizobium a un spectre d'hôte défini, mais il n'y a pas de corrélation stricte entre légumineuses et bactérie, en point de vue taxonomie, bien que certaines associations sont favorisées (par exemple Azorhizobium - Sesbania et Burkholderia - Mimosa (Masson-Boivin et al ., 2009).



TRENDS in Microbiology

*Genres en caractères gras contiennent rhizobiums. Espèces ou souches de Rhizobium dont les génomes ont été entièrement séquencés sont indiqués entre parenthèses

Figure 2: Arbre phylogénétique déraciné des séquences d'ADNr 16S de la sélection α -, β - et δ -protéobactéries d'après Masson-Boivin et al ., 2009

3. L'infection et le développement du nodule

L'infection et le développement d'un nodule se résume en 4 principaux stades (Figure 3)

1. Multiplication des rhizobiums et fixation aux cellules épidermiques et aux poils absorbants;
2. La courbure caractéristique des poils absorbants, l'invasion par les bactéries et la formation d'un cordon d'infection ;
3. L'initiation du nodule et son développement dans le cortex de la racine ;
4. Déversement des bactéries du cordon d'infection et différenciation des cellules spécialisées dans la fixation de l'azote (Hopkins, 2003).

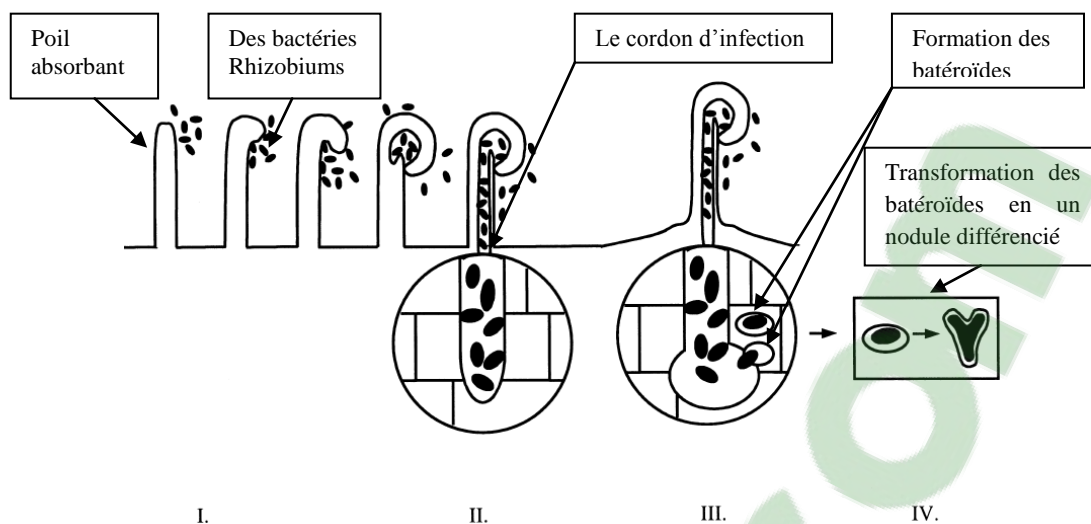


Figure 3 : Représentation schématique de la formation d'un nodule d'après E. Luyten et J. Vanderleyden, 2000

L'ensemble des processus de nodulation, est réglementé par des communications chimiques très complexes, entre la plante et les bactéries (Burdass, 2002) (Figure 4).

L'interaction entre la plante hôte et les rhizobiums libres, commence par la sécrétion des substances chimiques, par les cellules racinaires dans le sol, dont certains d'eux favorisent la croissance de la population bactérienne dans la zone rhizosphérique (Burdass, 2002). La libération de composés de nature phénolique, comme les flavonoïdes attirent les rhizobiums et induit l'expression des gènes de nodulation bactérienne (gènes Nod), qui codent pour des protéines, qui sont impliquées dans la synthèse et l'émission des lipochito-oligosaccharide (les facteurs Nod), qui sont principalement des tétramères et des pentamères, varient selon les espèces de rhizobiums étudiées (Denarié et al., 1996 ; Cardenas et al., 2000). Alors, que la dépolarisation de la membrane et l'efflux d'ions, sont des réponses rapides des poils absorbants aux facteurs Nod (Denarié et al., 1996). Le calcium précède un efflux d'ions Cl^- , dans le milieu extracellulaire qui provoque cette dépolarisation. L'efflux d'ions K^+ mesuré, après l'efflux de Cl^- dans le milieu extracellulaire, contrebalance cette dépolarisation et contribuerait à re-polariser la membrane plasmique (Felle et al., 1998).

Les oscillations calciques ou « calcium spiking », sont définies comme des fréquences rapides et nettes, non-linéaires et répétitives des ions calcium au niveau du cytosol (Hazledine et al., 2009 ;Sieberer et al., 2009).

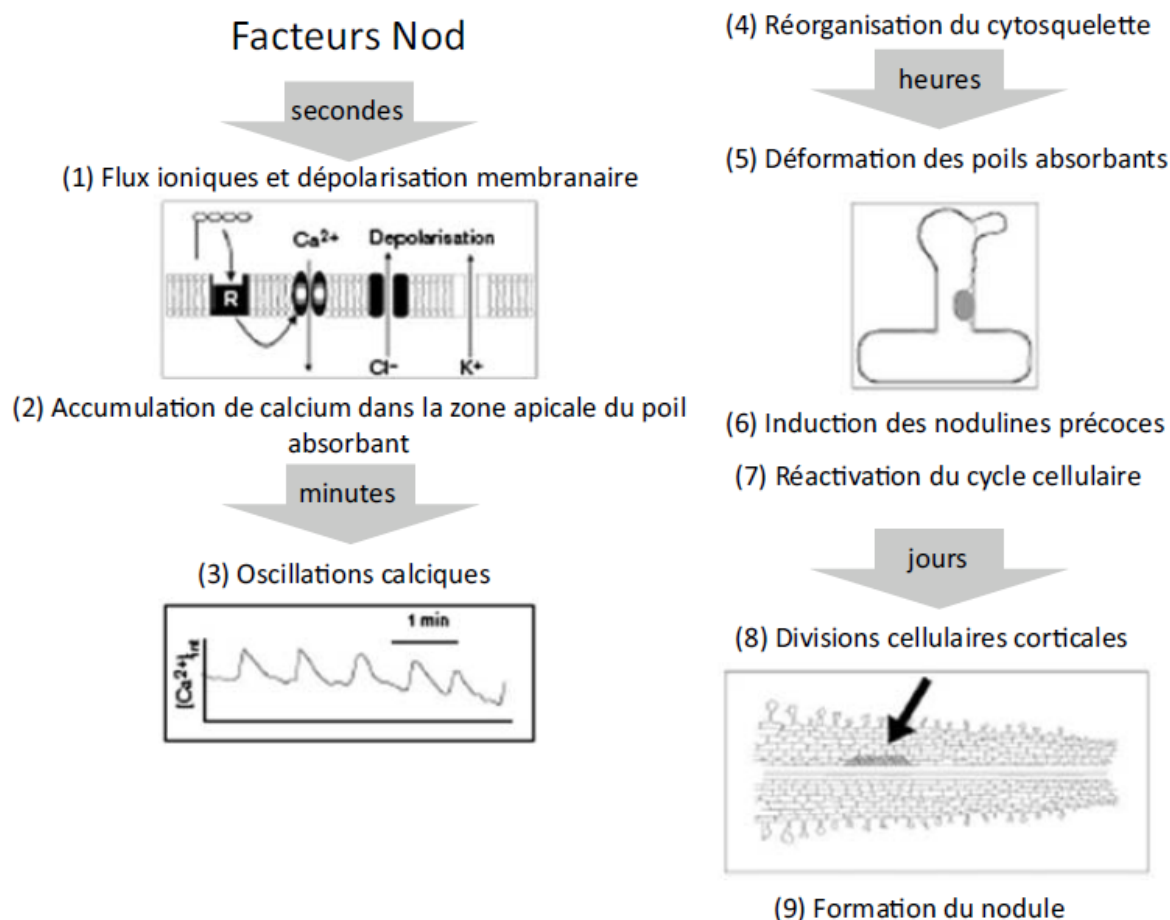


Figure 4 : Réponses physiologiques de la plante aux facteurs Nod d'après Downie et Walker, 1999

Sieberer et al. 2012, ont montré que l'intensité de chacune de ces oscillations calciques, représente une phase parmi les étapes précoces de l'infection. En réponse aux facteurs Nod, les poils absorbants se déforment et donnent naissance à l'apparition d'un branchement (Geurts et Bisseling ., 2002). Une application localisée de NFs, sur les poils absorbants, redirige et change leurs directions de croissance (Geurts et Bisseling ., 2002 ; Esseling et al., 2003). On pense que, les cytosquelettes d'actine et les microtubules, jouent un rôle déterminant dans cette réorientation, puisqu'ils interviennent dans la croissance des poils absorbants. Cependant, l'ajout des facteurs Nod provoque une altération des cytosquelettes d'actine et des microtubules (Vernié et al ., 2008). Il s'agit donc, de la première étape visible de l'interaction Rhizobium-légumineuse (Geurts et Bisseling ., 2002).

Les gènes noduline précoce « Early NODulin genes » comme ENOD11, ENOD12 et rip1, sont exprimés pendant des étapes précoces de nodulation (Hirsch, 1992). Les cellules corticales, commencent à se diviser et à se différencier. Les rhizobia favorisent cette division, avant que la courbure des poils absorbants s'installe (Hirsch et al., 1982). La courbure des poils absorbants, est probablement provoquée par une réorientation graduelle et constante, dans la direction de leurs croissances. La courbure en crosse de berger (Hac), piège les rhizobia qui forment une micro colonie (Van Spronsen et al., 1994 ; Oldroyd, 2001). Ces bactéries, vont alors pénétrer à l'intérieur du poil absorbant, favorisant ainsi la formation d'une structure tubulaire appelée « le cordon d'infection », qui vas progresser à l'intérieur du poil absorbant, puis à travers le cortex de la racine et par la suite dans le primordium nodulaire (Morot-Gaudry, 1997 ; Schultze et Kondorosi. , 1998).

L'étape suivante, est la formation du méristème, développement et différenciation du nodule (Sprent, 1989). Les rhizobia sont libérés à partir du cordon d'infection. Cette étape, est un préalable nécessaire pour le développement d'un nodule fonctionnel fixateur d'azote (Timmers et al., 1999). Les bactéries libérées, se différencient en bactéroïdes et restent confinées dans des vésicules limitées par une membrane péri-bactéroïdienne (Vijn et al., 1993). La nitrogénase est synthétisée, ce qui est requis pour la fixation d'azote. La légghémoglobine est constituée à peu près en même temps ; des fonctions complémentaires biochimiques et physiologiques associées à la fixation de l'azote sont développées (Vincent, 1980).

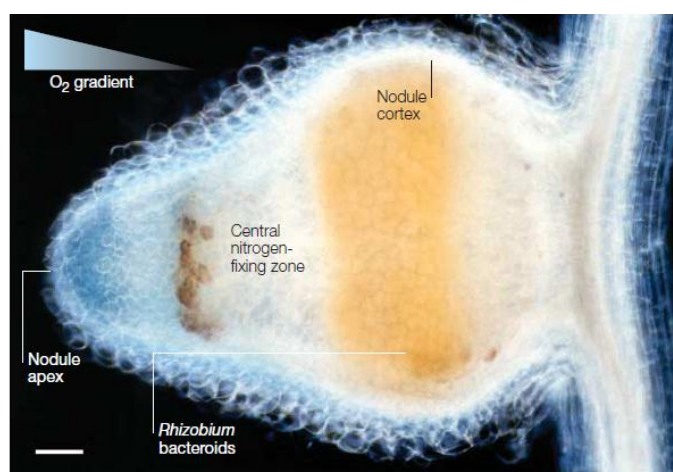


Figure 5 : Représentation schématique d'une coupe dans un nodule fonctionnelle d'après Dixon et Kahn., 2004

À la suite de l'apparition de la fixation de l'azote et de l'assimilation, les nodules continuent de se développer et de maintenir la symbiose (Figure 5).

4. La biochimie de la fixation

a. La nitrogénase : Est un complexe enzymatique, qui catalyse la fixation du diazote. Il est constitué de deux protéines de tailles différentes, sensibles à l'oxygène (Figure 6).

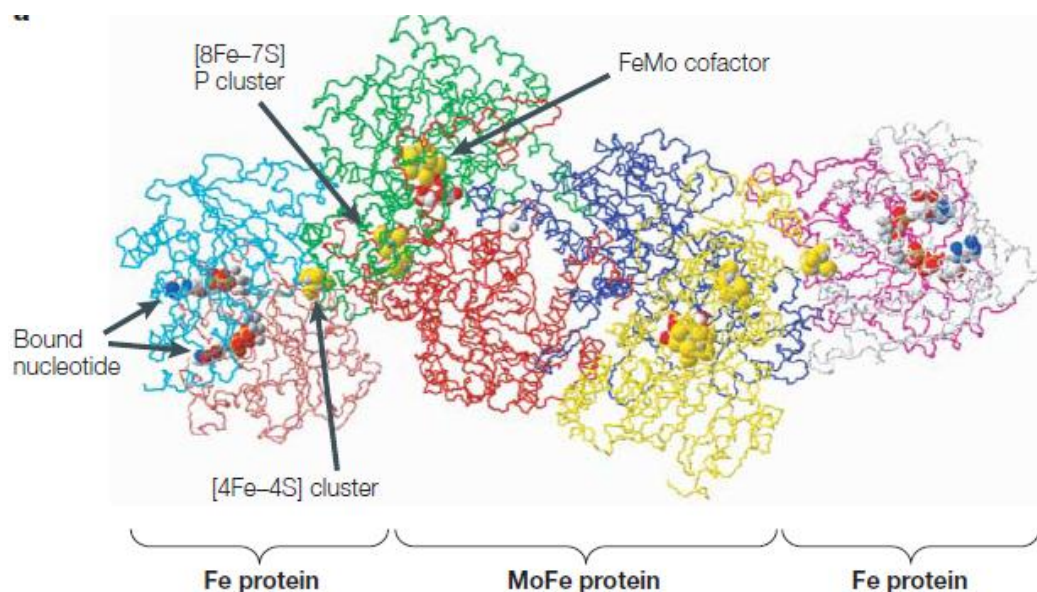


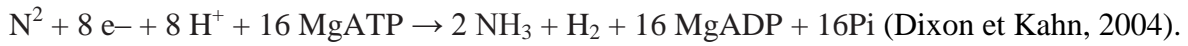
Figure 6 : Structure cristallographique de la nitrogénase d'après Dixon et Kahn., 2004

✓ La plus grande protéine, est la nitrogénase qui est une protéine Mo-Fe, c'est un tétramère formé de deux sous unités identiques (Moat et al ., 2002 ; Hopkins, 2003) . La protéine Mo-Fe, contient deux types de centres métalliques : le cluster P et le cluster [8Fe-7S] et le cofacteur FeMo (Dixon et Kahn., 2004).

✓ La plus petite protéine : Est la réductase, qui est une Fe protéine dont le rôle est le transfère d'électrons à la nitrogénase (Moat et al ., 2002 ; Hopkins, 2003). Cette Fe Protéine, est un dimère constitué de deux sous unités, qui sont reliées l'une à l'autre par un cluster [4Fe-4S] (Hopkins, 2003 ; Dixon et Kahn., 2004).

L'ensemble de ces protéines plus ATP, Mg^{+2} et source d'électrons, sont indispensables pour toute activité fixatrice d'azote (Moat et al ., 2002) .

La réaction chimique par laquelle, le diazote est converti en ammoniac est la suivante :



La protéine Fe, est réduite par un donneur primaire d'électrons, habituellement la ferrédoxine. Dans la seconde étape, la protéine Fe réduite, transfère les électrons à la protéine Mo-Fe, qui catalyse la réduction du diazote gazeux et la production d'hydrogène (Hopkins., 2003).

a. La léghémoglobine

Les mitochondries des bactéries, ont besoin de l'oxygène pour se respirer. Alors, qu'il est toxique pour la nitrogénase. Donc, la léghémoglobine peut régler cette problématique, tout en captant, régulant et transportant l'oxygène aux bactéroïdes (Sanchez et *al.*, 1991) (Figure 7).

La léghémoglobine, est une protéine très proche par sa structure et sa fonction de l'hémoglobine des vertébrés, transporteuse d'oxygène, elle possède un groupement prosthétique (l'hème), synthétisé par le bactéroïde et une partie protéique fabriquée par la plante (Gobat et *al.*, 2010).

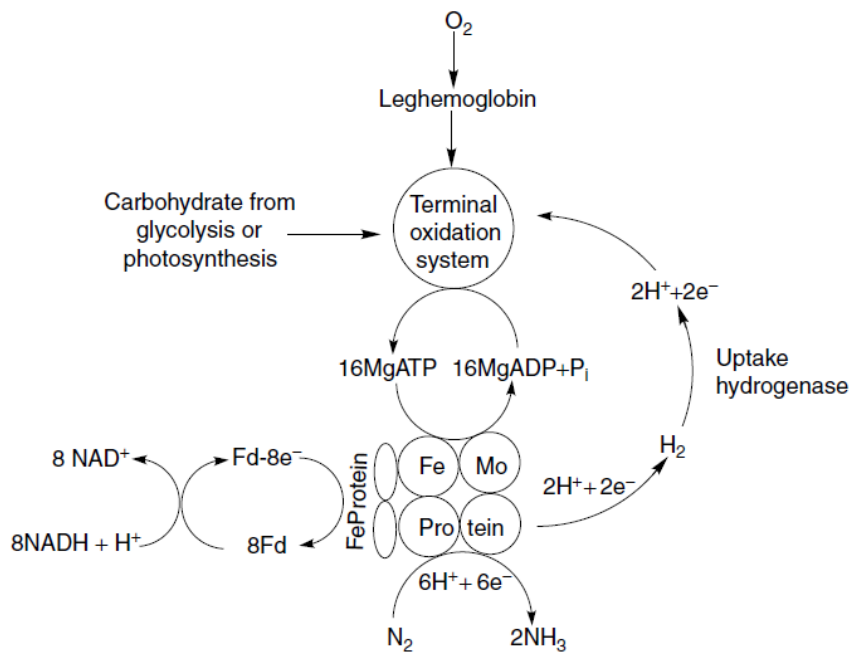


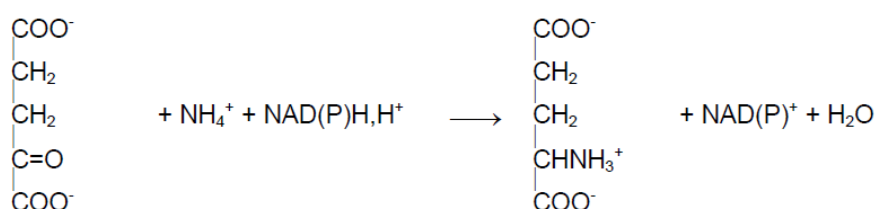
Figure 7: Processus de la fixation biologique de l'azote par le complexe enzymatique la nitrogénase d'après Moat et *al.*, 2002

b. Assimilation de l'ammoniac

L'ammoniac, qui dérive de la fixation biologique de l'azote atmosphérique, est transformé en fonction amine ou amide non toxique. Trois enzymes interviennent : la glutamate déshydrogénase, la glutamine synthétase et la glutamate synthase (GOGAT : glutamine 2-oxoglutarate aminotransférase) (Zinsou , 2013).

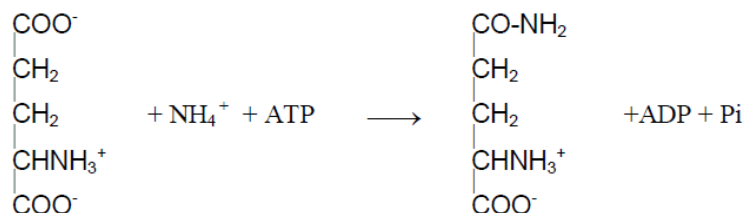
✓ Glutamate déshydrogénase (GDH)

On la rencontre dans les mitochondries et dans les chloroplastes. Elle catalyse la réaction :



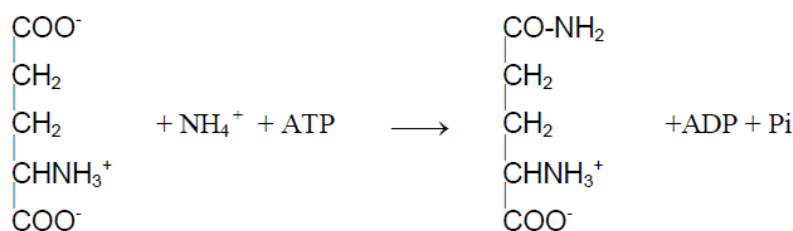
✓ Glutamine synthétase (GH)

L'assimilation de l'ammoniac, peut aussi se faire par l'action de la glutamine synthétase, avec consommation d'énergie. Elle catalyse la réaction :



✓ Glutamate synthase (GOGAT)

La glutamine peut être impliquée dans une deuxième réaction, catalysée par la glutamate synthase (Glutamine 2-oxoglutarate aminotransférase ou GOGAT), qui conduit à la formation du glutamate. Elle catalyse la réaction :



L'action de la glutamine synthétase et de la glutamate synthase est couplée, dans les cyanobactéries et dans les systèmes symbiotiques, associant *Rhizobium*-légumineuses. Le groupe amide du glutamate sert à la synthèse des autres acides aminés (transamination) et fournit l'azote dans la synthèse des autres composés azotés (Zinsou, 2013).

✓ La transamination: Transfert du groupement amine

L'étape finale de la fixation de l'azote, est l'exportation de l'azote fixé dans les nodules, vers les autres parties de la plante hôte (Hopkins, 2003).

C'est le processus, qui conduit à un échange de la fonction amine, entre un acide aminé (principalement le glutamate) et un α -cétoacide ou 2-oxo-acide. Les enzymes qui catalysent de telles réactions sont appelées : des aminotransférases ou transaminases (Zinsou , 201) (Figure 8).

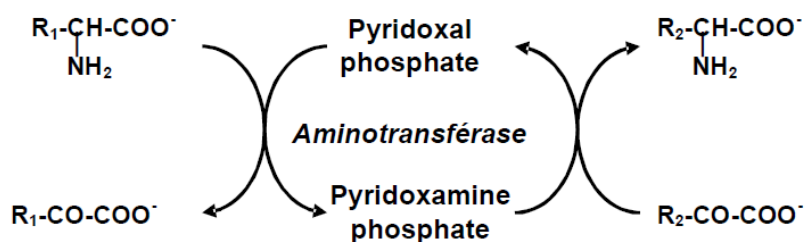


Figure 8 : La transamination ou l'aminotransfert. Le groupement aminé est transféré de l'acide aminé 1 sur un α -cétoacide, pour former l'acide aminé correspondant (acide aminé 2) d'après Zinsou , 2013.

5. La génétique de la fixation

La synthèse de la nitrogénase est sous contrôle des gènes *nif*. Cependant, les gènes *nod*, sont des gènes de nodulation qui sont activés par les flavonoïdes, ils sont localisés sur le plasmide du rhizobium. En effet, les gènes *nod ABC* sont des gènes de nodulation commun à tout les rhizobia. Toutefois, les gènes *nodD* jouent un rôle central (Moat et al ., 2002 ; Hopkins , 2003).

Les gènes *fix*, ne se présentent que chez les fixateurs symbiotiques. L'un deux au moins (*fixX*) code pour une ferrédoxine. D'autres, sont impliqués dans le transport d'électrons vers la nitrogénase (Hopkins, 2003).

6. Intérêts agronomiques, environnementaux

On estime que, la moitié de la fixation biologique de N₂ est réalisée par cette symbiose et qui produit 25 à 35 % des protéines mondiales (Werner et Newton, 2005 ; Lindström *et al.*, 2010). Les légumineuses, sont utilisées pour leur teneur élevée en protéines, dans l'alimentation humaine et animale et pour leurs huiles alimentaires comme c'est le cas du soja et d'arachide. Les légumineuses ligneuses sont utilisées en agroforesterie, telles qu'*Acacia*, *Leucaena* qui peuvent fixer des quantités énormes d'azote atmosphérique (jusqu'à 600 kg /hectare/an) (Sprent et Parsons, 2000).

D'autres, sont utilisées comme plantes ornementales, comme le lupin, la glycine, les *Cytisus* ou *Genista*. Des espèces actinorhiziennes, sont aussi utilisées dans la production du bois de qualité comme Douglas (Moiroud, 1996).

Chapitre 2- Les champignons mycorhiziens et la symbiose mycorhizienne

1. Généralités

Le terme mycorhize provient de deux mots grecs, myco qui signifie champignons et Rhize qui signifie racine. En effet, c'est la symbiose qui s'effectue entre, un champignon et une racine d'une plante. Le champignon (hétérotrophe), retire des molécules carbonées, issues de la photosynthèse végétale. Alors que la plante (autotrophe), reçoit des minéraux et de l'eau du champignon. Il est indispensable de comprendre que, sans cette association, le champignon mycorhizien ne peut compléter son cycle vital (Selosse et Le Tacon, 1998 ; Gosselin et Dechamplain, 2002; Alizadeh, 2011). Cependant, les champignons mycorhiziens peuvent accéder aux nutriments, qui sont inaccessibles par le végétal, grâce à leurs hyphes, qui peuvent atteindre des distances beaucoup plus longues, que les racines des plantes (Gosselin et Dechamplain., 2002).

Les champignons mycorhiziens, ont deux types de systèmes mycéliens: les mycéliums internes et les mycéliums externes. Les mycéliums externes, croissent et s'étendent, à l'intérieur du sol et sont en mesure de pénétrer, dans les minuscules pores du sol et d'apporter les nutriments aux racines des plantes, qui ne peuvent pas y atteindre (Ramanankierana et al ., 2007 ; Smith et Read., 2008). Les myceliums internes, se développent entre les deux et à l'intérieur des cellules du parenchyme des racines de la plante hôte. Les myceliums internes, créent de nombreuses branches, dans les cellules des racines des plantes. Cette collection de branches, dans chaque cellule est appelée « arbuscule ». On croit que, l'échange de nutriments entre les champignons et les plantes, se fait dans l'arbuscule. Ces arbuscules, sont formés entre deux et quatre jours après l'inoculation des racines (Linderman, 1988).

La classification des mycorhizes, est basée sur le type de relation, entre les champignons et les plantes; plus précisément de l'état de la communication entre, les cellules des racines avec le mycélium du champignon. Il existe trois groupes de mycorhizes : Endomycorhizes, ectendomycorrhizes et ectomycorhizes (figure 9). Les trois groupes diffèrent, dans la manière dont le champignon pénètre dans la cellule hôte, en créant divers états fongiques avec des «structures dans des cellules hôtes » (Smith et Read, 2008).

- Les endomycorhizes : Anciennement dénommés, Mycorhizes à Vésicules et Arbuscules (MVA) ; actuellement Mycorhizes à Arbuscules (MA), dont la symbiose avec les racines, s'exprime par une colonisation en profondeur des racines et peut avoir, différentes expressions qui forment des arbuscules, des vésicules ou des hyphes spiralés. Les arbuscules

est la forme la plus répandue des symbioses, qui concerne environ 90 % des végétaux cultivés (Cruyppenninck , 2013).

- Les ectomycorhizes : Dont la symbiose avec les racines, se traduit par une colonisation superficielle des racines, transformant, ainsi, ces racines latérales à structure primaire, en les revêtant d'un manteau fongique. Les hyphes, pénètrent la racine, en formant dans le cortex un système intercellulaire complexe, appelé réseau de «Hartig», avec peu ou pas de pénétration cellulaire (Cruyppenninck, 2013).
- Les ectendomycorhizes : C'est une symbiose «hybride» alliant, une colonisation en profondeur, des cellules végétales et une colonisation superficielle, à manteau réduit ou absent, qui possède un réseau de Hartig bien développé et des hyphes qui pénètrent dans les cellules racinaires (Cruyppenninck, 2013).

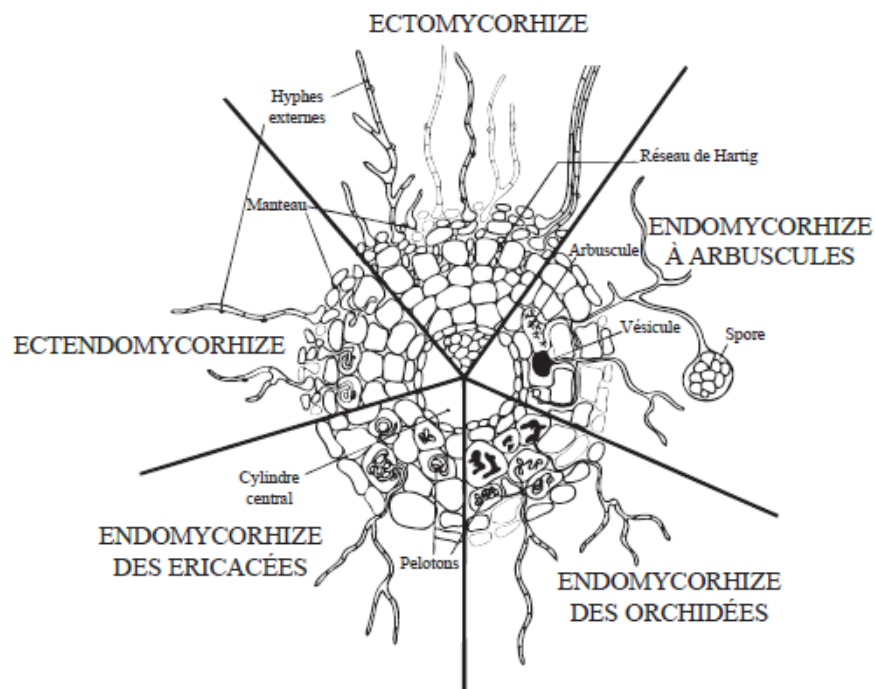


Figure 9 : Types de symbioses mycorhiziennes chez les végétaux.

D'après Selosse et Le Tacon ,1998

2. Les mycorhizes à arbuscules (MA)

Les racines établissent un pont, entre la rhizosphère et la plante. Les hyphes extraracinaires, augmentent le volume de sol (eau et minéraux) accessible à la plante. Alors que, les hyphes intraracinaires, se propagent dans les espaces intercellulaires, se gonflent en vésicules, selon leur génotype et forment des arbuscules intracellulaires, créant une importante zone interface, entre les cellules des deux partenaires, sites privilégiés d'échanges nutritifs (Dalpé, 2005).

Nous nous intéressons, plus particulièrement aux champignons mycorhiziens à arbuscules (MA), qui constituent le type de mycorhize le plus répandu et le plus ancien, qui aurait coévolué avec les plantes terrestres, depuis au moins 460 millions d'années et qui est maintenant, incapable de survivre sans plante hôte. Contrairement aux autres types de mycorhizes, ce sont des champignons aseptés, faisant partie de l'ordre des Glomales (Figure 10) (Redecker et al ., 2000 ; Schüßler et al ., 2001).

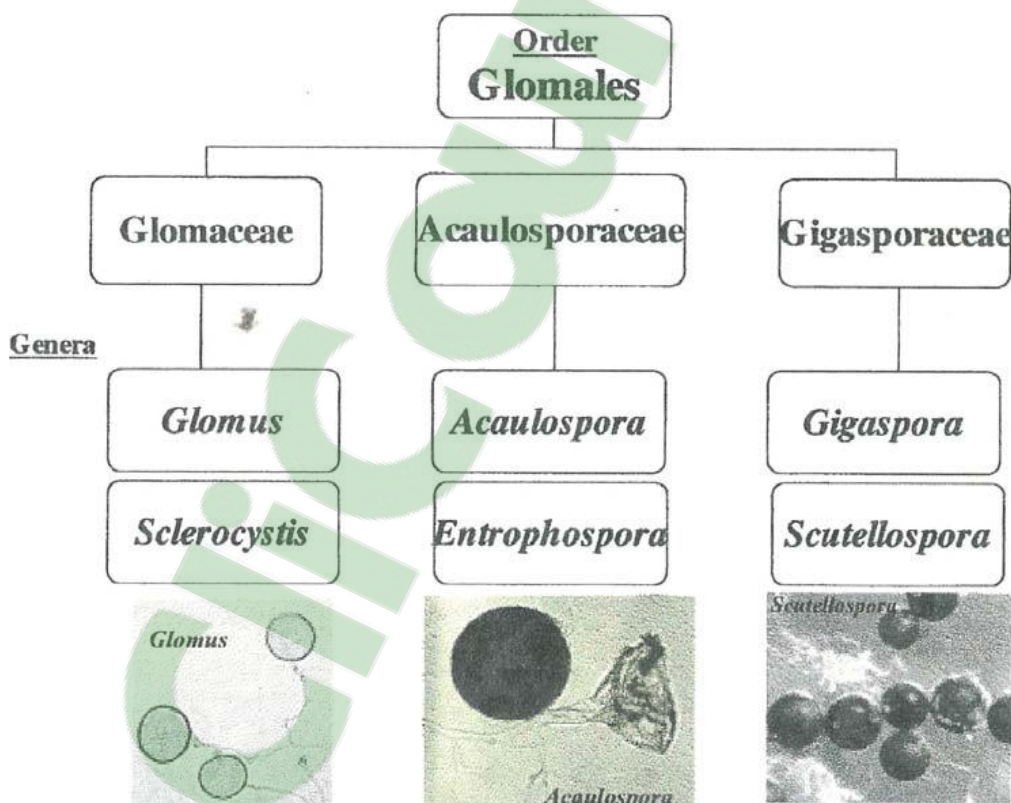


Figure 10. La taxonomie actuelle des arbuscules mycorhizien d'après Dodd (2000)

3. Établissement de la symbiose mycorhizienne à arbuscules

L'établissement de la symbiose mycorhizienne à arbuscules (Figure 11), débute par la colonisation d'une racine compatible, par les hyphes produits par les champignons, qui ne peuvent pas se développer et compléter leurs cycles de vie, si l'hyphe ne rencontre pas de racine, après 2 à 4 semaines de croissance. Par conséquent, les spores peuvent se remettre en dormance, en attendant de meilleures conditions (Logi et al., 1998). Les strigolactones exsudées par les racines des plantes (« branching factor »), vont stimuler la germination des spores et la ramification ainsi que, la croissance des hyphes (Buée et al., 2000 ; Akiyama et al., 2005; Besserer et al., 2006; Besserer et al., 2009).

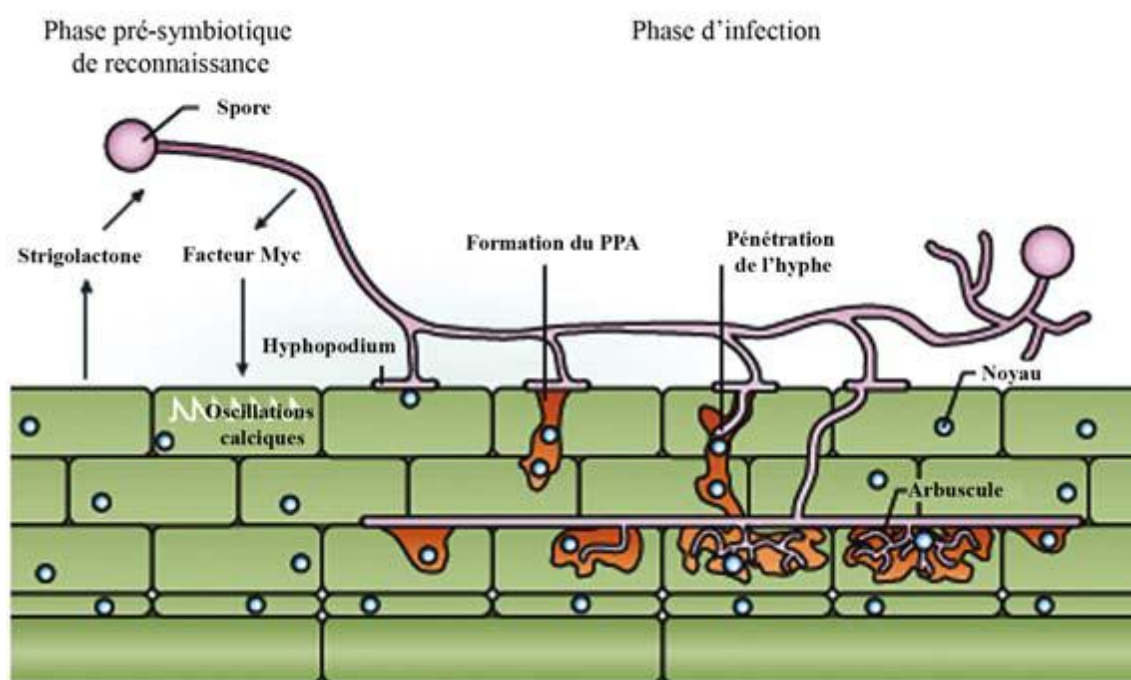


Figure 11 : Établissement de la symbiose mycorhizienne à arbuscules d'après Parniske, 2008 et Smith et al., 2002

Durant cette phase pré symbiotique, le champignon lui aussi produit un signal diffusible, qui va permettre à la plante de le reconnaître. Ces molécules, appelées « Facteurs Myc », vont être perçues par la plante et vont induire des réponses, aussi bien à l'échelle moléculaire qu'à l'échelle de l'organe (Kosuta et al., 2003). Parmi ces réponses moléculaires : Les oscillations calciques (Calcium Spiking), qui sont produites très brusquement, par des exsudats de spores ainsi, par le contact physique avec l'hyphopodium, dans le noyau des cellules épidermiques, situées dans la zone d'infection du champignon. La

fréquence de ces oscillations, semblent être un régulateur de la progression des hyphes et du cordon d'infection, à travers les différentes couches cellulaires, ainsi que la stimulation de la formation du PPA et du PIT (Kosuta et al., 2008 ; Chabaud et al., 2011 ; Sieberer et al., 2012) Une protéine kinase calcium et calmoduline dépendante (CCaMK), peut décoder les signatures calciques, associées à la mise en place des symbioses rhizobiennes et mycorhiziennes (Rival, 2013). La plante, se prépare à accueillir le champignon, en générant une nouvelle structure subcellulaire : Le Pre Penetration Apparatus (PPA). (Genre et al., 2005) .

La cellule épidermique, qui s'apprête à être infectée, présente des oscillations calciques à haute fréquence et forme un PPA ou un PIT. L'hyphe ou le cordon d'infection, commencent à y pénétrer. A ce moment, la cellule épidermique qui a été traversée par la structure symbiotique, ne présente plus d'oscillation calcique .L'entrée du micro organisme, est associée avec une augmentation marquée de la fréquence des oscillations calciques à la fois dans le noyau mais aussi dans le compartiment péri nucléaire (Sieberer et al., 2012).(Figure 12).

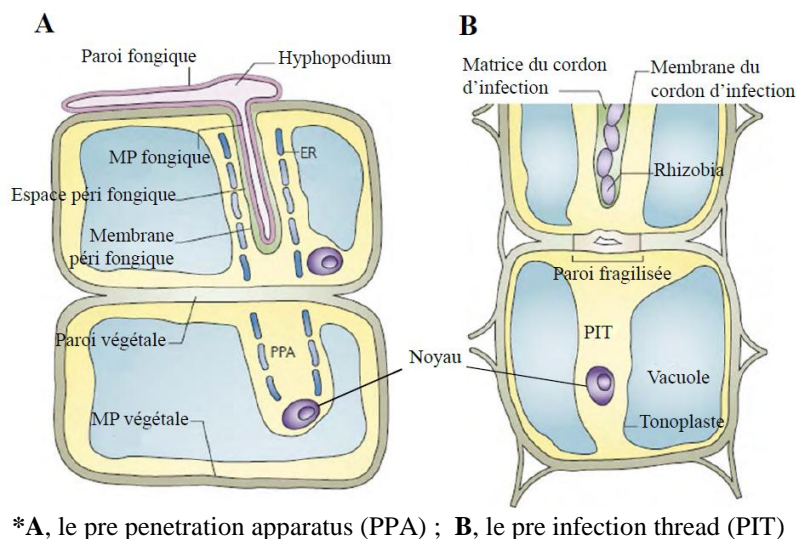


Figure 12 : Schémas du pre penetration apparatus (PPA) et du pre infection thread (PIT) d'après Parniske 2008.

4. Structure d'un arbuscule

Le PPA, va ainsi conduire l'hyphe à quitter la cellule et entrer dans l'apoplaste, où il se ramifie en branche et s'étend le long de la racine, infectant successivement les cellules corticales. Ces branches fines occupent tout l'espace intracellulaire, formant ainsi une nouvelle structure appelée arbuscule : La structure symbiotique où se font les échanges des

nutriments. Chacune des branches est entourée par la membrane péri arbusculaire (PAM). L'interface entre la membrane plasmique du champignon et la PAM constitue l'espace péri arbusculaire (PAS) (Parniske, 2008). (Figure 13).

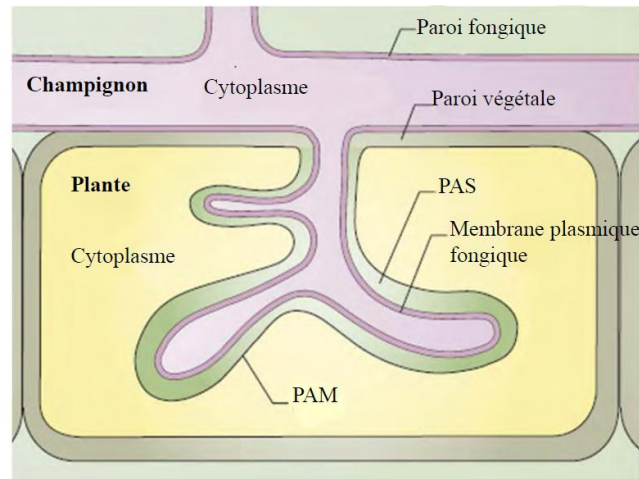


Figure 13. Représentation schématique d'un arbuscule d'après Parniske 2008 et Smith et *al.*, 2002

5. Les intérêts agroforesteries, agronomiques, biologiques et écologiques des champignons mycorhiziens. (Figure 14).

5.1. La symbiose mycorhizienne et la nutrition minérale

En effet, les hyphes des champignons mycorhiziens sont plus fins que les racines et les poils absorbants, ce qui leur permet de pénétrer dans les pores les plus fins et les fissures du sol. Les recherches ont confirmé que les champignons mycorhiziens, sont particulièrement importants dans la mobilisation du phosphore, de l'azote, du zinc, du fer, du calcium, du magnésium, du manganèse, du soufre et d'autres nutriments importants et de les transporter à la plante hôte (Amaranthus et Simpson, 2011). Le rôle majeur des champignons mycorhiziens, est d'apporter aux racines des plantes hôtes le phosphore, qui est un élément extrêmement immobile dans les sols (Bucher, 2007). Ces arbuscules mycorhiziens, peuvent aussi absorber et transférer une quantité significative d'azote inorganiques (NH^{+4} or NO^{-3}) aux plantes hôtes (He et al., 2003).

5.2. La tolérance au stress salin par les champignons mycorhiziens à arbuscule

La salinisation des sols est un risque croissant, qui touche les champs de cultures dans tout le globe. Cependant, il est plus sérieux dans les régions arides et semi arides. La

symbiose mycorhizienne peut résoudre cette problématique puisque, les champignons mycorhiziens à arbuscule, peuvent vivre dans un environnement salin (Garcia and Mendoza, 2007).

5.3. Relation plante eau

Sous des conditions de déficit hydriques, les plants associées aux mycorhizes, sont aptes à absorber une quantité d'eau, plus importante que celle des plantes non associées aux mycorhizes (Marulanda et al., 2003; Khalvati et al., 2005).

5.4. Protection des racines de la plante hôte contre les pathogènes

Ces champignons mycorhiziens, jouent un rôle déterminant dans la défense naturelle, contre les maladies des racines causées par des champignons pathogènes comme : *Pytophthora*, *Fusarium*, *Phythium* et *Rhizoctonia*. Il paraît même, que ces mycorhizes secrètent des antibiotiques, qui inhibent l'infection des racines par ces agents pathogènes. (Amaranthus et Simpson, 2011).

5.5. Mycorhizoremediation

Une baisse de la concentration en métaux lourds est observée, dans les parties aériennes des plantes mycorhizées, ce qui est due à l'augmentation de biomasse (« effet dilution »), mais aussi à l'immobilisation des métaux lourds dans la rhizosphère, qui permet d'atténuer l'effet toxique des métaux lourds pour la plante (Audet et Charest, 2006 ; Kapoor et Bhatnagar, 2007).

5.6. Effet sur la structure du sol

Un autre effet des champignons MA est, leur action sur la structure du sol. Les hyphes fongiques ont la capacité d'agir, sur la macroaggrégation des constituants du sol et donc sur la stabilité du sol (Tisdall et al., 1991). La stabilité des sols est très importante dans la lutte contre l'érosion, la perte des nutriments et de la matière organique par lixiviation, qui entraînent une baisse de la productivité en agriculture (Schreiner et Bethlenfalvay, 1995).

5.7 Autres effets des champignons mycorhiziens

Les racines colonisées par les arbuscules mycorhiziens, sont souvent épaisses et portent peu de poils absorbants. Un tel changement morphologique, est probablement sous un contrôle hormonal (Selvaraj, 1998). En effet, Barea et Azcon-Aguilar (1982) notent aussi

que, les champignons mycorrhiziens produisent des substances comme l'auxine, la gibbérelline et la cytokinine, qui stimulent la croissance des plantes.

Les plantes mycorhizées, montrent aussi un accroissement de production de certains enzymes comme, la peroxydase qui est l'enzyme courante, observée dans les tissus des plantes malades et blessés. (Spanu et Bonfante-Fasolo , 1998).

Les Phosphatases des mycorrhizes, sont spécifiquement induites, par la présence des *Glomus* et leurs activités est sensibles à la quantité du phosphore de l'environnement (Pacovsky, 1991)

Les champignons mycorrhiziens, sont bénéfiques pour l'absorption des nutriments et aussi, pour la survie des plantes dans les sols dégradés, suite à des dépôts radionucléides (Ahiabor and Hirata .,1994). En effet, les plantes inoculées par des champignons mycorrhiziens, absorbent plus de K^+ et Ca^{2+} comparées aux plantes non- inoculées. Ainsi que, les champignons mycorrhiziens aident à retenir les radionucléides - en tenant compte de la nature du sol - et empêcher l'expression de la radioactivité. Donc, les chances sont plus grandes pour la végétation, pour survivre dans les écosystèmes perturbés. Il s'est avéré que, les champignons mycorrhiziens à arbuscules, accroissent l'absorption et le recyclage des radionucléides en particulier le ^{137}Cs et le strontium ^{90}Sr (Selvaraj et al., 2004).

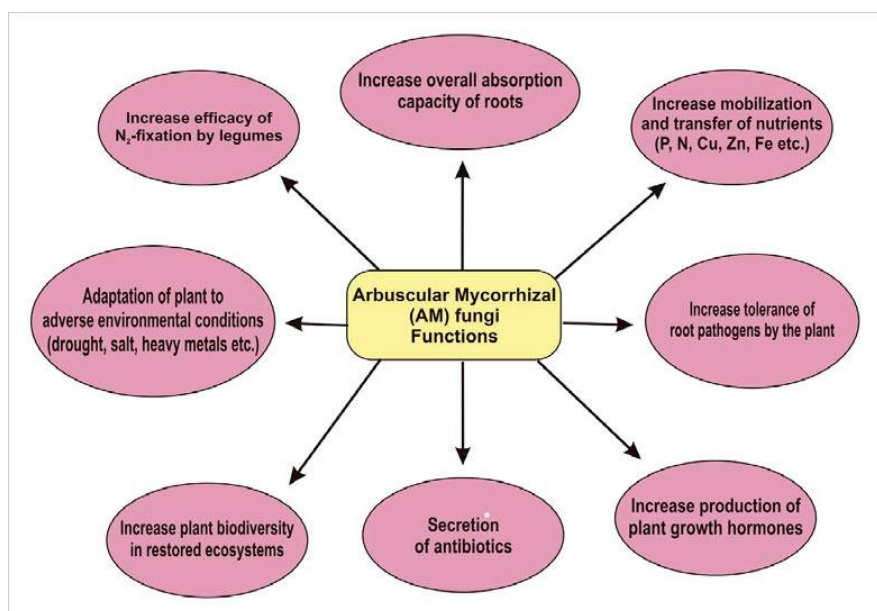


Figure 14. Les différentes fonctions des arbuscules mycorrhiziens dans les écosystèmes terrestres d'après Garg et Chandel, 2009

6. Les facteurs qui affectent la symbiose mycorhizienne

6.1. Les facteurs biotiques

L'influence des facteurs génétiques de la plante hôte est importante, pour l'initiation de la colonisation des racines, par les arbuscules mycorhiziens. La structure et la morphologie des racines, jouent aussi un rôle important dans la mycorhization. La microflore du sol influence évidemment, la formation des arbuscules (Goltapeh et al .,2008)

6.2. Les facteurs abiotiques

Les propriétés climatiques et physicochimiques du sol, où la plante hôte se développent, influence le développement et l'établissement des champignons mycorhiziens à arbuscule (Goltapeh et al .,2008)

Chapitre 3. Les caractéristiques physicochimiques et biologiques du sol

1. Les caractéristiques physiques

1.1. Introduction

Les propriétés physiques d'un sol, influence énormément, la croissance et le développement de la plante. En effet, le support de la plante, la pénétration de ses racines, le drainage d'eau, l'aération et la rétention d'humidité d'un sol, ainsi que la disponibilité en éléments nutritifs d'une plante, sont étroitement liés aux conditions physiques du sol. Ces propriétés, sont liées aussi à deux notions fondamentales : la texture et la structure (AgriInfo.in, 2011 ; Drouet, 2011)

1.2. La texture

Elle se réfère, à la proportion des différentes particules des sols. Les fractions texturales sont, le sable, le limon et l'argile (Bonin, 2006 ; Giasson et Jaouich , 2008). En effet, l'analyse granulométrique permet de fractionner le sol en différentes classes texturales, selon la *loi de Stokes* :

$$V = \frac{h}{t} = \frac{2 (dp-d) gr^2}{9\eta}$$

V = vitesse de sédimentation, cm/sec

g = accélération de la gravité, cm/sec²

dp = densité des particules, g/cm³

d = densité du liquide, g/cm³

r = rayon des particules, cm

η = viscosité, g/cm/sec (Giasson et Jaouich , 2008)

- Le sable

Dont le diamètre des particules est compris entre 0,05 mm et 2 mm, est constitué de quartz, mais peut contenir des fragments de feldsparth et mica, occasionnellement des minéraux lourds tels le Zircon, la tourmaline et l'amphibole. Il a des dimensions uniformes généralement sphériques, la surface n'est pas lisse se caractérise par l'absence de cohésion et de plasticité et est très difficile à mouler (Bonin, 2006 ; Giasson et Jaouich, 2008 ; AgriInfo.in, 2011).

- Le limon

Dont le diamètre des particules est intermédiaire, entre le sable et l'argile, le limon a un diamètre compris entre 2 μm et 0,05 mm. Son extension est assez. Il participe avec l'argile et le sable à former le squelette du sol qui se caractérise par une plasticité et une cohésion modérées. (Bonin, 2006 ; Giasson et Jaouich, 2008 ; AgriInfo.in, 2011).

- L'argile

Dont le diamètre des particules est inférieur à 2 μm (0,002 mm), il a une forme d'aiguille ou de plaque, elle appartient aux groupe des minéraux aluminosilicates. Elles sont considérées comme des minéraux secondaires, issus de la roche mère. Elles se caractérisent par une grande plasticité et cohésion (Bonin, 2006 ; Giasson et Jaouich, 2008 ; AgriInfo.in, 2011).

1.2.2. Détermination de la classe texturale

Pour déterminer la classe texturale d'un sol, on se réfère au triangle de texture, qui est un diagramme en coordonnées tri linéaires et qui varient plus ou moins selon les régions ou les pays (triangles texturaux de l'USDA, de la Carte des sols de Belgique, de la FAO etc) (Giasson et Jaouich , 2008) (Figure 15).

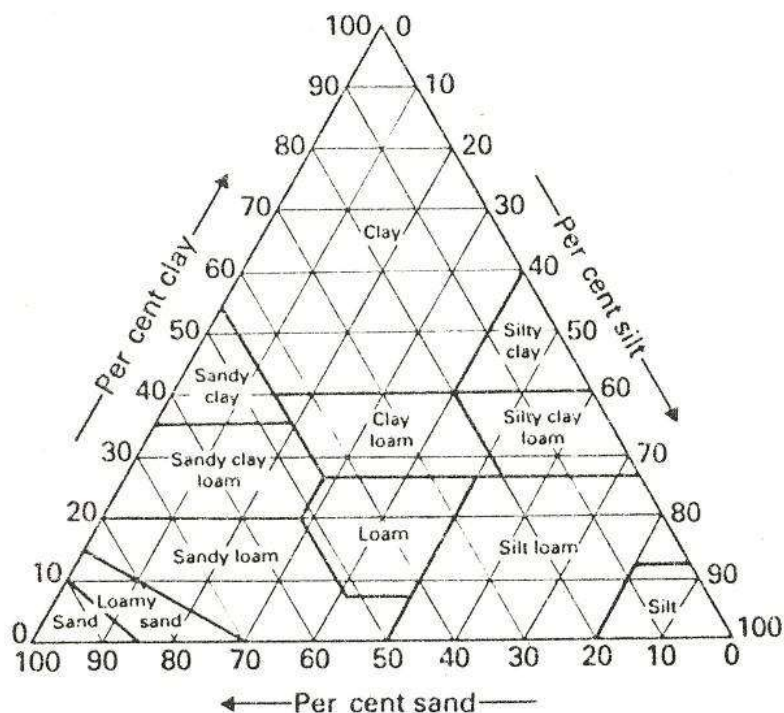


Figure 15 : Le triangle de texture américain selon USDA d'après Giasson et Jaouich , 2008

1.2.3. L'importance de la texture du sol

Les sols sableux, sont généralement meubles et friables et faciles à travailler. Ils facilitent le drainage et l'aération, permet l'évaporation rapide et la percolation. Mais, ont une très faible capacité de rétention d'eau. En effet, dans ces sols le lessivage des éléments nutritifs appliqués est très élevé. Quoique, ces sols sont pauvres en éléments nutritifs et en matière organique. (AgriInfo.in, 2011).

Le sol argileux est un sol lourd, collant lorsque le sol est humide, mais très dur et facile à briser lorsqu'il est sec, peu perméable à cause de ces pores fins, s'engorge rapidement et est difficile à cultiver (Bonin, 2006 ; AgriInfo.in, 2011). Par ailleurs, ses particules jouent un rôle très important dans la fertilité des sols, Ils ont une capacité de rétention d'eau élevée et une faible percolation. (AgriInfo.in, 2011). En effet, Il existe une relation linéaire entre la taille des particules argileuses et la capacité d'échange cationique (CEC), ce qui peut qualifier ce type de sol de très fertile. (AgriInfo.in, 2011 ; Drouet, 2011).

En général, les meilleurs sols agricoles sont celles contiennent : 10 - 20 pour cent d'argile, 5 - 10 pour cent de la matière organique, le reste à partager entre limons et sables (AgriInfo.in, 2011).

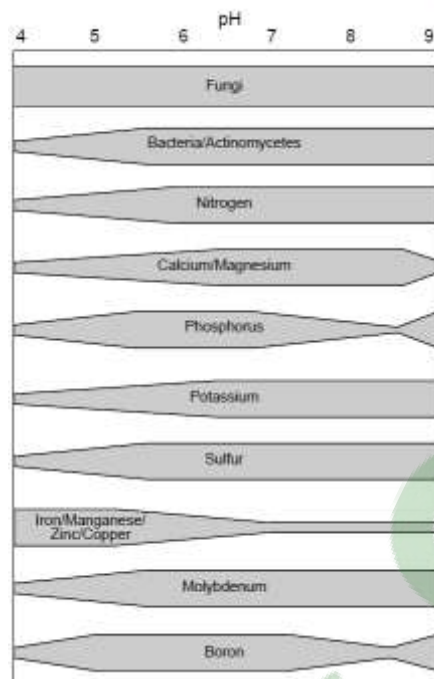
1.3. La structure

La structure du sol réfère, aux dimensions, aux formes, aux modes d'assemblages et aux degrés de développement des particules primaires, ainsi qu'aux vides dans les sols. Cette combinaison d'éléments, peut être naturelle ou artificielle. Elle contribue à la formation d'unités macro-structurales ou micro-structurales. (AgriInfo.in, 2011).

Elle enseigne sur l'arrangement des constituants entre eux. Elle nous donne une idée de la compacité, la forme des fragments : En blocs compacts (structure massive); en grumeaux (structure fragmentaire) ; en particules éparses (structure particulaire). La structure fragmentaire est liée à la forme des agrégats (fibreuse, plane ou arrondie). (Drouet, 2011).

1.4. Le pH du sol

Le pH du sol, est une propriété importante, parce qu'elle affecte la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes et l'activité des micro-organismes dans le sol. L'effet du pH sur l'activité microbienne et la disponibilité des nutriments dans les sols minéraux, est illustrée par la figure 16 (Rosen et al ., 2008).



* plus large est la bande, plus grande est la disponibilité ou l'activité

Figure 16. La disponibilité des nutriments et de l'activité microbienne affectée par le pH du sol d'après Brady, 1990

Le pH, est un des facteurs le plus important, qui touchent la communauté microbienne dans le sol : Tout en influant fortement sur les facteurs abiotiques, tels que la disponibilité de carbone, la disponibilité des nutriments et la solubilité des métaux. En outre, le pH du sol peut contrôler les facteurs biotiques, telles que la composition de la biomasse de champignons et des bactéries, à la fois en forêt et dans les sols agricoles (Rousk et al. , 2010)

Afin de déterminer la neutralité, l'alcalinité ou l'acidité du sol, nous avons référé à la gamme du pH proposé par Brady et Weil, 2008 (Figure 17)

La plupart des plantes de jardin et de paysage naturel, tolèrent un pH de 6,0 à 7,5. La seule exception concerne les plantes acidophiles, comme les bleuets, les azalées, les rhododendrons, qui ont besoin de sol acide. Hortensias bleus exigent également un pH inférieur à 5,0, pour induire la couleur bleue de la fleur. (Figure 18) (Whiting et al., 2011).

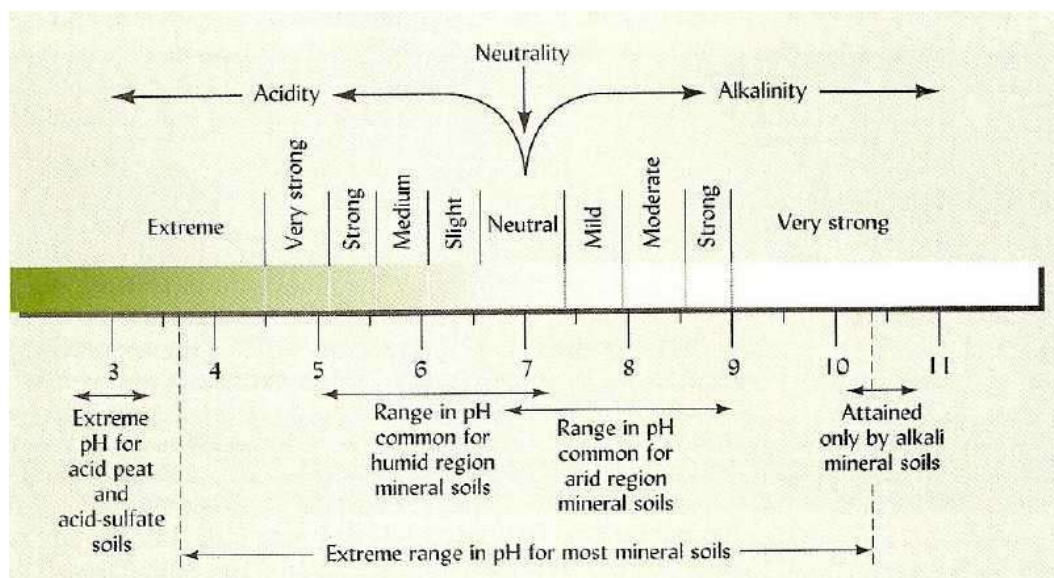


Figure 17: Gammes de pH extrêmes pour la plupart des sols minéraux et gammes dans les régions humides et régions arides des sols d’après Brady et Weil, 2008.

<u>Soil Reaction</u>	<u>pH</u>	<u>Plant Growth</u>
	>8.3	Too alkaline for most plants
	7.5	Iron availability becomes a problem on alkaline soils.
Alkaline soil	7.2	6.8 to 7.2 – “near neutral” 6.0 to 7.5 – acceptable for most plants
Neutral soil	7.0	
Acid soil	6.8	
	6.0	
	5.5	Reduced soil microbial activity
	<4.6	Too acid for most plants

Figure 18: Le pH du sol et la croissance des plantes d’après Whiting et al., 2011

Pendant les saisons où les précipitations sont modérées à faibles, le taux d’évapotranspiration est beaucoup important. Par conséquent, les sels ne sont pas éliminés par percolation profonde; l’augmentation des sels a tendance à diminuer le pH, en forçant plusieurs ions échangeables des cations H^+ de se diriger, vers la solution du sol. Inversement, pendant les saisons humides, les sels sont dilués / retirés de la couche arable et le pH augmente (Rengel , 2002).

1.4.1. Facteurs influant sur le pH du sol

La valeur du pH d'un sol, est influencée par les types de matériaux de base, à partir de laquelle, le sol a été formé. Les sols développés, à partir des roches basiques, ont généralement des valeurs de pH plus élevés, que ceux qui sont formés à partir de roches acides (Williamson., 2012). Les précipitations, affectent également le pH du sol. Les zones du monde avec des précipitations limitées, ont généralement des sols alcalins. Tandis que, les zones à pluviométrie élevée, ont généralement les sols acides (Williamson., 2012 ; Whiting et al., 2011). Les éléments de bases, tel que le calcium et le magnésium sont remplacés par des éléments acides, comme l'aluminium et le fer. Pour cette raison, les sols formés dans des conditions de fortes précipitations, sont plus acides que ceux formés dans des conditions arides (sèches) (Williamson., 2012).

1.5. La salinité

La salinité, est une mesure de la concentration des minéraux dissous dans le sol. Les plantes, peuvent absorber facilement l'eau et les engrais, jusqu'à une salinité maximale de 3 à 4 ms/cm ou une concentration en sels de 3 à 4 grammes par litre de solution du sol. (Carrier ,2003). Toutefois, cette mesure ne donne aucune idée, de ce qui est en excès ou en carence, une analyse détaillée s'impose dans ce cas (Carrier ,2003).

Salinisation et alcalinisation peuvent se cumuler ou se produire indépendamment. Selon la FAO, 6.4 % des terres émergées sont affectées par une salinité et/ou une alcalinité excessive, ce qui participe à la désertification des sols (Ruellan et al., 2008).

2. Les caractéristiques chimiques

2.1. Les cations échangeables

2.1.1. Le sodium échangeable

Le sodium échangeable, devrait être le quatrième cation -en point de vue quantité- parmi les autres cations échangeables. Sa fourchette optimale est inférieure à 6%. Lorsqu'il constitue 6% ou plus de la capacité d'échange cationique, le sol peut être sodique et sensible à la dispersion. Les plantes sont plus sensibles à la salinité, dans leurs phases germination et plantule que dans leurs phases ultérieures de leur croissance. Les facteurs édaphiques et climatiques, la texture du sol et le type de sel, peuvent également influencer sur la tolérance des plantes à la salinité, bien que tous les sels peuvent être nocifs pour les plantes, le sodium et le chlorure sont beaucoup nuisibles que d'autres (Reuter et Robinson, 1986).

2.1.2. Le calcium échangeable

Le calcium échangeable, devrait représenter la portion la plus importante des cations. La fourchette optimale, est comprise entre 65% à 80%. Le ratio de calcium échangeable au magnésium échangeable, fournit un guide de la structure, le drainage des sols, le développement des racines et la croissance subséquente de la plante. Un rapport calcium/magnésium supérieur à 2/1, indique que le sol est bien structuré. Un rapport calcium/magnésium de plus de 10/1, indique une carence en magnésium potentiel (Reuter et Robinson, 1986).

2.1.3. Le magnésium échangeable

Le magnésium échangeable, devrait constituer la seconde grande quantité des cations après le calcium. La fourchette optimale est de 10% à 20%. Le rapport du magnésium au potassium doit être supérieur à 1,5/1. Si le magnésium échangeable est supérieur à 20% des cations, il peut provoquer une carence en potassium. Inversement, si le potassium échangeable est supérieur à 10% des cations, il peut provoquer une carence en magnésium (Reuter et Robinson, 1986)

2.1.4. Le potassium échangeable

C'est la somme, du potassium libre de la solution du sol et de celui retenu sur les charges négatives, des surfaces externes des minéraux argileux. La valeur du potassium échangeable, constitue une information importante puisqu'elle donne une estimation, de la

teneur du sol en potassium assimilable. Le compartiment potassique effectivement disponible pour les plantes, est le potassium échangeable (Reuter et Robinson, 1986)

2.2. La matière organique

La matière organique, joue un rôle nutritionnel en fournissant différents éléments nutritifs, elle a un effet favorable sur les propriétés physico-chimiques comme la structure et la stabilité structurale, la rétention en eau surtout dans les sols sableux, pour l'augmentation de la capacité d'échange cationique et l'activité microbologique, ainsi que, la stimulation de la croissance racinaire (Agriinfo.in, 2011).

2.3. Le calcaire total

Le calcaire total, est une des composantes héritées du sol, La présence de calcaire confère au sol des caractéristiques spécifiques, en termes de comportement physique et chimique et influe sur son activité biologique. Son absence totale, a pour conséquence une acidification progressive plus ou moins rapide suivant le contexte pédoclimatique, qu'il est nécessaire de compenser par des apports réguliers d'amendements basiques (chaulage) (Agriinfo.in, 2011).

2.4. Le calcaire actif

La quantité du calcaire qui peut nous renseigner sur la réactivité du calcaire, qui est important pour les plantes est appelée : Le calcaire actif, dont les diamètres sont inférieures à 20 μm (Baize, 2000)

2.5. Le Phosphore assimilable

C'est la partie du phosphore, susceptible d'être absorbée par la plante. On y trouve plusieurs anions (PO_4^{-3} , PO_4H^{-2} , PO_4H^2), les uns dissous dans la solution du sol, d'autres plus ou moins fortement adsorbés sur les surfaces externes des minéraux argileux. Il se pourrait que, les anions phosphoriques précipitent au contact du calcaire actif (Baize, 2000).

2.6. L'azote total

C'est la fraction de l'azote organique et l'azote minéral, présente dans un échantillon de sol, sauf l'azote gazeux (Baize, 2000)

2.6.1. l'azote minéral : c'est la somme de l'azote nitrique et de l'azote ammoniacal. Ces deux formes, sont présentent dans la solution du sol (Baize ,2000)

2.6.1.1. L'azote nitrique

En effet, l'azote nitrique présent sous forme de nitrate (NO_3^-), qui est la forme facilement absorbée et disponible par les plante (Baize ,2000).

2.6.1.2. L'azote ammoniacal

Présent sous forme d'ammonium (NH_4^+), il est soit fixé au complexe d'échange cationique, soit il est fixé au minéraux argileux sans qu'il soit échangeable, soit il est transformé en azote nitrique (nitrification) (Baize ,2000).

2.6.2. L'azote organique

C'est celui qui est intégrés à des macromolécules organiques, qui résultent de la décomposition des matières végétales, animales ou microbiennes. Il représente 95 % de l'azote total (Baize ,2000).

3. Les caractéristiques biologiques

3.1 .La pédofaune

3.1.1. Introduction

Les invertébrés du sol présentent une diversité taxonomique. Ils forment des organismes de petite taille (moins de 0,2 mm, la microfaune), des organismes de taille intermédiaire (entre 0,2 et 2 mm, la mésofaune) des organismes de grande taille (plus de 2 mm, la macrofaune) (Ruellan et al ., 2003)

En effet, l'activité biologique de ces organismes est liée à la quantité de matière vivante présente dans le sol (Davet 1996) (Figure 1)

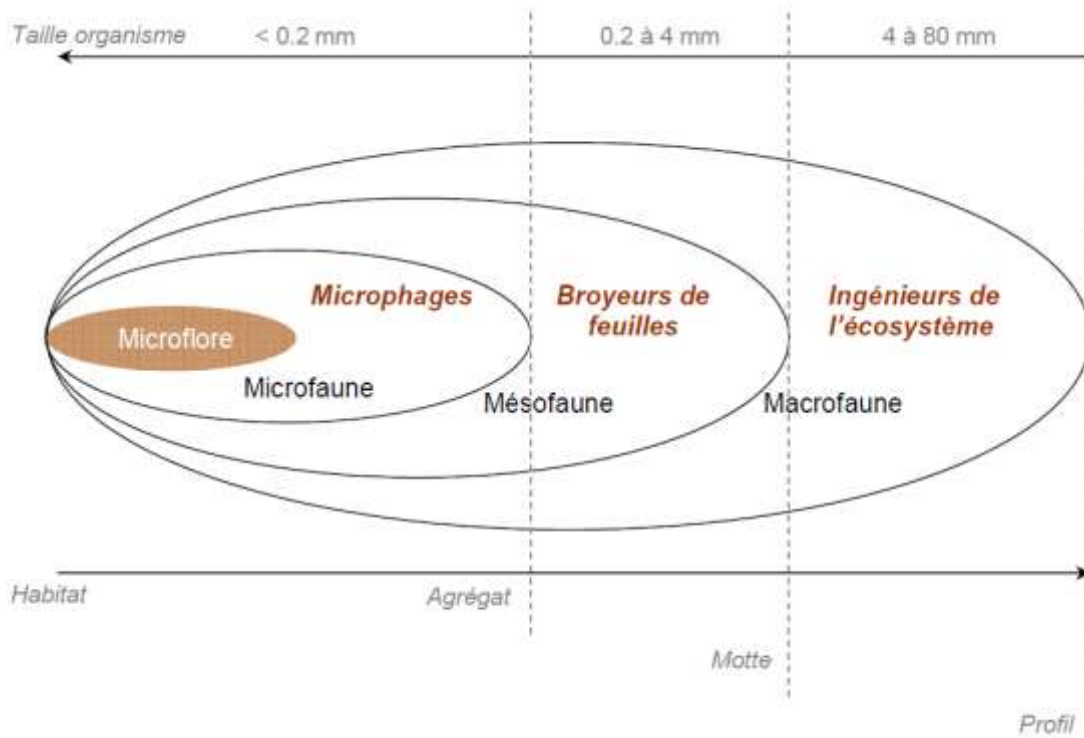


Figure 19 : Classification et rôle des organismes vivants dans le sol selon leur taille, leur habitat et leur fonction d'après Girard et al. 2005

3.1.2. La macrofaune

Elle regroupe les animaux d'une longueur allant de 4 à 80 mm. On retrouve dans ce groupe des Annélides (lombrics), des Mollusques (limaces), l'embranchement des Arthropodes comme les cloportes (Crustacés isopodes), des opilions (Arachnides) et les Hexapodes (ou Insectes) : Tes les fourmis (Hyménoptères), crabes (Coléoptères), courtilières

(Orthoptères)... etc. Ces deux catégories d'animaux ont une action physique directe sur la structure du sol : brassage, aération, fragmentation et formation d'agrégats.

✓ Les Lombriciens : ingénieurs de l'écosystème sol

Les Lombriciens (Annélides oligochètes) ont une taille variant de quelques centimètres à 2 ou 3 mètres. Les vers de terre dominent en biomasse la macrofaune du sol (Cluzeau et al. 2005).

Les Lombriciens parcourent les différents horizons selon un mode de progression spécifique dit « tunnelier ». On distingue trois catégories, selon des critères morphologiques, physiologiques et écologiques (Bouché, 1972)

Ces organismes modifient l'agrégation et la porosité du sol, facilitent l'infiltration et le stockage de l'eau dans le sol, en décomposant la matière organique, ils participent également au recyclage des nutriments, à la régulation du ruissellement de l'eau et au stockage du carbone (Ruellan et al., 2003). En effet, la diversité et l'abondance des populations lombriciennes dépendent de l'apport en matière organique (Cluzeau et al. 1999 ; Peres et al. 1998).

3.1.3. La Mésofaune

La mésofaune du sol est un ensemble d'animaux dont la taille est intermédiaire, elle est comprise entre 0.2 et 4 mm. Les acariens, les némathelminthes, les collembolés et autres insectes appartiennent à ce groupe (Girard et al. 2005).

Les acariens et les collembolés sont les plus abondants des microarthropodes, ils peuvent atteindre un million par mètre carré dans un sol brun (Deprince 2003)

3.1.4. Microfaune

Ces animaux sont de très petites tailles, (< 0.2mm ou de diamètre < 0.1mm) (Gobat et al. 2003). Parmi ces organismes on trouve les cloportes qui sont des fragmenteurs et des transformateurs de la litière. Ils sont phyto-saprophages (Gobat et al. 2003). La consommation de la litière (feuilles sèches) par les cloportes a été estimée, par le laboratoire Ecologie, Evolution, Symbiose de Poitiers, à 210 kg/ha/an, dont 160 kg retournent au sol sous l'état de boulettes fécales. Ces cloportes ont un rôle extrêmement important dans le recyclage de la matière organique, ce qui donne une importance écologique de cette espèce dans l'étude du fonctionnement biologique des sols (Paoletti and Hassall 1999, Souty-Grousset et al. 2005).

3.2. La microflore et le sol

3.2.1. Introduction

Les microorganismes, jouent un rôle essentiel au niveau du sol. Ils influencent directement ou indirectement la croissance des plantes et leur santé. Alors, que certains microorganismes agissent négativement sur la vitalité de la plante, certains autres favorisent positivement leur développement (Fuchs, 1999).

3.2.2. Les principaux taxons de microorganismes et leurs rôles

Dans le sol, les grands groupes des microorganismes du sol sont représentés par quelques métazoaires, des protozoaires, des algues microscopiques, des champignons, des bactéries, des actinomycètes, des cyanobactéries et des virus (Roger et Garcia, 2001) (Tableau 1).

Grands groupes	Taxons considérés comme importants dans le sol	Commentaires
Virus		
Procaryotes photosynthétiques	Cyanobactéries	Ex. Cyanophycées (algues)
	Bactéries pourpres et vertes	
Bactéries	Pseudomonales chimio-autotrophes	
	Pseudomonales chimio-hétérotrophes	
	Eubactériales	
	Protistes inférieurs	
Actinomycètes	Mycobactériacées	Les Actinomycètes sont des bactéries Gram + à structure végétative de type mycélien
	Actinomycétacées (ou Proactinomycètes)	
	Streptomycétacées	
	Actinoplanacées	
Champignons	Moisissures à plasmodium	
	Champignons à flagelle	
	Zygomycètes	
	Champignons supérieurs	
	Champignons imparfaits	
Algues	Algues vertes	aussi dans les Protozoaires
	Eugléniens	
	Algues jaunes, Diatomées	
Protozoaires	Amibes	
	Testacés	
	Flagellés	
	Ciliés	

Tableau 1 : Les principaux taxons de microorganismes du sol (Roger et Garcia, 2001).

Cependant, les groupes les plus importants numériquement dans le sol sont représentés respectivement par les bactéries, les actinomycètes, les champignons, les algues et en dernier position les protozoaires (figure 20)

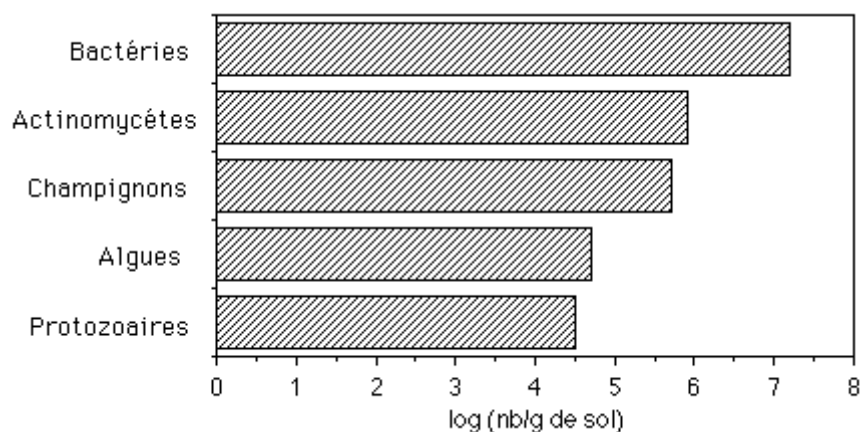


Figure 20 : Comptage des grands groupes de microorganismes dans un sol fertile d'après Roger et Garcia, 2001.

✓ **Les virus**

Ce sont les plus petites entités vivantes. Ils ne peuvent se multiplier qu'à l'intérieur des cellules d'autres organismes vivants. L'importance écologique des virus est encore mal connue (Roger et Garcia, 2001).

✓ **Les cyanobactéries**

Sont des procaryotes photosynthétiques, dont certains sont capables de fixer l'azote atmosphérique. Possédant un système photosynthétique producteur d'oxygène (Roger et Garcia, 2001).

✓ **Les bactéries rouges et vertes**

Ce sont des microorganismes qui tirent leur énergie de la lumière, possèdent des pigments spécifiques (bactériochlorophylles) et ne produisent pas d'oxygène (Roger et Garcia, 2001).

✓ **Les actinomycètes**

Les actinomycètes présentent des similitudes avec, les Eubactéries et les champignons. Elles se développent relativement bien, sur une matière organique partiellement dégradée et inapte à porter une microflore fongique et bactérienne (ROGER et Garcia, 2001).

✓ **Les champignons** : Les champignons constituent les agents principaux, de la décomposition de la matière organique, dans les sols exondés. Sur le plan écologique, on peut distinguer deux groupes: les champignons du sol et les champignons des racines (les mycorhizes) (Roger et Garcia, 2001).

✓ **Les Algues**

Les algues sont, les principaux agents de minéralisation et de décomposition de la matière organique, dans les milieux extrêmes (pluviométrie réduite, températures élevées ou très basses, milieux hyper salés ...) (Roger et Garcia, 2001).

✓ **Les protozoaires**

Ce sont des protistes eucaryotes, unicellulaires, photosynthétiques ou non, mobiles ou immobiles, libres ou parasites. Le rôle des protozoaires dans le sol est encore mal compris. (Roger et Garcia, 2001).

3.2.3. Groupements fonctionnels de taxons de microorganismes du sol

Les microorganismes, sont classés aussi selon leurs activités microbiologiques, qui participent d'une façon très importante à la chimie du sol. Par exemple, les organismes qui peuvent décomposer la cellulose, sont regroupés dans la catégorie des cellulolytiques (Tableau 2) (Roger et Garcia, 2001).

Catégories	Bactéries	Actinomycètes	Champignons	Algues
Producteurs primaires	<i>Cyanobactéries</i>			<i>Chlorophycées</i> <i>Diatomées</i>
Cellulolytiques	<i>Cytophaga</i> <i>Clostridium</i> <i>Cellulomonas</i>	<i>Nocardia</i> <i>Streptomyces</i> <i>Micromonospora</i>	<i>Aspergillus</i> <i>Fusarium</i> <i>Trichoderma</i>	
Ligninolytiques			<i>Coprinus</i> <i>Agaricus</i> <i>Poria</i>	
Pectinolytiques	<i>Bacillus</i> <i>Erwinia</i> <i>Clostridium</i>	<i>Streptomyces</i>	<i>Fusarium</i> <i>Verticillium</i>	
Chitinoxytiques	<i>Achromobacter</i> <i>Bacillus</i> <i>Nitrosomonas</i> <i>Nitrobacter</i>	<i>Streptomyces</i>	<i>Aspergillus</i>	
Nitrifiants	<i>Mycobacterium</i> <i>Bacillus</i> <i>Nitrosomonas</i> <i>Nitrobacter</i>	<i>Streptomyces</i>	<i>Aspergillus</i>	
Dénitrifiants	<i>Achromobacter</i> <i>Pseudomonas</i> <i>Thiobacillus</i> <i>Bacillus</i>			
Fixateurs de N ₂	<i>Cyanobactéries</i> <i>Azotobacter</i> <i>Beijerinckia</i> <i>Klebsiella</i> <i>Azospirillum</i> <i>Rhizobium</i> cf. tableau 11.7			
Sulfoxydants	<i>Thiobacillus</i> <i>Beggiatoa</i> Bactéries vertes Bactéries pourpres		<i>Aspergillus</i> <i>Penicillium</i>	
Sulfato-réducteurs	<i>Desulfotomaculum</i> <i>Desulfomonas</i> <i>Desulfovibrio</i> <i>Desulfobacter</i>			

Tableau 2 : Groupements fonctionnels de taxons de microorganismes du sol, d'après Roger et Garcia, (2001).

3.2.4. Les microorganismes et les cycles des minéraux

Les éléments nutritifs, sont soit sous formes organiques, soit sous formes minérales. Cependant, certaines formes minérales peuvent être assimilées par les plantes, alors que d'autres non. Les communautés microbiennes, jouent un rôle absolument capital, dans le recyclage de la matière organique et assurent le renouvellement de l'approvisionnement de la plupart des ions minéraux du sol, de ce fait la biomasse microbienne se comporte comme un réservoir d'éléments minéraux (Davet, 1996 ; Roger et Garcia, 2001).

Tout d'abord, il faut connaître les différents éléments minéraux, leur forme dans le sol et leur principal rôle dans la plante (Tableau 3).

Elément	Forme dans le sol	Concentration dans le sol (S) et dans la plante (P) (% mat. sèche)	Rôles principaux dans la plante carence, toxicité
N	<ul style="list-style-type: none"> organique : plus de 95% du total NH_4^+ : forme transitoire, retenue sur le complexe NO_3^- : principale source d'azote pour les plantes ; facilement lixivié 	<p>S : 3,3 à 3</p> <p>P : 5 à 50</p>	<ul style="list-style-type: none"> constituant des acides aminés, des protéines, des acides nucléiques et des lipides favorise la multiplication cellulaire et celle des chloroplastes favorise la synthèse des glucides forme des réservoirs dans les graines constituant d'hormones
P	<ul style="list-style-type: none"> organique : dans les débris de la litière minéral : constituant non assimilable de certains minéraux (ex. apatite) PO_4^{3-} adsorbé ; peu assimilable HPO_4^{2-} ou H_2PO_4^- libres 	<p>S : 0,1 à 1</p> <p>P : 1 à 5</p>	<ul style="list-style-type: none"> constituant principal des protéines phosphorées (ex. lécithines) constituant de l'ADN, de l'ARN et des lipides phosphorés rôle dans le métabolisme des glucides et dans la mise à fruit transport d'énergie dans la cellule (ADP, ATP) migre en fin de saison vers les organes de réserve
S	<ul style="list-style-type: none"> minéral des roches gypseuses, pyrite oxydé en sulfate par des bactéries, à partir de sulfures ou de soufre élémentaire H_2S provenant des matières organiques décomposées ou de la sulfatoréduction bactérienne 	<p>S : 0,1 à 1</p> <p>P : 0,5 à 5</p>	<ul style="list-style-type: none"> constituant des acides aminés soufrés (méthionine, cystéine) constituant de certains cofacteurs enzymatiques toxique en excès, avec espèces résistantes par accumulation jusqu'à 7% de la matière sèche ou par limitation à l'absorption

Elément	Forme dans le sol	Concentration dans le sol (S) et dans la plante (P) (% ₁₀₀ mat. sèche)	Rôles principaux dans la plante carence, toxicité
K	<ul style="list-style-type: none"> constituant des silicates (micas, feldspaths) : 95 à 98% du K d'un sol «actif», en poudre fine de CaCO₃ rétrogradé dans les argiles fixé (faiblement) sur le complexe adsorbant libre dans la solution du sol 	<p>S : 2 à 30</p> <p>P : 5 à 50</p>	<ul style="list-style-type: none"> se trouve à l'état soluble, très mobile régulateur principal de la pression osmotique, donc du transit de l'eau et de la phase passive de l'adsorption activateur d'enzymes favorise la synthèse des glucides et leur stockage très facilement lixivié des feuilles par la pluie
Ca	<ul style="list-style-type: none"> constituant des roches calcaires «actif», en poudre fine de CaCO₃ échangeable sur le complexe adsorbant libre dans la solution du sol 	<p>S : 2 à 15</p> <p>P : 0,5 à 50</p>	<ul style="list-style-type: none"> constituant des parois cellulaires qu'il rend rigides et résistantes activateur d'enzymes favorise la maturation des fruits neutralise les acides organiques formés par le métabolisme s'accumule dans les organes âgés (écorce, bois, ...)
Mg	<ul style="list-style-type: none"> constituant des dolomies échangeable sur le complexe adsorbant libre dans la solution du sol 	<p>S : 1 à 10</p> <p>P : 1 à 10</p>	<ul style="list-style-type: none"> constituant de la chlorophylle activateur d'enzymes évite la chlorose (non formation de la chlorophylle) sélectionne les espèces si sa concentration est élevée dans le sol
Fe	<ul style="list-style-type: none"> plus de 20 composés minéraux : hémanite, goéthite, lépidocrite, hydroxydes, etc. constituant du complexe argilo-humique chélaté à la manière organique forme ionique en solution (Fe²⁺ dans les sols anoxiques) 	<p>S : jusqu'à 40000 ppm</p> <p>P : 50 à 1000 ppm</p>	<ul style="list-style-type: none"> évite la chlorose effectue des processus d'oxydoréduction constituant et activateur d'enzymes chélaté par les sidérophores, transporteurs cellulaires régulateur de la réduction des nitrites et de la fixation d'azote constituant de la chlorophylle
Mn	<ul style="list-style-type: none"> semblables à celles du fer 	<p>S : 200 à 4000 ppm</p> <p>P : 20 à 200 ppm</p>	<ul style="list-style-type: none"> favorise la croissance et évite la chlorose carence possible sur sols basiques et toxicité sur sols acides constituant et activateurs d'enzymes rôle dans l'oxydation de l'eau lors de la photosynthèse
Cu	<ul style="list-style-type: none"> constituant de minéraux (ex. chalcopryrite CuFeS₂) chélaté à la matière 	<p>S : 5 à 100 ppm</p> <p>P : 2 à 200 ppm (Cuprophytes jusqu'à 1600)</p>	<ul style="list-style-type: none"> régulateur des processus d'oxydoréduction constituant d'enzymes assurant la synthèse de la lignine stimulation de la croissance toxique à hautes concentrations, sauf pour des plantes adaptées
Zn	<ul style="list-style-type: none"> constituant de silicates ferromagnésiens très peu de Zn²⁺ en solution 	<p>S : 10 à 300 ppm</p> <p>P : 10 à 100 ppm</p>	<ul style="list-style-type: none"> constituant d'enzymes d'oxydation (oxydases) synthèse et protection des hormones de croissance aide à la synthèse de la chlorophylle
Mo	<ul style="list-style-type: none"> constituant de minéraux MoO₄²⁻ ou HMoO₄⁻ fixés sur le complexe adsorbant ou libres dans la solution du sol 	<p>S : 0,5 à 5 ppm</p> <p>P : 0,2 à 10 ppm</p>	<ul style="list-style-type: none"> nécessaire au métabolisme de l'azote (constituant de l'enzyme nitrate réductase, ainsi que du complexe de la nitrogénase)

Elément	Forme dans le sol	Concentration dans le sol (S) et dans la plante (P) (% ₁₀₀ mat. sèche)	Rôles principaux dans la plante carence, toxicité
B	<ul style="list-style-type: none"> constituant des silicates (ex. 3-4 % de la tourmaline) 	<p>S : 5 à 100 ppm</p> <p>P : 2 à 100 ppm</p>	<ul style="list-style-type: none"> constituant d'enzymes aide à la synthèse de la chlorophylle carences fréquentes, amenant par exemple le pourrissement du cœur de la betterave ou des lésions de l'écorce du pommier
Al	<ul style="list-style-type: none"> constituant de bases des minéraux, avec Si (8% de la lithosphère) formes nombreuses en fonction de l'acidité du sol, entre Al(OH)₄⁻, Al(OH)₃ et Al³⁺ (ion libre) 	<p>S : 50 à 200 ppm</p> <p>P : 2 à 3 ppm</p>	<ul style="list-style-type: none"> favorise, à très faibles concentrations, la production d'espèces cultivées très vite toxique dès que le pH du sol est inférieur à 5,5 action de sélection des espèces sur sol acide, seules les aluminotolérantes résistent (ex. Ericacées)

Tableau 3. Les bioéléments dans le sol et dans la plante, d'après Gobat et al., (1998).

3.4.2.1. Le cycle de carbone

L'importance des microorganismes dans ce cycle est évidente: La totalité du carbone utilisable par les plantes, c'est-à-dire le gaz carbonique de l'atmosphère, serait épuisé en 20 ans, sans leur intervention dans la minéralisation de la matière organique (Figure 21 d'après Roger et Garcia, 2001).

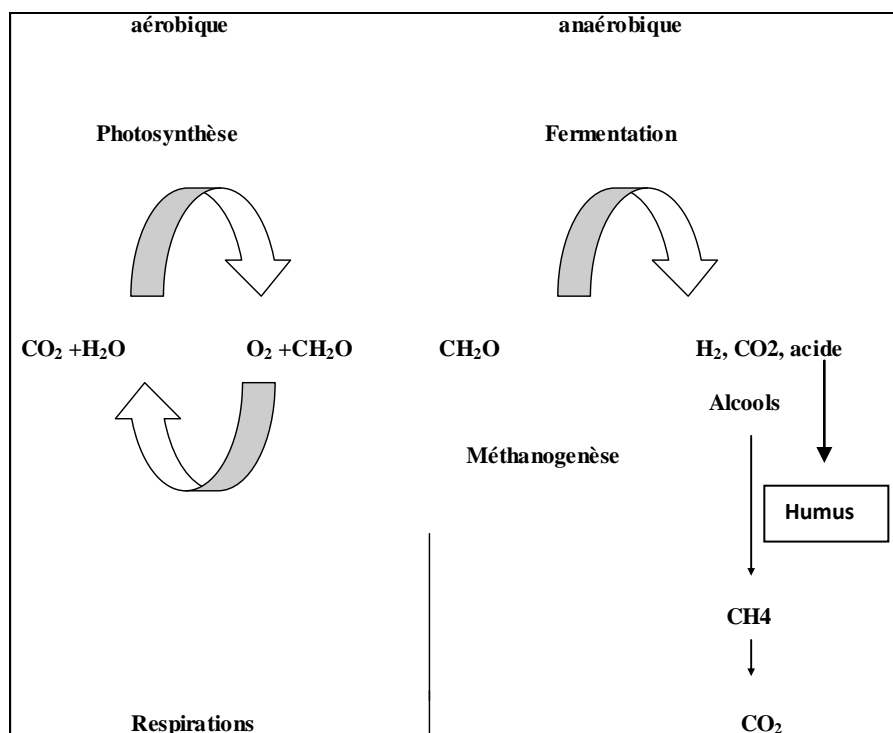


Figure 21. Le cycle de carbone d'après Fortin, (2011).

Dans le sol, la matière organique fraîche est en partie minéralisée par divers microorganismes. C'est les substances solubles, de faible poids moléculaire qui sont rapidement minéralisées, le reste est progressivement transformé en composés très complexes de poids moléculaire élevé appelés humus (Fuchs, 1999)

En effet, la matière organique se présente sous trois formes dans le sol :

1. Matière organique fraîche, non décomposée ;
2. Matière organique non humifiée , facilement biodégradable, pouvant être séparée des argiles ;

3. Matière organique humifiée (*humus sensu stricto*). Fraction dense, plus ou moins résistante à la biodégradation, liée aux argiles (Roger et Garcia, 2001).

L'humus, joue un rôle essentiel dans la fertilité du sol. Ceci à tous les niveaux: physiques, chimiques et biologiques (Fuchs, 1999)

- a. Physiques

L'humus, assure une bonne stabilité de la structure du sol, ce qui garantit sa bonne aération, le rend plus résistant à l'érosion, il améliore considérablement la pouvoir de rétention en eau des sols (Fuchs, 1999).

- b. Chimiques

L'humus, en général chargé négativement, peut attirer réversiblement les cations. La capacité d'échange d'humus est très importante, il joue ainsi un rôle régulateur essentiel. Ils ont également un grand pouvoir tampon, aidant ainsi à stabiliser le pH des sols (Fuchs, 1999).

- c. Biologique

L'humus, constitue un milieu de nourriture et refuge, pour de nombreux microorganismes. Les complexes argilo-humiques sont le siège d'une vie microbienne importante (Fuchs, 1999).

3.4.2.2. Le cycle de l'azote

Les microorganismes fixateurs d'azote, jouent ainsi un rôle primordial dans le cycle naturel de l'azote. Ces microorganismes, vivent soit en symbiose avec des plantes (bactéries *Frankia*, *Rhizobium*,...), soit librement dans les sols (*Azotobacter*, *Clostridium*, *Azospirillum*,...) (Fuchs, 1999)

L'azote ammoniacal, issu de la fixation biologique de l'azote est transformé par des bactéries en azote nitrique. Cette réaction appelée : la nitrification est principalement réalisée par des bactéries de la famille des *Nitrosomonas*. Ce nitrite est alors transformé en nitrate par d'autres bactéries comme des *Nitrobacter*. Cette réaction peut être inversée, on parle alors de dénitrification. Ces nitrites peuvent ensuite être convertis en ammoniac (Figure 22) (Fuchs, 1999)

En effet, le cycle d'azote est un processus biogéochimique important des sols, effectuée par environ une centaine de différentes bactéries aérobies et anaérobies, cyanobactéries et actinomycètes (Fortin, 2011)

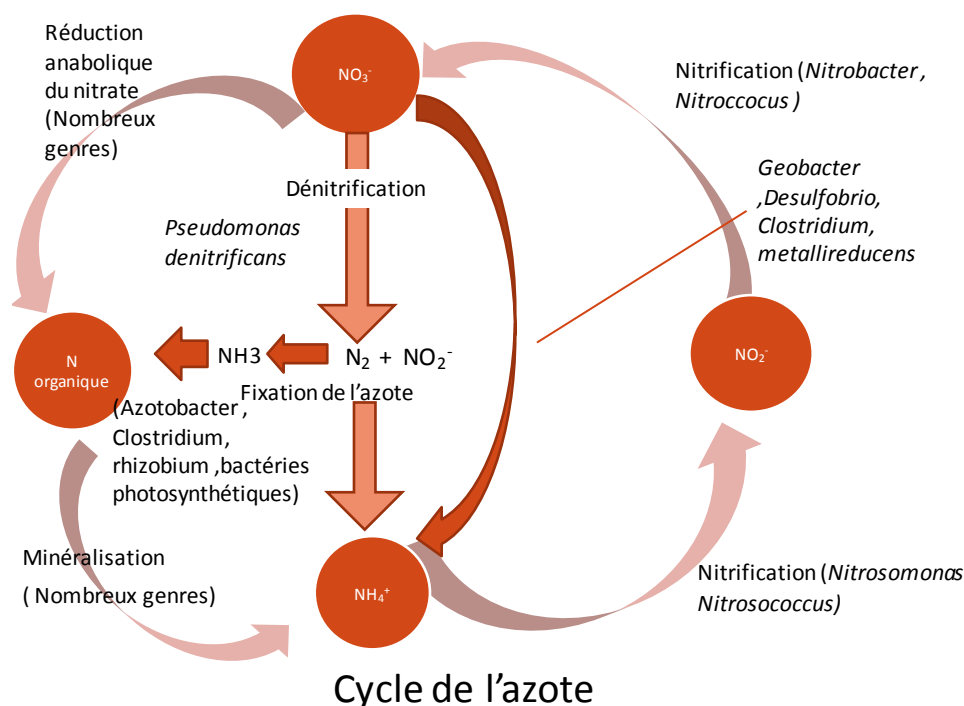


Figure 22 : Le cycle de l'azote d'après Lianes, (2011).

3.4.2.2. Le cycle de phosphore

La plus grande partie du phosphore du sol, minérale ou organique, est insoluble. Les microorganismes interviennent dans les processus de solubilisation, d'assimilation et d'immobilisation de cet élément (Fuchs, 1999 ; Roger et Garcia, 2001).

Le phosphore minéral, insoluble est constitué de phosphates souvent fluorés, de calciums en sol alcalin et de fer et d'aluminium en sol acide. En effet, de nombreux microorganismes peuvent solubiliser ces sels grâce aux acides organiques, les phosphobactéries font partie de ces microorganismes (Davet, 1996 ; Fuchs, 1999). Les mycorhizes, sont des auxiliaires irremplaçables dans cette problématique (Fuchs, 1999).

Les racines des plantes, quelques microorganismes et les éctomycorhizes possèdent une phosphatase qui peut transformer le phosphore organique en phosphore minéral assimilable par la plante, cependant les champignons mycorhiziens à arbuscules jouent un rôle primordial

3.4.2.5. Le cycle du fer

Le fer, issu de la roche mère relativement abondant, mais généralement peu bio-disponible, présente une forte réactivité chimique, peut former des complexes organométalliques solubles. Sa mobilité dépend alors, des conditions acido-basiques, d'oxydoréduction du milieu et de la présence de ligands organiques. Ces paramètres physico-chimiques, sont également sous la dépendance des activités microbiennes du sol, qui les modifient en permanence (Morot-Gaudry, 2004)

Le fer, se présente principalement sous forme d'hydroxydes et d'oxydes ferriques (ex. hématite), par le fer des roches cristallines, surtout sous forme de fer bivalent, à l'exemple de la pyrite (Figure 25) (Fuchs, 1999).

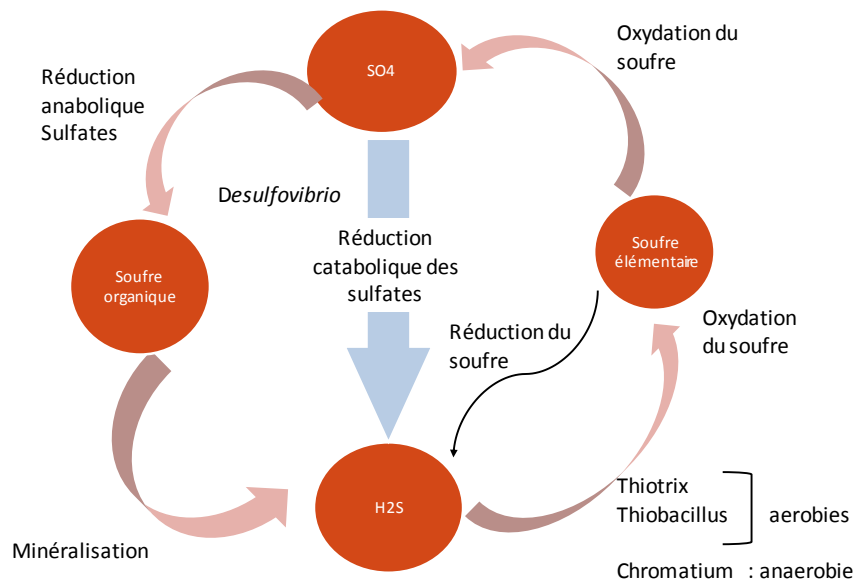


Figure 24 : Le cycle du soufre d'après Lianes, (2011).

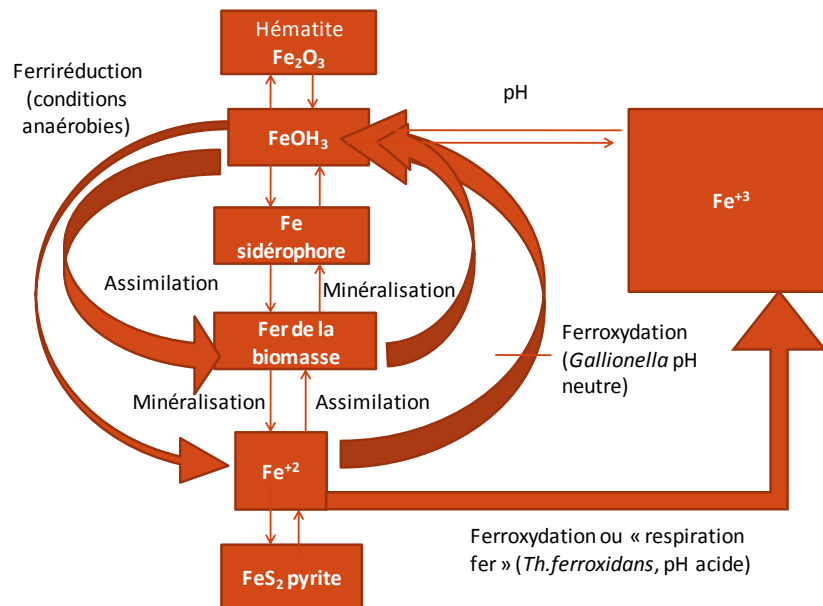


Figure 25 : Le cycle biologique du fer d'après Gobat et al., (1998)

3.2.5. Effets des microorganismes sur les propriétés du sol

3.2.5.1. Genèse de la structure du sol par les microorganismes

✓ Polysaccharides bactériens

Les bactéries interviennent dans la structuration du sol, en initiant la formation et la stabilisation des micro-agrégats, en sécrétant des polysaccharides qui jouent le rôle de ciment entre les particules minérales (Figure 26) (Davet, 1996)



Figure 26 : Rôle des polysaccharides dans l'agrégation du sol d'après Gobat et al, 2010

✓ Substances humiques

Les substances humiques produites par l'action des microorganismes, agissent soit en agrégeant les particules, comme dans le cas des polysaccharides, soit en réduisant la mouillabilité, ce qui favorise la stabilité des agrégats en formation (Roger et Garcia, 2001).

✓ Rôle des champignons et des algues

Rôle des hyphes mycéliens : les observations en microscopie optique et électronique montrent que les grains élémentaires peuvent être enserrés par les hyphes mycéliens comme dans un véritable filet (Figure 27) (Davet , 1996)

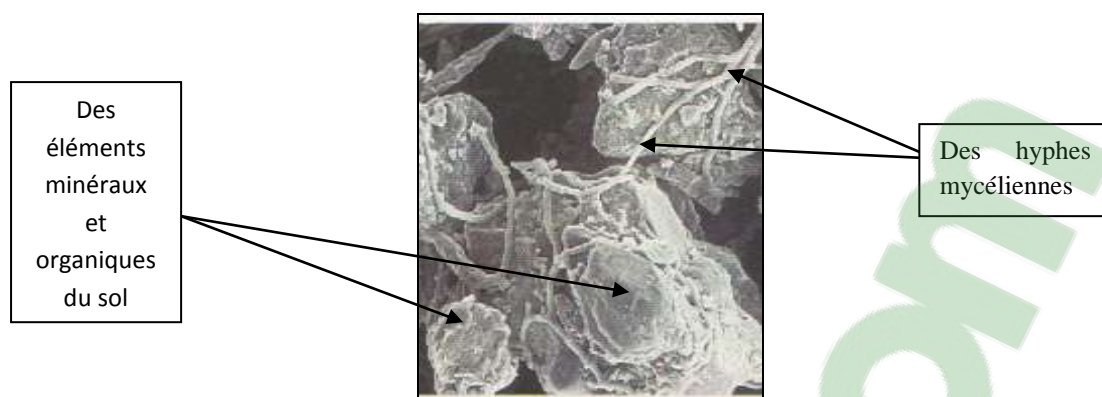


Figure 27 : Réseau de filaments mycéliens réunissant des particules minérales et organiques d'après Davet ,(1996).

3.2.5.2. Destruction de la structure du sol

La destruction de la structure du sol en relation avec l'activité microbienne peut résulter de:

- La stimulation de l'activité de la microflore, sans apport compensateur de matière organique.
- La production de substances hydrofuges ou colmatantes, qui entraîne un colmatage des pores, un mauvais drainage et un ralentissement des activités microbiennes (Roger et Garcia, 2001)

3.2.5.2. Modification du pH du sol

3.2.5.3.1. Acidification du milieu

✓ Sulfo-oxydation

Les sulfures et le soufre réduit des composés organiques, sont oxydés dans le sol en polythionates puis en sulfates, sous l'action des bactéries et des champignons, les ions SO_4^{4-} formés, entraînent une diminution locale du pH .Les organismes les plus actifs dans ce processus sont des bactéries aérobies chimiolithotrophes largement répandues, les Thiobacillus (Davet , 1996).

✓ Nitrification

L'oxydation biologique des sels ammoniacaux aboutit à la formation de nitrates. La réduction consécutive du pH n'est que passagère, car ces nitrates sont eux-mêmes très rapidement absorbés par les plantes, réduits par la microflore dénitrifiante ou entraînés par lessivage (Davet, 1996).

✓ Synthèse d'acides organiques

Une grande variété d'acides organiques, apparaît au cours de la minéralisation de la matière organique. Beaucoup, issus de l'hydrolyse de la lignine sont formés en condition aérobies. D'autre, apparaissent plutôt en condition anaérobie, comme les acides gras. Certains champignons parasites ont un pouvoir acidifiant très élevé, synthétisent de l'acide oxalique qui abaisse le pH à une valeur favorable à l'action de leurs hydrolases (Davet, 1996).

3.2.5.3.2. Alcalinisation du milieu

L'hydrolyse des protéines et des composés organiques azotés en général (l'urée par exemple), conduit à la formation d'ammoniac qui élève le pH jusqu'à 8 ou 9. Cette élévation, est normalement contrebalancée par l'activité de la flore nitrifiante (Davet, 1996).

Chapitre 4. Le symbiote végétale *Acacia saligna*

1. Généralités

Acacia saligna est une plante à phyllodes elliptiques. C'est un arbrisseau à croissance rapide, atteignant 4 à 5 m de haut. Les rameaux anguleux touchent presque le sol. Cette plante, peut former un petit arbre de 5 - 9 m de hauteur, avec une courte tige principale mais bien définie (Midgely et Turnbull, 2003). Elle a une durée de vie moyenne de 30 - 40 ans (Milton & Hall, 1981; Wood & Morris, 2007). Elle est capable de prospérer sur de nombreux types de sols, y compris les sables de pH élevé et des sols du subhumide, semi-aride et des régions tempérées arides (Midgely et Turnbull, 2003). En effet, l'aire de répartition naturelle d'*Acacia saligna* est l'Australie - Occidentale (USDA - ARS, 2010). Elle a été introduite et planté avec succès, en Afrique et la région méditerranéenne, y compris la Libye, la Tunisie, le Maroc, l'Egypte, l'Algérie, l'Ethiopie, l'Afrique du Sud, la Jordanie, la Palestine, l'Iran, l'Irak, la Syrie, la Grèce et Chypre (Midgely et Turnbull, 2003).

2. Taxonomie

Nom taxonomique: *Acacia saligna* (Labill.) Wendl. F.
 Synonymes: *Acacia cyanophylla* Lindl, *Mimosa saligna* Labill, *Racosperma salignum* Labill..
 Noms Communs: bleu-feuille d'acacia (anglais), or couronne acacia (anglais), orange acacia (anglais), Port Jackson (anglais-Afrique du Sud), Port Jackson acacia (anglais), Port Jackson saule (anglais), acacia pleureur (anglais)

Règne: *Plantae*

Rang: Espèce Synonyme(s): *Acacia cyanophylla* Lindl.

Règne	<u><i>Plantae</i></u> – plantes
Sous-règne	<u><i>Viridaeplantae</i></u>
Infra-règne	<u><i>Streptophyta</i></u>
Division	<u><i>Tracheophyta</i></u>
Sous-division	<u><i>Spermatophytina</i></u> -- phanérogames
Infra-division	<u><i>Angiospermae</i></u> -- angiospermes, plantes à fleurs
Classe	<u><i>Magnoliopsida</i></u>
Super -ordre	<u><i>Rosanae</i></u>
Ordre	<u><i>Fabales</i></u>
Famille	<u><i>Fabaceae</i></u>
Genre	<u><i>Acacia</i></u>
Espèce	<i>Acacia saligna</i> (SITI, 2013)

3. Écologie

Acacia saligna, peut se développer tout au long de la zone tropicale et les régions tempérées chaudes du monde (NAS, 1980). Dans son habitat naturel, la température estivale varie d'environ 23 ° - 36 ° C, les températures d'hiver de 4 ° - 9 ° C. La plante ne résiste pas au gel et pousse mieux où les températures d'hiver et d'été sont entre 13° et 30° C respectivement. Elle pousse, près du niveau de la mer à environ 300 m, avec des cas isolés, à des altitudes plus élevées. Cette plante est rustique et pousse, où la pluviométrie annuelle est aussi bas que 250 mm, mais se développe mieux avec 350 - 600 mm. Elle pousse principalement sur sable des plaines côtières, mais on la trouve aussi sur des sites et des berges marécageuses. Elle pousse aussi dans sols argileux moyennement lourds et dans les podzols (NAS, 1980).

4. Utilisation

Les plantations d'*Acacia Saligna* dans les zones tempérées chaudes et semi-arides, fournissent un apport de fourrage, une stabilisation des sols, du bois de feu et charbon de bois (Midgely et Turnbull, 2003). En Australie, *Acacia saligna* a été utilisée comme plante ornementale, pour brise-vent et est de plus en plus plantée dans des systèmes agroforestiers , pour la production de fourrage et pour la conservation des sols (Crompton, 1992; Midgely & Turnbull, 2003). Sa croissance rapide, sa capacité de taillis, à se développer sur le sable et les sols à pH élevé dans le subhumide, les zones semi - arides et arides, lui a valu d'être plantée un peu partout dans le monde, avec environ 300 000 ha, plantés dans le monde. Elle est identifiée, comme une des trois espèces à usages multiples, prioritaires pour les zones arides et semi-arides par Silvae Mediterranea réseau de la FAO (Midgely et Turnbull, 2003). En Tunisie, elle a été traitée avec succès en panneaux de particules, tandis que dans la Méditerranée, elle est utilisée pour des tuteurs de la vigne et de petits outils agricoles (Michaelides, 1997; Midgely et Turnbull, 2003). Elle est aussi, largement utilisée pour la fixation des dunes de sable et le ravinement contrôle de l'érosion, plantée en Australie pour réhabiliter les zones exploitées pour le charbon et les minerais (Langkamp, 1987; Midgely & Turnbull, 2003).

Acacia saligna est également présente aux États-Unis, en Californie (USDA-NRCS, 2010). En Amérique du Sud, en Uruguay, au Chili et au Mexique (Midgely et Turnbull, 2003).

5. La symbiose

En effet, l'arbre nodule par certaines souches de rhizobium, comme c'est le cas avec d'autres espèces d'acacias. Elle forme aussi des symbioses avec les champignons mycorhiziens à arbuscules (Roughley, 1987; Reddell et Warren, 1987). Elle est efficace dans la fixation de l'azote atmosphérique, bien que sa capacité de fixer l'azote, est fortement réduite par la sécheresse, l'engorgement, l'ombrage ou la défoliation (Nakos, 1977 ; El-Lakany, 1987).

Les observations d'*Acacia saligna* en Australie – Occidentale soutiennent l'hypothèse que, les pseudonectaires à la base des phyllodes fournissent, des éléments nutritifs ou de l'eau pour les fourmis, qui à leur tour les protègent contre les herbivores (Majer, 1979).

Partie II

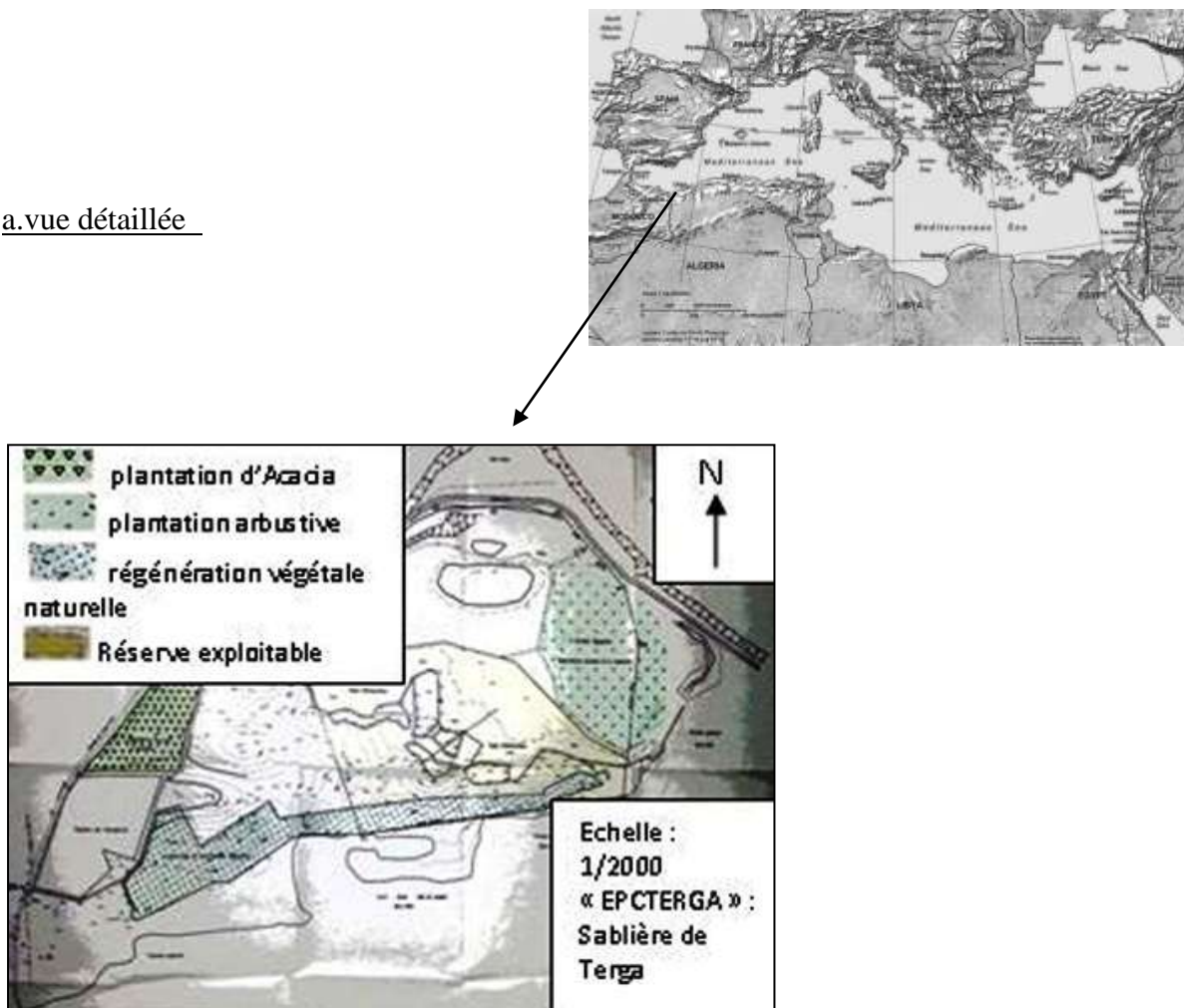
Matériels et méthodes

1. Le site d'étude

La dune littorale de Terga-plage, est une partie d'un ensemble de plusieurs générations de dunes superposées, datées du Calabrien à l'holocène (Gourinard, 1952; Thomas, 1985).

Le site d'étude expérimentale, choisi en fonction de son importance de carrière-sablière, en sols fortement dégradés en fin d'exploitation, se situe dans la commune de Terga qui s'étend sur une superficie de 65,07 Km² (point moyen centré étant à la latitude Nord de 35° 25' 07" Nord et à la Longitude Ouest de 1°10' 39" Ouest) et est située à l'embouchure de l'Oued El Malah, à environ 7 Km de Terga village (Wilaya d'Ain Témouchent). L'altitude moyenne de cette vaste terrasse néogène, faiblement inclinée vers la mer, varie entre 400 m et 200 m (Figure28) (LEM-Agence TAD, 2000

a.vue détaillée



2. Historique sur la formation géologique du site

La région d'étude de ce site, correspond à une vaste étendue néogène, à travers laquelle percent des îlots secondaires, qui créent des accidents imprévus sur une topographie très calme. Cependant, l'embouchure de l'Oued El Maleh se présente par des dépôts quaternaires et néogènes. Le quaternaire dans la région est constituée de formations marines et continentales. La formation marine est constituée quand à elle, soit par des séries marneuses, soit par des dépôts détritiques. Des dépôts de plage et des dépôts dunaires, l'ensemble constitue une série de grès calcaireux. Tandis que, les formations continentales sont représentées, soit par le pliocène, qui est un ensemble de sédiments gris de couleur ocre rouge, soit par le pléistocène, qui est présenté soit par des sables fins, soit par une croûte calcaire épaisse. Toutefois, le néogène est représenté par des grès fracturé (LEM-Agence TAD, 2000).

3. Les conditions climatiques

3.1. Les précipitations

Les précipitations mensuelles montrent une période pluvieuse, qui s'étale de Septembre à Mai, le maximum se situe au mois de Novembre et Décembre. Alors que, la période où on enregistre les plus faibles pluies se situe entre juin à Aout. (E.I.E de la sablière de Terga, 2000).

3.2 .La température

3.2.1. La moyenne des températures maximales du mois le plus chaud « M »

Reflète la chaleur estivale et particulièrement le mois le plus chaud où elle est de 25°C (mois d'Aout) (LEM-Agence TAD, 2000).

3.2.2. La moyenne des températures minimales du mois le plus froid « m »

Est de 8,7 °C pour Beni Saf et de 9,5 °C pour Cap Falcon. Elle est enregistrée, au mois de Février pour la première station et pour le mois de Janvier pour la deuxième (LEM-Agence TAD, 2000).

3.3.Les vents

Il existe deux directions privilégiées : Nord Est à Sud Ouest. Ces vents dominants, ont un impact sur l'ensemble des dunes d'une part et sur la végétation d'autre part (LEM-Agence TAD, 2000).

4. La flore du site :

Notre zone d'étude est inscrite dans le bioclimat méditerranéen semi-aride, à variante thermique chaude .Des travaux ont montré que, cette région renferme un total de trente deux espèces, menacées de disparition dont vingt endémiques. Cependant, les principaux étages de végétation, sont ceux de la végétation halophyte du jujubier, de l'oléo- lentisque, du genévrier de phoenicie , du Thuya, du Pin d'Alep, du chêne liège et du chêne vert (LEM-Agence TAD, 2000).

5. Détermination des caractéristiques édaphiques du site

Afin de déterminer les caractéristiques édaphiques de la sablière, Nous avons choisi dix stations, en se référant à la carte de l'occupation des terres, réalisée par les services de la sablière de Terga (Figure 29). Les échantillons ont été pris au hasard, sur une profondeur de 10 cm. Les résultats sont exprimés au Tableau 2.

Paramètre	Station4	Station10	Station2	Station6	Station5	Station 1	Station7	Station9	Station8	Station3
pH	8,3	8,15	8,43	8,49	8,44	6,68	8,02	8,61	7,71	7,28
CE(ds/m)	0,83	0,21	0,045	0,045	0,047	0,058	0,24	0,0065	6,34	15,24
CT%	16,13	16,13	28,44	2,96	25,47	28,44	27,16	19,1	6,79	5,51
CA%	2,25	4,87	2,37	0	3,12	3,12	2,37	0,75	0	0
MO%	1,56	3,38	1,26	1,16	1,79	2,32	2,53	0,31	4,86	4,76
Kppm	352	806,8	730,1	373,9	26,3	43	62,4	38,5	418,8	400
Pppm	15	18,1	11,5	9,7	6,6	11,1	9,2	6,4	16,8	12,7
N%	0,11	0,16	0,04	0,1	0,03	0,04	0,06	0,01	0,18	0,1
Nameq/100g	3,69	1,62	3,96	6,57	0,19	0,14	0,68	0,05	14,75	21,49
Mgmeq/100g	3,59	2,99	6,37	4,33	0,58	0,63	1,77	0,82	10,85	9,22
Cameq/100g	34,17	35,85	33,42	35,97	25,52	26,61	23,81	21,23	38,74	39,07
A%	27,53	20,45	0,86	6,92	1,67	5,96	3,28	0,99	39,34	29,8
LG%	9,57	18,47	0,08	0,32	0,99	0,33	0,14	0	17,67	147,97
LF%	20,21	31,62	5,81	2,07	6,52	3,89	2,83	8,69	13,03	19,8
SG%	8,4	154,28	77,2	64,16	51,09	63,97	86,19	90,32	18,69	20,45
SF%	20,21	14,17	16,05	26,53	39,74	25,85	7,56	0	11,26	11,99
Les données GPS	30660278 ^E 3922505 ^N Alt 129F _t	30713534 ^E 3948999 ^N Alt 389 F _t	30660278 ^E 3922505 ^N Alt 129F _t	30660355 ^E 3922388 ^N Alt 54 F _t	30713534 ^E 3922520 ^N Alt 109 F _t	30660435 ^E 3922707 ^N Alt 76 F _t	30660248 ^E 3923997 ^N Alt 54 F _t	30660414 ^E 3923320 ^N Alt 19 F _t	30661290 ^E 3923682 ^N Alt 18 F _t	30661297 ^E 3923660 ^N Alt 10 F _t

Tableau 4 : Les caractéristiques physicochimiques des dix stations choisies de la sablière de Terga

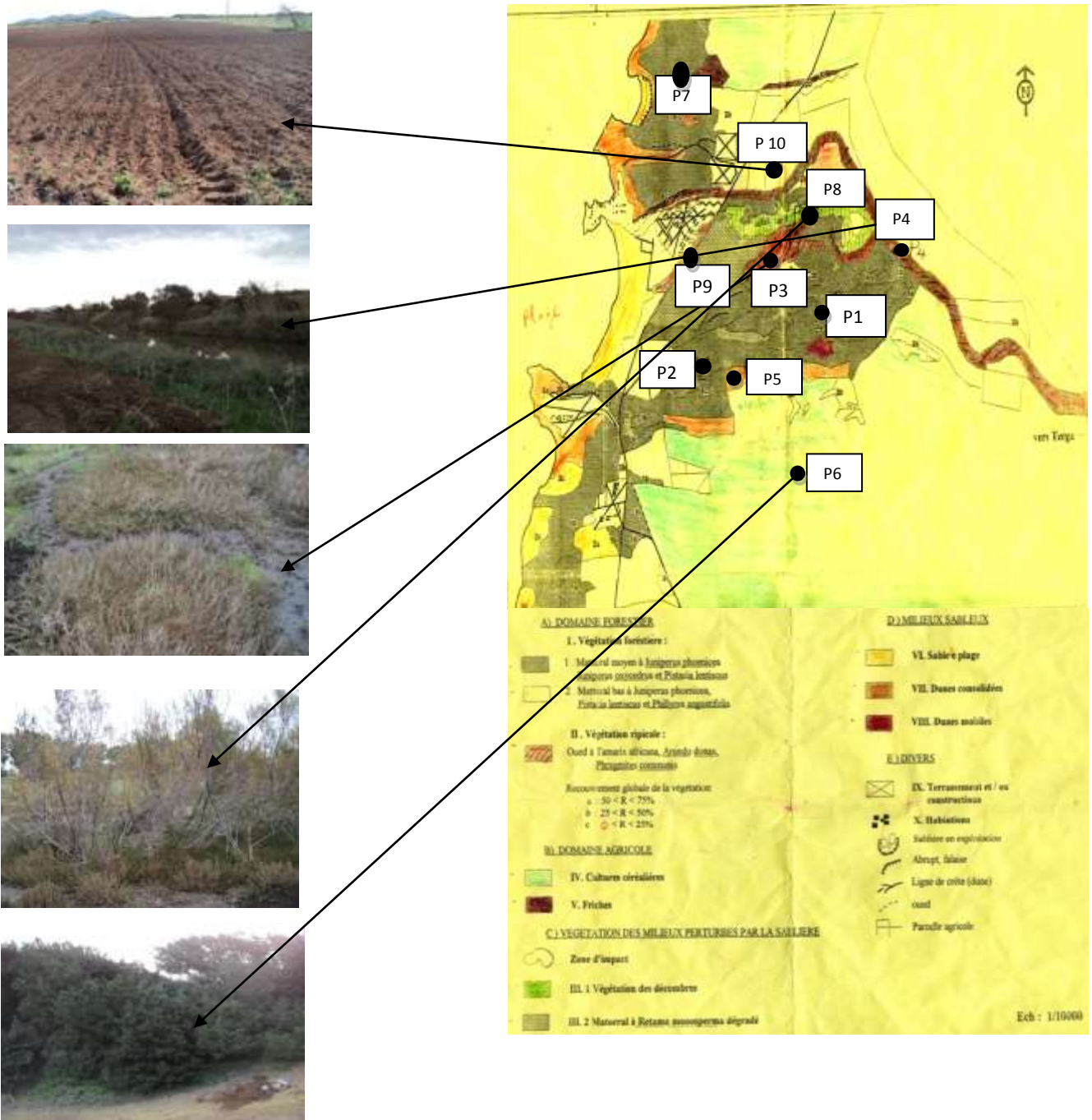


Figure 29 : Impact sur l'occupation des terres, ech : 1/10000 d'après LEM-Agence TAD

Selon les résultats obtenus on peut conclure que :

D'après Brady et Weil, 2008, les sols de la région sont modérément alcalins, sauf pour la station 1 et 3 qui sont neutres et la station 8 qui a un sol faiblement alcalin. La plupart des stations sont non salées sauf pour la station 4 qui est peu ou légèrement salée, les stations 8 et 3 sont extrêmement salées d'après Mathieu et al 2003.

Selon Loz et Mathieu, 1990, le sol de toutes les stations est modérément calcaire et le taux de calcaire actif est inférieure à 6 %, donc le risque de chlorose ferrique est écarté selon Masson ,2012

La matière organique est faible selon les normes de Hill Laboratories ., 2014 . Les teneurs sont très faibles, à faibles dans les stations 10,8 et 3.

Selon les normes de Horneck et al ., 2011, quatre stations enregistrent des taux faibles en potassium assimilable qui sont : 5,1,7 et 9 contrairement au stations 2,3,4,6,8,10 qui enregistrent des taux élevés en potassium assimilable.

Selon les normes d'AgSource Laboratories ,2013, on enregistre des taux faibles en phosphore assimilable dans les stations 6,5,7 et 9 .Des taux adéquats dans les stations 4,2,3 et 1.Des taux élevés dans les stations 8 et 10.

Selon Hazelton et Murphy, 2007. Le sol de la sablière est soit très faible en azote total ce qui est représenté par les stations 2, 5,1 et 9. Soit il est, faible (Les stations 3,4 ,6 et 10) ou bien il est adéquat (La station 8)

Concernant le sodium échangeable et Selon Hazelton et Murphy, 2007. On enregistre, des taux faibles dans les stations 5,1 et 9, un taux moyen dans la station 7, un taux élevé dans la station 10 et des taux très élevés dans les stations 4, 2, 6,8 et 3.

Les teneurs en magnésium échangeable sont faibles dans les stations 1,5, 9 ; moyennes dans les stations 10 et 7 ; élevées dans les stations 4,2 et 6 et très élevées dans les stations 8 et 3 selon Hazelton et Murphy, 2007.

Concernant la texture des différentes stations et selon le triangle de texture USDA d'après Giasson et Jaouich , 2008, nous pouvons conclure que, le sol de la sablière est hétérogène : La station 4 et la station 1 présentent un sol sable loameux , sable pour la station 10,5,7 et 9,loam pour la station 6 et 3 et loam argileux pour la station 2 et 7.

Chapitre 2. Matériels

1. Le dispositif expérimental

Le site de re-végétalisation expérimentale de l'ancienne carrière renferme 4 blocs, comprenant chacun 10 parcelles : Parcelle sans *Acacia saligna*, Parcelle Témoin avec *Acacia Saligna*, Parcelle à *Acacia saligna* avec une simple inoculation de souche rhizobienne S10, Parcelle à *Acacia saligna* avec la souche rhizobienne S14, Parcelle à *Acacia saligna* avec la souche rhizobienne S24, Parcelle à *Acacia saligna* avec une double inoculation de souche rhizobienne S10 + Mycorhize, Parcelle à *Acacia saligna* avec la souche rhizobienne S14 + Mycorhize, Parcelle à *Acacia saligna* avec la souche rhizobienne S24 + Mycorhize, Parcelle à *Acacia saligna* avec une inoculation mixte (S10 + S14 + S24 + Mycorhize) (Figure 30).

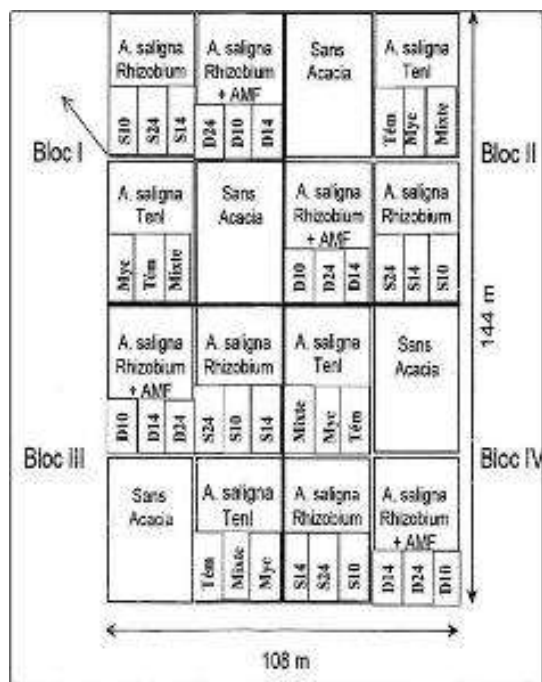


Figure 30 : Dispositif des parcelles d'expérimentation, en blocs complets à randomisation totale

2. Matériels biologiques et les inoculas microbiens utilisés

2.1 . Les souches Rhizobiennes et la préparation de l'inoculum rhizobien

Les souches bactériennes, ont été isolées à partir de nodules d'*Acacia saligna*, de 6 arbres *in natura*, dans la région de Terga. Chaque nodule a été lavé successivement avec de

l'eau, désinfecté dans de l'hypochlorite de sodium à 12 % pendant 1 min, puis rincer 10 fois à l'eau distillée stérile. Les nodules ont été écrasés, sous des conditions aseptiques sur le milieu YEM. La purification des colonies, a été obtenue après une étude de leurs caractéristiques phénotypiques. Ensuite, les meilleures et les plus efficaces souches, ont été obtenues via le test de nodulation et du test des facteurs abiotiques (température, pH, salinité) (Mansouri, 2011).

Une colonie isolée, a été inoculée dans une fiole d'erlenmeyer de 500 ml, contenant 100 ml de bouillon de YEM, qui a été déjà stérilisé à 120 °C pendant 20 min (Vincent, 1970). Après 5-7 jours d'incubation, 100 ml de chaque inoculum contenant environ 30×10^8 bactéries / ml, ont été transférés dans une fiole d'erlenmeyer de 2 litres, remplie à 1 L pour permettre l'aération du milieu au cours de l'agitation (Mansouri, 2011).

2.2. Test de l'inoculation rhizobienne en pépinière

Les graines *Acacia saligna* ont été déjà scarifiées avec H_2SO_4 pendant 90 min. après qu'ils ont été rincées avec de l'eau distillée stérile et ensuite mises à germer dans de la gélose à 0,8 % d'eau (Tillard et Drevon., 1988). Après 6 jours, les graines ont été transplantées dans des sacs en plastique, puis transférées dans la pépinière. Le sol utilisé, était composé de 25 % de sable de la carrière et 75 % de tourbe (Mansouri, 2011). Chaque 5 ml d'une culture pure de rhizobiums, contenant environ 30×10^8 bactéries / ml ont été utilisées dans le sol au niveau du col, lors de la transplantation. Une semaine après le semis, les plantules ont reçu une seconde inoculation (Diouf et al, 2003; Mansouri, 2011).

2.3. Préparation de l'inoculum mycorhizien

Les racines fraîches d'*Acacia saligna*, ont été recueillies à partir de 7 arbres d'*Acacia salina* dans la ville de Terga et 7 autres arbres dans la ville d'Oran. Sur chaque site (Terga et Oran), des échantillons de racines fines ont été retirées du système racinaire, ils ont été bien lavées, immergées dans une solution de KOH à 20 % pendant 20 minutes à 90 ° C. Ensuite, ils ont été rincées à fond avec de l'eau et trempées dans une solution à 1 % d'HCl pendant 5 minutes. Les racines, ont été ensuite colorées dans une solution de 0,1 % de bleu trypan, dans du lactophenol pendant 20 minutes (Philipps et Hayman, 1970). Environ 50 fragments de racines ainsi traitées, ont été coupées en morceaux d'environ 1 cm de longueur. Les fragments ont été observés au microscope photonique 10 x 40, afin d'estimer la fréquence endomycorhizal (Mansouri, 2011).



1. Les plantules le jour de
Plantation (T0)



2. *Acacia Saligna* après 3 mois de
Plantation (T1)



3. *Acacia Saligna* après 6 mois de
plantation (T2)



4. *Acacia Saligna* après 9 mois de
Plantation (T3)



5. *Acacia Saligna* après 12 mois de
Plantation (T4)



6. *Acacia Saligna* après 15 mois de
Plantation (T5)



7. *Acacia Saligna* après 18 mois de
Plantation (T6)

Figure 31 : Les sites de re-végétalisation à différent temps après plantation
T0, T1, T2, T3, T4, T5 et T6

2.4. Test de l'inoculation mycorhizienne en pépinière

Les racines mycorhizées dont le taux de fréquence est de 100 % ont été utilisées. Environ, 1 g de racines fraîches endomycorhiziens a été utilisé contre chacun des systèmes de racine, au moment de la transplantation des plantules (Mansouri, 2011). Après 8 mois d'entreposage dans la pépinière, les plantules ont été transférées au site (Mansouri, 2011).

3. Echantillonnage du sol

L'échantillonnage en site de re-végétalisation est un composite de sol, réalisé dans chaque parcelle en diagonale sur une profondeur de 10 cm et un diamètre de 30 cm de la plante, à différents trimestre T1 (3 mois), T2 (6 mois), T3 (9 mois), T4 (12 mois), T5 (15 mois) et T6 (18 mois) (Figure 31). Le sol est séché à l'air libre pendant une semaine, broyé et tamisé (diamètre de 2 mm) pour obtenir la fraction de terre fine afin d'effectuer une série d'analyses de caractérisation physico-chimiques.

Chapitre 3.Méthodologie

1. Analyses physiques

1.1. Mesure de pH

Peser 20 g de sol, y ajouter 50 ml d'eau distillée bouillie puis brasser énergiquement. Abandonner le contenu pendant 2 heures .Procéder à l'étalonnage du pH mètre, puis remettre le contenu en suspension à l'aide d'un agitateur .Faire la lecture du pH enfin rincer l'électrode avec de l'eau distillée puis l'essuyer avec du papier Joseph (Aubert, 1978).

1.2 Mesure de la salinité

1.2.1. Principe

À partir d'une solution d'extraction aqueuse et en fonction de la concentration des électrolytes, on détermine la conductivité électrique (Aubert, 1978).

1.2.2. Protocole

Peser 10g de sol, y ajouter 50 ml d'eau distillée et agiter durant quelques minutes, à l'aide d'un agitateur magnétique. Chauffer la solution à 25 °C et lire la valeur C_T , puis chauffer la solution à 35 °C et lire la valeur $C_{T'}$. Calculer le coefficient de Température β comme étant :

$$\beta = (C_{T'} - C_T)/(T' - T) \times C_T \times 100$$

Régler ensuite le conductimètre à la valeur β et lire la conductivité CE (Aubert, 1978).

1.3. La granulométrie (Pipette ROBINSON-KÖHN)

1.3.1. Principe

L'analyse granulométrique, a pour but de déterminer les pourcentages des différentes fractions des particules minérales, qui constituent les agrégats. Cette méthode est basée sur la destruction de la matière organique, puis la dispersion des particules et enfin la réalisation des prélèvements, selon la loi de sédimentation des particules dans un liquide (la loi de STOKES) (Aubert, 1978).

1.3.2. Protocole

Mettre 20 g de sol dans un bécher de 600 ml, y ajouter 50 ml d'eau oxygénée 20 volumes et recouvrir, puis mettre le tout dans un bain de sable, dont la température ne dépasse

pas 85°C .Après la fin de l'effervescence, chauffer encore 2 heures environ pour éliminer l'eau oxygénée en excès, s'assurer que toute l'eau oxygénée a disparue, par l'ajout de permanganate de potassium qui se décolore en présence d'eau oxygénée. Transvaser à l'aide d'un jet de pissette, le contenu du bécher dans un flacon de sédimentation jaugé à 1000 ml. Ensuite, verser dans le flacon 10 ml d'hexamétaphosphate de sodium et compléter avec de l'eau distillée, jusqu'au trait de jauge 1000 ml. Après, agiter le flacon durant 1 heure sur l'agitateur mécanique. Enfin, porter le flacon à proximité de la pipette de Robinson, pour permettre d'effectuer les prélèvements (Aubert, 1978).

1.3.2.1.Prélèvement des argiles, des limons fins et des limons grossiers (particules<50µm)

Maintenir la température à 20 °C, agiter immédiatement et violemment par retournements répétées, de manière à mettre en suspension toute la terre. Poser très rapidement le flacon et prélever au bout de 46 secondes et à 10 cm de profondeur 10 ml du liquide .Porter la capsule dans une étuve à dessiccation à température 105°C, après évaporation totale peser la capsule et son contenu sec et par différence avec le poids de la capsule vide, déterminer le poids P1 de sédiment(Argile+limons fin +limons grossiers+ hexamétaphosphates) contenu dans 10 ml de suspension (Aubert, 1978).

1.3.2. 2. Prélèvement des argiles et des limons fins (particules <20µm)

Après agitation violente et retournement du liquide laisser déposer durant 4 minutes et 48 secondes puis effectuer un prélèvement de 10 ml à une profondeur de 10 cm dès que le temps de sédimentation s'est écoulé, ensuite transvaser le prélèvement dans une capsule en verre et faire évaporer puis peser la capsule et son contenu sec. Enfin, déterminer le poids P2 de sédiments (argile+limons fins+ hexamétaphosphate) contenu dans 10 ml de suspension. (Aubert, 1978).

1.3.2. 3.Prélèvement des argiles (particules <2µm)

Agiter et retourne,r puis poser le flacon et laisser sédimenter au moins 6 heures. Au bout de 6h, 7h, ou 8 heures, on peut effectuer un prélèvement de 1 ml à une profondeur qui dépend de la suspension et du temps du sédimentation. Ensuite, peser comme précédemment P3 (Argile+hexamétaphosphate), dans 10 ml de suspension. (Aubert, 1978).

2. Analyse chimique

2.1. Mesure de la matière organique par calcination

2.1.1.Principe

La perte au feu, fournit une mesure directe de la matière organique dans le sol. Placer les échantillons pendant une nuit (16 heures) dans un four à moufle à 375 ° C. La perte de poids après calcination, nous donne la matière organique. Évitez les températures plus élevées, car les carbonates présentes dans la répartition du sol, peuvent augmenter la teneur en matière organique (Centre d'expertise en analyse Environnementale du Québec, 2003).

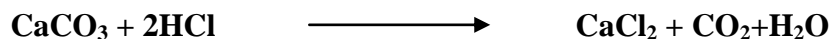
2.1.2.Protocole

Sécher l'échantillon du sol la nuit (16 heures) à 150 ° C; nettoyer le creuset en chauffant au rouge, puis refroidir dans un dessiccateur pendant 10 minutes. Prenez le poids du creuset vide, y ajouter 10 g de sol séché et enregistrer le poids final. Ensuite, calciner le sol dans un four à moufle à 375 ° C pendant 16 heures. Refroidir dans un dessiccateur et peser le creuset contenant les cendres (Centre d'expertise en analyse Environnementale du Québec, 2003).

2.2.Mesure du calcaire total par le calcimètre de Bernard

2.2.1.Principe

La détermination du nombre total de CaCO₃ (%) est obtenue, en utilisant la méthode volumétrique à l'aide du calcimètre de Bernard, en décomposant le carbonate de calcium par l'acide chlorhydrique et en mesurant ainsi le volume de CO₂ dégagé. (Aubert, 1978).



Le volume dépend de la pression et de la température, la calibration du calcimètre est effectué avec du calcium pur (Aubert, 1978)

2.2.2.Protocole

Peser 1 g de sol, puis introduire 5 ml de HCl ½ dans le doigt du calcimètre de Bernard, introduire ensuite la quantité du sol pesé dans la fiole du calcimètre en l'humidifiant

un petit peu. Fermez le flacon en le raccordant au calcimètre et s'assurer que le liquide est bien au zéro, après mettre en contact le HCl et le sol tout en agitant énergiquement la fiole, le résultat de cette agitation est le dégagement du CO₂. Lorsque le niveau du liquide est stable faire la lecture du volume de CO₂ dégagé. Calibrer le calcimètre avec du CaCO₃ pur anhydre (Aubert, 1978)

2.3. Mesure du calcaire actif par la méthode de Drouineau – Galet

2.3.1.Principe

CaCO₃ actif (%) est déterminé par la méthode DROUINEAU – GALET, en utilisant l'oxalate d'ammonium qui se combine au calcium du calcaire actif, pour former des oxalates de calcium insolubles. L'excès d'oxalate d'ammonium est ensuite dosé, par une solution de permanganate de potassium en milieu sulfurique (Aubert, 1978).



2.3.2. Protocole

Peser 10 g de sol, y ajouter 250 ml d'oxalate d'ammonium 0,2 N, puis remuer pendant 2 heures et filtrer la suspension. Dans un bécher de 100 ml, verser 10 ml du filtrat, y ajouter 10 ml de H₂SO₄ 1/10, porter le bêcheur à l'étuve à une température de 60 ° C, placer ensuite le bêcheur sur un agitateur magnétique surmonté d'une burette contenant une solution de permanganate de potassium N/10. Titrer le permanganate jusqu'à l'obtention d'une couleur rose persistante.

n est le nombre de ml de KMnO₄ versé .Titrer de la même manière 10 ml d'une solution d'oxalate d'ammonium, N est le nombre de ml de KMnO₄ versé pour le témoin (Aubert, 1978).

2.4. Mesure de l'azote total par la méthode Kjeldahl

2.4.1.Principe

Le sol est digéré par un acide fort tel l'acide sulfurique concentré, en présence d'un catalyseur, par conséquent l'amine de l'azote est transformé en ions d'ammonium, qui sont ensuite convertis en ammoniac gazeux qui est chauffé, distillé et piégés dans une solution, où

il redevient un ion ammonium. Le traitement final consiste à déterminer par titrage, la quantité d'ammoniac qui a été piégée (Blamir, 2003).

2.4.2.Protocole

Peser 1 g de sol, y ajouter 12 à 15 ml d'acide sulfurique concentré (H_2SO_4) , y ajouter sept grammes de sulfate de potassium , apporter la digestion à une " ébullition " (370 °C à 400 ° C) puis chauffer le mélange jusqu'à l'apparition des fumées blanches, poursuivre le chauffage pendant environ 60-90 minutes, après faire refroidir le ballon et y ajouter 250 ml d'eau (Blamir, 2003).

Élever le pH du mélange avec une solution de Na OH 45%. Les ions ammonium (NH_4^+) sont convertis en ammoniac (NH_3) qui est éliminé par distillation piégé, dans une solution particulière d'environ 15 ml de HCl dans 70 ml d'eau distillée. Enlever le ballon de piégeage et rincer le condenseur, avec de l'eau distillée afin de dissoudre tout l'ammoniac, puis ajouter un indicateur coloré à la solution de piégeage. Mettre une solution titrée de NaOH (hydroxyde de sodium) dans la burette et titrer la solution de piégeage, avec la solution d'hydroxyde de sodium, ce qui indique alors le " point final ", qui montre que tout l'acide a été neutralisé par la base. Enfin, noter le volume de la base de neutralisation (solution d'hydroxyde de sodium), qui a été nécessaire pour atteindre le point final (Blamir, 2003).

2.5. Mesure du phosphore assimilable par la méthode d'Olsen

2.5.1.Principe

Le phosphore est extrait avec une solution d'hydrogénocarbonate de sodium à pH = 8,5. La solution alcaline d'hydrogène, peut abaisser la concentration des ions calciums par précipitation, sous forme de carbonate de calcium et les ions aluminium et ferriques par précipitation sous forme d'hydroxyde. La concentration des ions phosphates augmente en conséquence et le phosphore "assimilé" est extrait de l'échantillon de sol, par la solution d'hydrogénocarbonate de sodium, puis une filtration est effectuée (Hodjes, 2000).

2.5.2. Réactifs utilisés

Solution d'extraction (0,5 M $NaHCO_3$, pH 8,5) : dissoudre 420 g bicarbonate de sodium ($NaHCO_3$), dans de l'eau distillée et ajuster jusqu'au volume final de 10 L. Utiliser un

agitateur magnétique ou un mélangeur électrique pour dissoudre le NaHCO_3 . Ajuster le pH de la solution à 8,5 avec de l'hydroxyde de sodium à 50% (Hodjes, 2000).

2.5.3. Protocole

Peser 1 g de sol dans un Erlenmeyer de 50 ml, y ajouter 20 ml de solution d'extraction et agiter à 200 rpm ou plus pendant 30 minutes à une température ambiante de 24° à 27° C, si la solution n'est pas incolore on peut ajouter 1 cm³ (~200 mg) de charbon de bois, filtrer l'extraits avec du papier Whatman n° 42 ou par un papier similaire, refiltrer si les extraits ne sont pas claires. Analyser P par colorimétrie ou spectroscopie d'émission atomique avec plasma couplé par induction (ICP) en préparant le blanc et les standards préparé dans la solution d'extraction (Hodges, 2000)

2.6. Mesure des cations échangeables

2.6.1. Méthode d'extraction des cations

2.6.1.1. Principe

Le déplacement des cations se fait par percolation d'une solution normale et neutre d'acétate d'ammonium.

2.6.1.2. Protocole

Peser 10g de sol et verser la prise d'essai dans un tube à percolation, en mélangeant la terre à une quantité définie de sable quartzeux. Remplir l'ampoule surmontant le tube à percolation, de 500 ml d'acétate d'ammonium (77,08g/l) et raccorder l'ampoule au tube à percolation. Faire couler de la solution d'extraction, jusqu'à ce que la colonne de terre baigne entièrement dans le liquide. Laisser macérer durant une nuit au moins. Après, ouvrir le robinet de l'ampoule et l'orifice d'écoulement du tube à percolation, de manière que le débit soit de l'ordre de 10 gouttes par minute, Pour que la percolation se fasse durant 8 heures environ. Recueillir le percolât dans une fiole jaugée de 500 ml. A la fin de la percolation, compléter à 500 ml, avec la solution d'acétate d'ammonium. Homogénéiser et transvaser dans un flacon en plastique à fermeture thermique. Effectuer le témoin dans les mêmes conditions (Aubert, 1978).

2.6.2. Dosage du calcium et du magnésium par la méthode spectrophotométrique d'absorption atomique :

a. Dosage du calcium

- *Solution étalon de calcium (1000ppm)*

Dans une fiole jaugée de 500 ml, dissoudre 1,248 g de carbonate de calcium anhydre pur dans 25 ml d'acide chlorhydrique 1 N. Agiter pour accélérer la dissolution et compléter à 500 ml avec de l'eau distillée (Aubert ,1978).

- *Solution étalon de lanthane*

Dans une fiole jaugée de 500 ml, verser 87 g de chlorure de lanthane pur, sans traces de calcium et 100 ml d'acide nitrique 1 N. Compléter à 500 ml avec de l'eau distillée (Aubert ,1978).

- *Solution intermédiaire de Ca^{+2} (40 ppm)*

Dans une fiole jaugée de 500 ml, verser 20 ml de solution étalon de Ca^{+2} (1000ppm) et compléter à 500 ml avec de l'eau distillée (Aubert ,1978).

- *Game d'étalonnage :*

Etablir une gamme d'étalonnage, allant de 0, 4, 8, 12, 16 et 20 ppm à partir des solutions de Ca^{+2} (40 ppm) et solution étalon de lanthane (65000ppm) (Aubert ,1978).

- *Solution d'extraction*

Diluer la solution d'extraction, de manière à obtenir une concentration inférieure à 20 ppm .Au cours de la dilution, ajouter de la solution de lanthane à 65 000 ppm, en respectant les proportions utilisées au cours de l'établissement de la gamme (1/10 du volume de solution dosée) (Aubert ,1978).

b. Dosage du magnésium

- *Solution étalon de magnésium (5000ppm)*

Dans un ballon en pyrex de 100 ml, dissoudre 4,145g d'oxyde de magnésium anhydre, dans 45 ml d'acide chlorhydrique 5 N, chauffer le ballon pour accélérer la dissolution et laisser refroidir. Transvaser le contenu du ballon dans une fiole jaugée de 500 ml. Enfin, compléter à 500 ml avec de l'eau distillée (Aubert ,1978).

- *Solution de magnésium (20 ppm)*

Verser dans une fiole jaugée de 500 ml, 2 ml de solution mère à 5000 ppm et compléter à 500 ml avec de l'eau distillée (Aubert ,1978).

- *Préparation de la gamme pour étalonnage :*

Préparer des solutions à 1, 2, 3, 4 et 5 ppm, à partir des solutions de magnésium 20 ppm. Compléter chaque fiole à 100 ml avec de l'eau distillée. (Aubert ,1978).

2.6.3. Dosage du potassium et du sodium par spectrophotométrie d'émission

a. Dosage du sodium

- *Solution mère (5000 ppm)*

Dissoudre 6,353 g de NaCl dans 200 ml d'eau distillée, compléter à 500 ml avec de l'eau distillée. (Aubert ,1978).

- *Solution intermédiaire (20 ppm)*

Verser dans une fiole jaugée de 500 ml, 2 ml de la solution mère et compléter à 500 ml avec de l'eau distillée (Aubert ,1978).

- *Gamme de solution pour étalonnage :*

Utiliser des fioles jaugées de 100 ml et établir des gammes de solution, allant de 0, 1, 2, 3, 4 et 5 ppm, à partir de la solution intermédiaire (20 ppm) (Aubert ,1978).

b. Dosage du potassium

- *Solution mère (5000 ppm)*

Dissoudre dans une fiole jaugée de 500 ml, 4,755 g de KCl dans 200 ml d'eau distillée et compléter à 500 ml avec de l'eau distillée (Aubert ,1978).

- *Solution intermédiaire (50 ppm)*

Verser 5 ml de solution mère 5000 ppm dans une fiole jaugé de 500 ml et compléter avec de l'eau distillée à 500 ml (Aubert ,1978).

- *Gamme pour solution pour étalonnage*

Etablir une gamme d'étalonnage, allant de 0, 2, 4, 6 ppm, à partir de la solution intermédiaire 50 ppm (Aubert ,1978).

3. Analyse statistique

Les résultats obtenus sont traités statistiquement en analysant la variance à l'aide du test Fisher à $p=0,05$, en utilisant le logiciel SPSS 8,0 .

Partie III

Résultats et discussion

Partie III-Résultats et discussion

1. Les résultats synthétiques et leurs significations

1.1. pH du sol

La figure 32 montre, d'après Brady et Weil, 2008 que le sol des différentes parcelles est généralement modérément alcalin. On enregistre, au niveau des parcelles nues, une augmentation non significative dans les teneurs du pH aux trois premiers trimestres (T1, T2, T3) où on enregistre respectivement les valeurs suivantes (8,12), (8,23), (8,29). Ces valeurs croissantes au cours du temps, représente le pH en période d'été (T1) qui est inférieure à celle enregistrée en automne (T2) et qui est à son tour inférieure à celle enregistrée en période d'hivers (T3). Contrairement aux parcelles nues, les parcelles revégétalisées connaissent une diminution de pH à T3. Toutefois, le taux de pH dans toutes les parcelles augmente à T4 en période de Printemps, puis diminue à T5 en période d'été et accroît à nouveau à T6 en période d'automne.

On enregistre, une diminution significative ($p < 0,05$) à T3 dans les parcelles D10 (8,05) et D14 (8,09) par rapport aux parcelles nues (8,29). Une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles témoins à T2 (8,37), T4 (8,63) et T6 (8,49) par rapport à T1 (8,04) et T5 (8,01) et à T4 (8,63) et T6 (8,49) par rapport à T3 (8,18), une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles sans acacia, à T4 (8,63) et T6 (8,49) par rapport à T1 (8,37) et T5 (8,01), une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles S10 à T3 (8,18) par rapport à T5 (8,01), à T4 (8,46) et T6 (8,54) par rapport à T1 (8,09), T3 (8,11) et T5 (8,10) et à T6 (8,54) par rapport à T2 (8,23). Dans les parcelles S14 on enregistre une augmentation significative ($p < 0,05$) à T2 (8,46), T4 (8,54), T6 (8,45) par rapport à T1 (7,99), T3 (8,13) et T5 (7,91). On enregistre également, une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles S24 à T1 (8,16), T2 (8,28), T3 (8,23), T4 (8,56), T6 (8,5) par rapport à T5 (7,7), une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles Myc à T4 (8,47) et T6 (8,55) par rapport à T1 (8,29) et T5 (8,02), une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles D10 à T2 (8,52), T4 (8,52) et T6 (8,50) par rapport à T1 (8,06), T3 (8,03) et T5 (7,94), une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles D14 à T2 (8,43), T4 (8,5), T6 (8,54) par rapport à T1 (8,04) et T5 (8,05), une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles D24 à T4 (8,5) et T6 (8,54) par rapport à T3 (8,09) et à T2 (8,65), T4 (8,57) et T6 (8,46) par rapport à T1 (7,97), T3 (8,13) et T5 (8,01). Dans parcelles Mixte, on enregistre une

augmentation significative ($p < 0,05$) à T4 (8,46) et T6 (8,52) par rapport à T1(8,01) et à T6 (8,52) par rapport à T5(8,05)

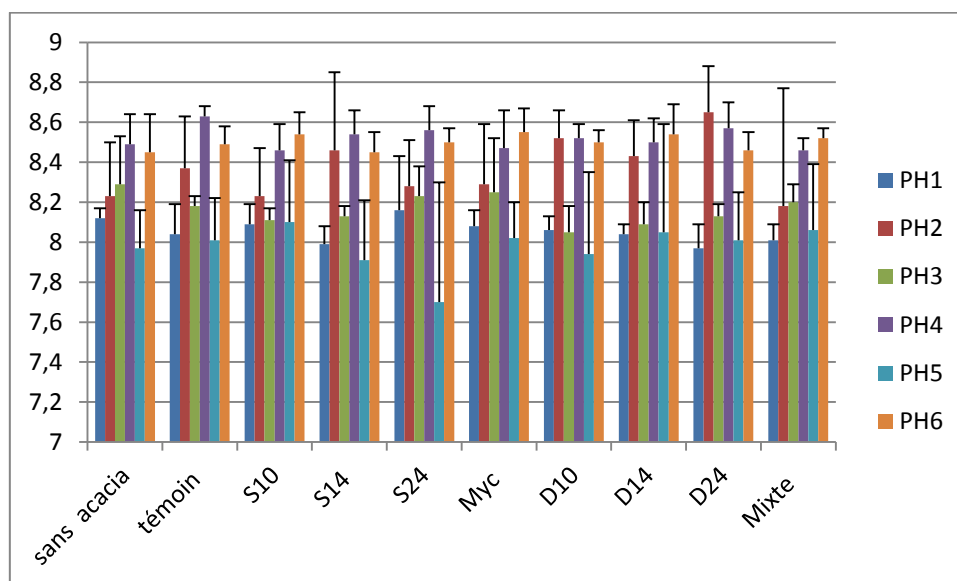


Figure 32 : Variation des teneurs en pH des sols au cours du temps T1, T2, T3, T4, T5 et T6

1.2. La salinité du sol

D'après la figure 33, nous pouvons considérer selon Mathieu et al 2003, que notre sol est non salé, étant donné que sa conductivité électrique d'extrait aqueux 1/5 est inférieure à 0,6 ds/m, à l'exception des parcelles D24 et à T4 il est peu salé où la conductivité électrique à une valeur de 0,614 ds/m.

On enregistre une augmentation significative ($p < 0,05$) à T3 dans les parcelles S24 (0,174 ds/m) par rapport aux parcelles témoins (0,125 ds/m) et une augmentation significative ($p < 0,05$) à T4 dans les parcelles D24 (0,614 ds/m) par rapport aux parcelles sans acacia (0,155 ds/m), une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles nues à T5 (0,506 ds/m) par rapport aux T1 (0,115 ds/m), T2 (0,157 ds/m), T3 (0,173 ds/m), T4 (0,155 ds/m), une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles S14 à T6 (0,312 ds/m) par rapport à T1 (0,152 ds/m), T2 (0,137 ds/m), T3 (0,134 ds/m), T4 (0,166 ds/m), une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles S24 à T6 (0,297 ds/m) par rapport à T2 (0,135 ds/m) et une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles Myc à T6 (0,318 ds/m) par rapport à T2 (0,130 ds/m), une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles D10 à T6 (0,352 ds/m) par rapport T1 (0,155 ds/m), T2 (0,125 ds/m), T3

(0,132ds/m) ,T4 (0,199 ds/m) et T5(0,144 ds/m), une augmentation significative ($p<0,05$) à T4 (0,199 ds/m) et T6 (0,352 ds/m) par rapport à T2 (0,125 ds/m), une augmentation significative ($p<0,05$) dans les parcelles D14 à T6 (0,372 ds/m) par rapport à T1 (0,152 ds/m) , T2 (0,125 ds/m), T3(0,167 ds/m), T4 (0,212 ds/m) et T5 (0,208 ds/m) , une augmentation significative ($p<0,05$) dans les parcelles mixtes à T6 (0,332 ds/m) par rapport T1(0,13 ds/m),T2 (0,144 ds/m),T3(0,123 ds/m) ,T4 (0,194 ds/m) ,T5(0,183 ds/m)

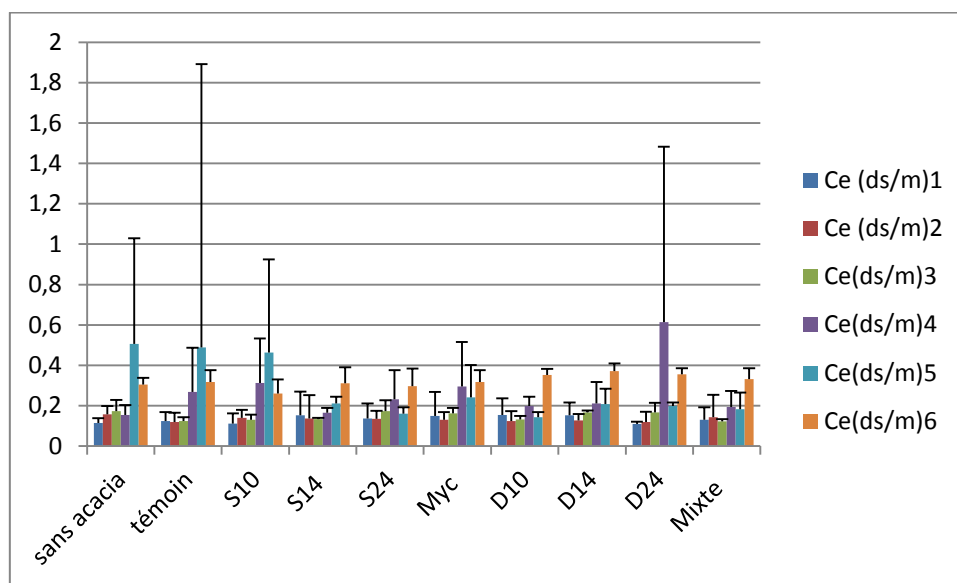


Figure 33 Variation de la salinité des sols au cours du temps T1, T2, T3, T4, T5, T6

D'après la figure 34, les valeurs du sodium échangeable enregistrées à différents temps d'après Hazelton et Murphy, 2007 sont représenté soit par des taux faibles (entre 0.1 – 0,3), soit par des taux moyenne (entre 0,3–0,7 meq/100g) soit par des taux élevé (0,7-2,0 meq/100g) ou encore par des taux extrêmement élevé (> 2)

On enregistre à T5 une diminution significative ($p<0,05$) dans les parcelles S24 (0,3 meq/100g),D10 (0,21 meq/100g),D14(4,21 meq/100g) et D24 (2,27 meq/100g) par rapport aux parcelles sans acacia (4,34 meq/100g).Cependant, on enregistre à T6 une diminution significative ($p<0,05$) dans les parcelles D10 (0,37 meq/100g) , D14 (0,38 meq/100g) et D24 (0,29 meq/100g) par rapport aux parcelles sans acacia (0,44 meq/100g).Dans les parcelles D10,on enregistre une augmentation significative ($p<0,05$) à T1 (1,16 meq/100g) et T2 (1,13 meq/100g) par rapport à T4 (0,53 meq/100g), T5 (0,21 meq/100g) et T6 (0,37 meq/100g) , une augmentation significative ($p<0,05$) dans les parcelles D14 à T1(1,08 meq/100g) et T2

(0,88 meq/100g) par rapport à T4 (0,53 meq/100g) et T6 (0,37 meq/100g) , une augmentation significative ($p < 0,05$) à T5 (4,21 meq/100g) par rapport à T1(1,08 meq/100g) et T2 (0,88 meq/100g),une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles à T1 (0,9 meq/100g) et T2 (1,02 meq/100g) par rapport à T4 (0,24 meq/100g) et T6 (0,38 meq/100g) et T5 (2,27 meq/100g) par rapport à T2 (1,02 meq/100g).

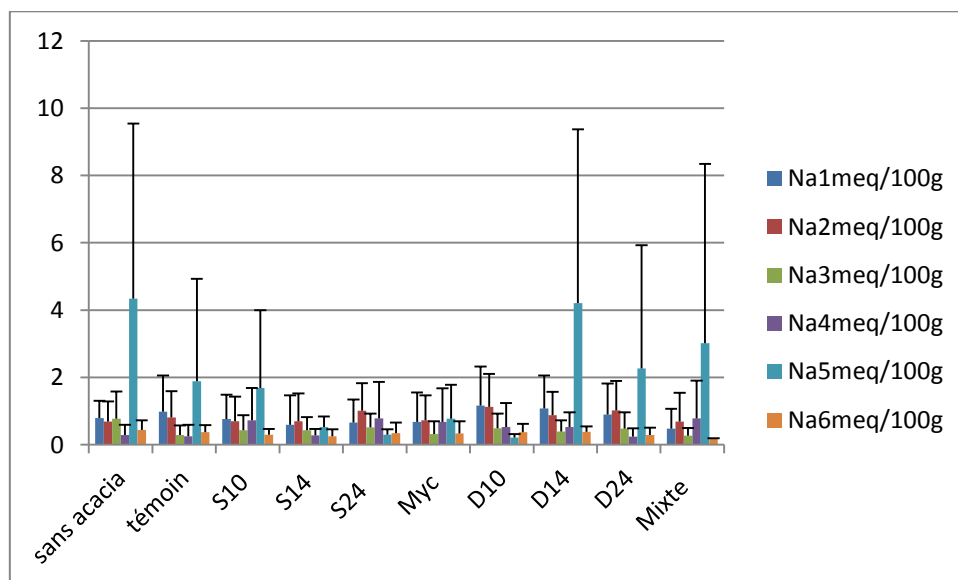


Figure 34 : Variation de la teneur du sodium échangeable des sols au cours du temps T1, T2, T3, T4, T5, T6

1.3 .Le potassium assimilable

D’après la figure 35, on constate en général que notre sol s’enrichit en potassium au fur et à mesure que le temps s’écoule , en particulier à T5 où on assiste à des valeurs de potassium qui dépassent les 250 ppm , ce qui indique d’après Horneck et al ., 2011 , que notre sol est bien pourvue en potassium dans toutes les parcelles excepte les parcelles D10 dont le taux de potassium est faible (143,59 ppm).

On remarque aussi qu’au trois premiers trimestres, les teneurs en potassium accroissent à T3 dans toutes les parcelles sauf dans les parcelles sans acacia (136,75 ppm) , témoin (134,32 ppm) , Myc (106,67 ppm) et D14 (127,523 ppm) .Toutefois, elles décroissent à T4 et augmentent à nouveau à T5 dans toutes les parcelles .Cependant à T6,on assiste à une baisse dans ces teneurs dont la totalité des parcelles est représentée par des taux moyens en potassium entre 150 meq/100g d’après Horneck et al ., 2011 .Toutefois , les parcelles sans acacia (141,73 ppm) et mixte (109,48 ppm) sont marquées par des taux faibles et les parcelles

D10 sont marquées par un taux riche en potassium (263,92 ppm) d'après Horneck et al., 2011.

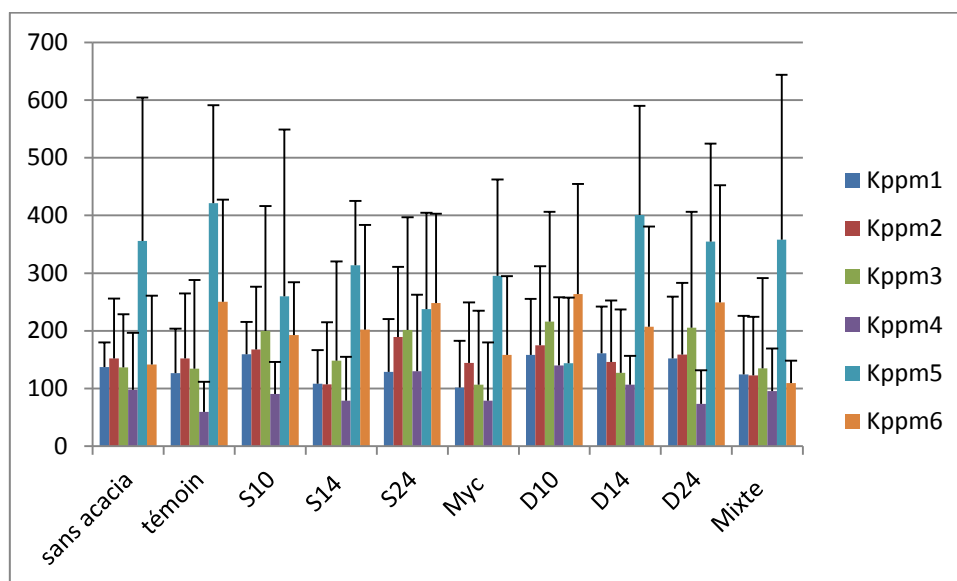


Figure 35 : Variation des teneurs en potassium assimilable des sols au cours du temps T1, T2, T3, T4, T5, T6

1.4 .Le magnésium échangeable

En vue globale et dans toutes les parcelles, notre sol est représenté au cours du temps par des taux modérés en magnésium échangeables (Figure 36), d'après Hazelton et Murphy, 2007 (entre 1 – 3 meq/100g). Tandis que, à T5 les parcelles : sans acacia (5,84 meq/100g), témoin (3,34 meq/100g), D14 (7,39 meq/100g), D24 (3,44 meq/100g), Mixte (3,56 meq/100g) enregistrent des taux élevés en magnésium échangeable (entre 3 – 8 meq/100g) et à T6 dans les parcelles Mixte il est déficient (0,56 meq/100g).

On note à T5, une diminution significative ($p < 0,05$) dans les parcelles D10 (1,21 meq/100g) par rapport aux parcelles sans acacia (5,84 meq/100g). Dans les parcelles sans acacia on enregistre une augmentation significative ($p < 0,05$) à T5 (5,84 meq/100g) par rapport à T4 (1,35 meq/100g), une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles D14 à T5 (7,39 meq/100g) par rapport à T1 (2,56 meq/100g), T2 (2,23 meq/100g), T3 (2,19 meq/100g), T4 (1,78 meq/100g) et T6 (1,92 meq/100g) et une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles mixte à T5 (3,56 meq/100g) par rapport à T6 (0,56 meq/100g).

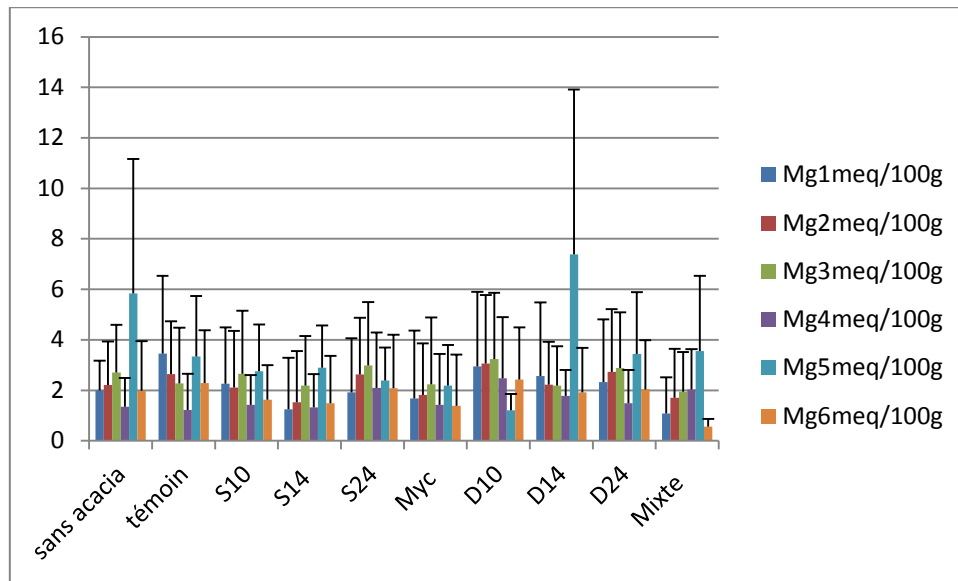


Figure 36 : Variation des teneurs en magnésium échangeable des sols au cours du temps T1, T2, T3, T4, T5, T6

1.5 . Le calcaire total, le calcaire actif et le calcium échangeable

Les sols sont modérément calcaires d’après Loz et Mathieu, 1990 ces teneurs se trouvent entre 10% et 25% (figure 37)

On enregistre, une diminution significative ($p < 0,05$) à T2 dans parcelles S14 (15,32%) par rapport aux parcelles sans acacia (18,55 %). On enregistre également une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles témoin, sans acacia, S10, S14, Myc ,D14 et mixte à T2, T3, T4, T5 et T6 par rapport à T1.

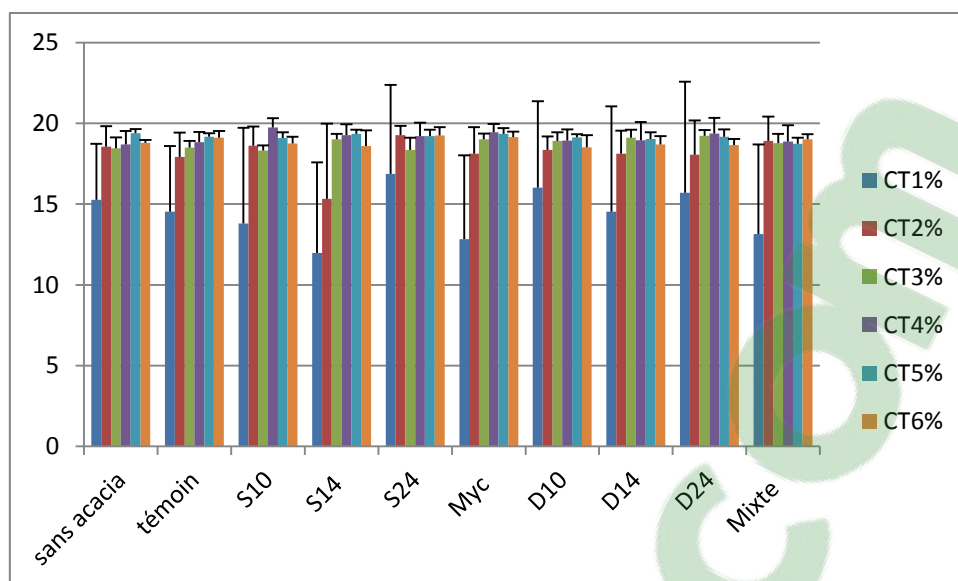


Figure 37 : Variation des teneurs en calcaire total des sols au cours du temps T1, T2, T3, T4, T5, T6

On remarque qu'au cours du temps, le taux de calcaire actif $\geq 6\%$ qui est le seuil de l'indice de chlorose ferrique d'après Masson, 2012 (Figure 38)

On note, une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles sans acacia à T2 (10,74%) par rapport à T1 (3,93%)

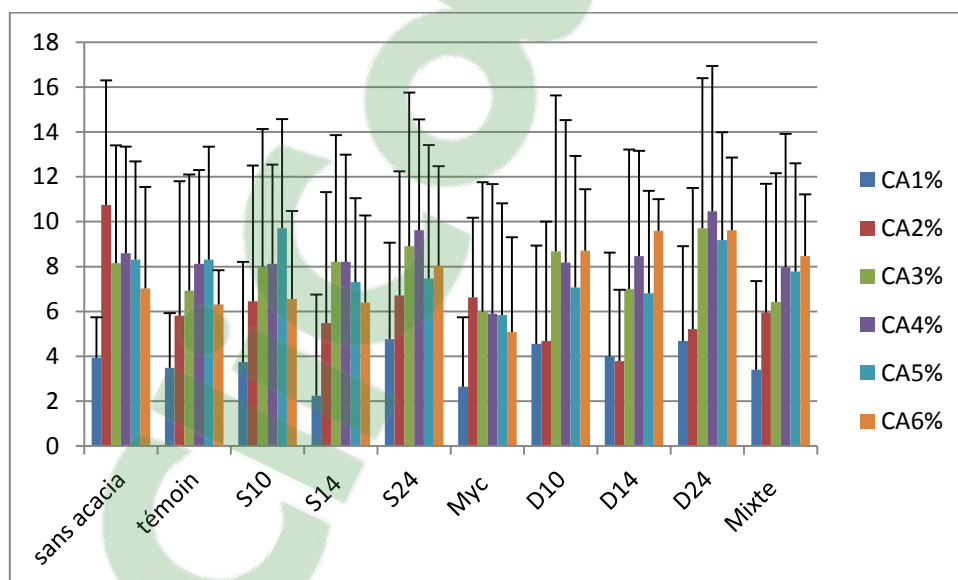


Figure 38 : Variation des teneurs calcaires actifs des sols au cours du temps T1, T2, T3, T4, T5, T6

Les teneurs en calcium échangeable sont élevées (10-20 meq/100g) à excessives

(> 20 meq/100g) d'après Hazelton and Murphy, 2007. (Figure 39)

On enregistre, à T2 une augmentation significativement ($p < 0,05$) dans parcelles D24 (88,98%) par rapport aux parcelles témoins (50,1 meq/100g) et sans acacia (50,23 meq/100g). On note aussi, une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles témoin et sans acacia à T2 rapport à T1, T3, T4 et T6, une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles témoin, à T2 (50,1 meq/100g) et T5 (40,43 meq/100g) par rapport à T4 (15,92 meq/100g), une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles S14, à T2 (63,63 meq/100g) par rapport à T1 (17,93 meq/100g), T3 (25,18 meq/100g), T4 (19,83 meq/100g), T5 (39,81 meq/100g) et T6 (25,35 meq/100g), une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles Myc à T2 (34,31 meq/100g) et T5 (34,47 meq/100g) par rapport à T1 (10,63 meq/100g), une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles D14 à T2 (49,67 meq/100g) par rapport à T3 (25,51 meq/100g) et T4 (20,34 meq/100g), une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles D24 à T2 (88,98 meq/100g) par rapport à T1 (24,75 meq/100g), T3 (27,16 meq/100g), T4 (12,99 meq/100g), T5 (33,59 meq/100g) et T6 (27,42 meq/100g) et une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles mixte à T5 (79,49 meq/100g) par rapport à T1 (20,03 meq/100g) et T4 (21,03 meq/100g)

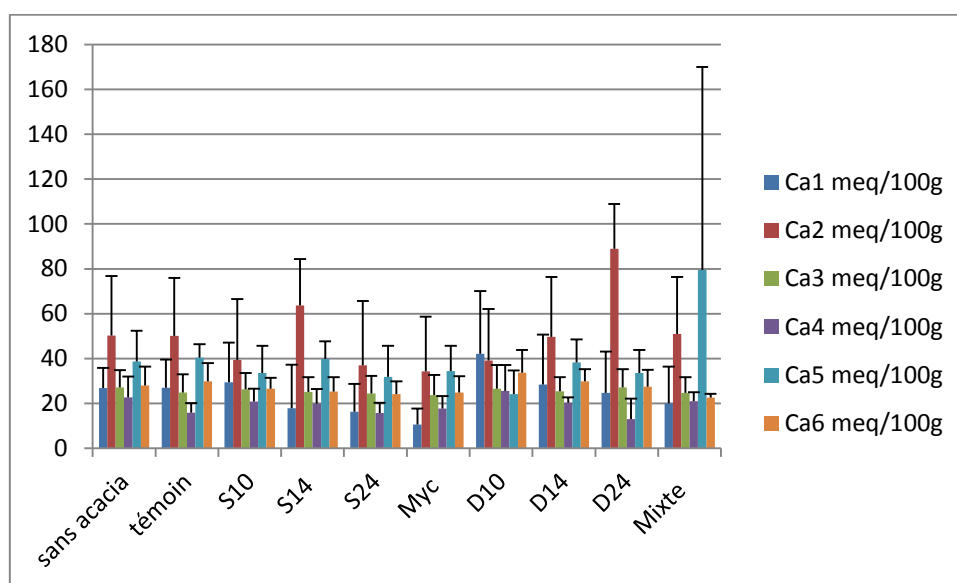


Figure 39 : Variation des teneurs calcium échangeable des sols au cours du temps T1, T2, T3, T4, T5, T6

1.6. Le phosphore assimilable

Le taux de phosphore assimilable évolue au fur et à mesure que le temps s'écoule. Cependant, il reste faible entre (1-9 ppm) selon AgSource Laboratories, 2013 (Figure 40). On remarque, en vue globale que les teneurs en phosphore chutent à T4 dans toutes les parcelles, puis augmentent à nouveau à T5. Toutefois, les teneurs les plus élevées, sont enregistrées dans les parcelles D14 à T5 (9,4 ppm) et dans les parcelles S10 à T6 (9,15 ppm)

On assiste à une augmentation significative ($p < 0,05$) du phosphore, dans les parcelles Myc à T2 (7,55 ppm) par rapport à T4 (3,1 ppm), Une augmentation significative dans les parcelles D10 à (8,2 ppm) par rapport à T4 (2,2 ppm), une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles D14 à T3 (7,67 ppm) par rapport à T4 (2,6 ppm) et à T5 (9,4 ppm) par rapport à T4 (2,6 ppm) et dans les parcelles D24 on enregistre une élévation significative ($p < 0,05$) à T2 (7,92 ppm) par rapport à T4 (2,45 ppm)

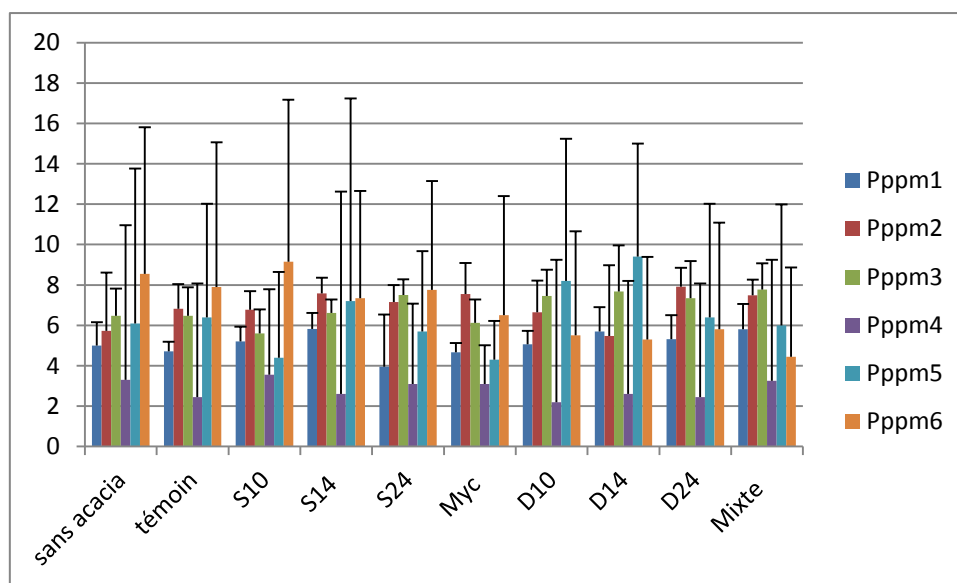


Figure 40 : Variation des teneurs en phosphore assimilable des sols au cours du temps T1, T2, T3, T4, T5, T6

1.7. L'azote total

Les teneurs en azote total évoluent également au cours du temps (Figure 41). Toutefois, selon Hazelton et Murphy, 2007, notre sol reste pauvre en azote total. On remarque

que, l'azote total atteint le taux le plus élevé à T5 dans toutes les parcelles sauf dans les parcelles D10.

On enregistre, une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles témoins à T5 (0,078%) par rapport à T2 (0,037%) et T4 (0,037%) , une augmentation significative ($p < 0,05$), dans les parcelles sans acacia à T5 (0,098%) par rapport à T1 (0,047%), T2 (0,035%), T4(0,042%) et T6 (0,047%), une augmentation significative ($p < 0,05$), dans les parcelles S14, à T5 (0,086%) par rapport à T2 (0,023%), T4 (0,043%) et T6 (0,047%) , une augmentation significative ($p < 0,05$), dans les parcelles D10, à T1 (0,085%) par rapport à T2 (0,04%) et T4 (0,04%) , une augmentation significative ($p < 0,05$), dans les parcelles D14 à T5 (0,069%) par rapport à T6 (0,042%), une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles D24 à T5 (0,077%) par rapport à T2 (0,053%) et T4 (0,03%) et une augmentation significative ($p < 0,05$), dans les parcelles Mixte ,à T5 (0,067%) par rapport à T1(0,037%).

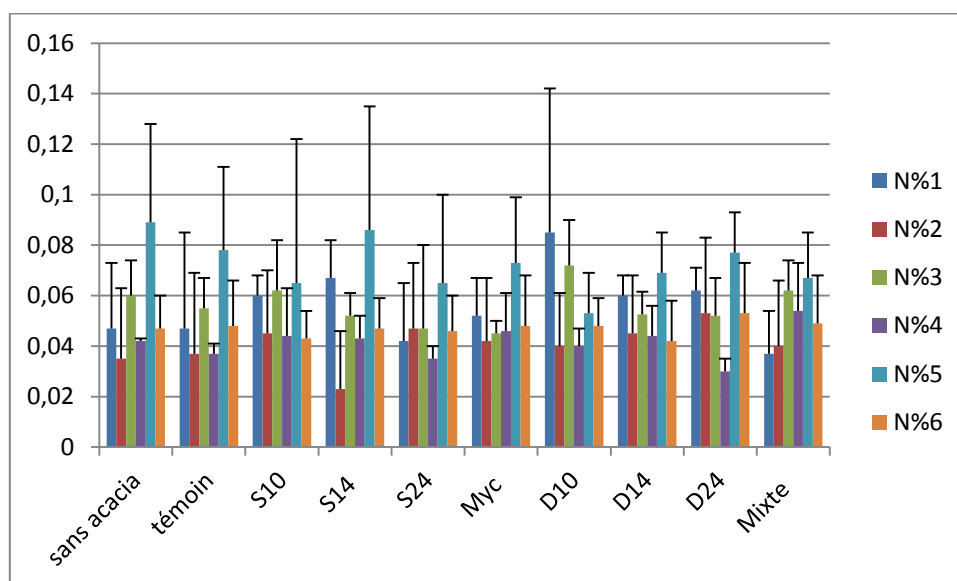


Figure 41 : Variation des teneurs en azote total des sols au cours du temps T1, T2, T3, T4, T5, T6

1.8.La matière organique

Les teneurs déterminées en matière organique évoluent au cours du temps, mais restent toujours faibles selon (Hill Laboratories ,2014) (<3 %) (Figure 42).Globalement, on constate que, le taux le plus élevé est enregistré à T5 dans toutes les parcelles, sauf dans les parcelles

D10 et Mixte, où le taux le plus important est enregistré à T1. Cependant, le taux le plus faible est enregistré à T2 dans toutes les parcelles.

On enregistre à T3 une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles mixte (1,14%) par rapport aux parcelles sans acacia (0,67%) et témoin (0,68%), une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles témoin à T5 (1,57%) par rapport T2 (0,36%), T3 (0,68%), T4 (0,75%) et T6 (0,96%) , une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles sans acacia à T5 (1,78%) par rapport à T1(1,1%), T2 (0,25%), T3(0,67%), T4 (0,85%) et T6 (0,94%) , une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles S10 à T5 (1,32%) par rapport à T2 (0,34%) et à T1(1,26%) par rapport à T2 (0,34%) , une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles S14 à T5 (1,72%) par rapport à T2 (0,26%), T3 (0,89%), T4(0,87%) , T6 (0,96%) et à T1(1,29%) par rapport à T2 (0,26%), une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles S24 à T5 (1,35%) par rapport à T2 (0,42%), T3 (0,78%), T4 (0,7%) et T1(1,18%) par rapport à T2 (0,42%) , une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles Myc à T1(1,02%), T4 (1,46%), T5(1,46%), T6(0,97%) par rapport à T2(0,29%) et à T5(1,46%) par rapport à T3(0,74%) , une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles D10 à T1(1,05%), T5(1,06%), T6(0,97%) par rapport à T2 (0,45%) , une augmentation significative ($p < 0,05$) dans les parcelles D24 à T5(1,36%) par rapport à T2(0,41%), T3(0,74%), T4(0,62%) et à T1(1%), T5(1,36%), T6 (1,06%) par rapport à T2(0,41%), une augmentation significative $p < 0,05$ dans les parcelles Mixte à T1(1,58%), T4(1,09%), T5(1,35%), T6 (0,99%) par rapport à T2 (0,31%) .

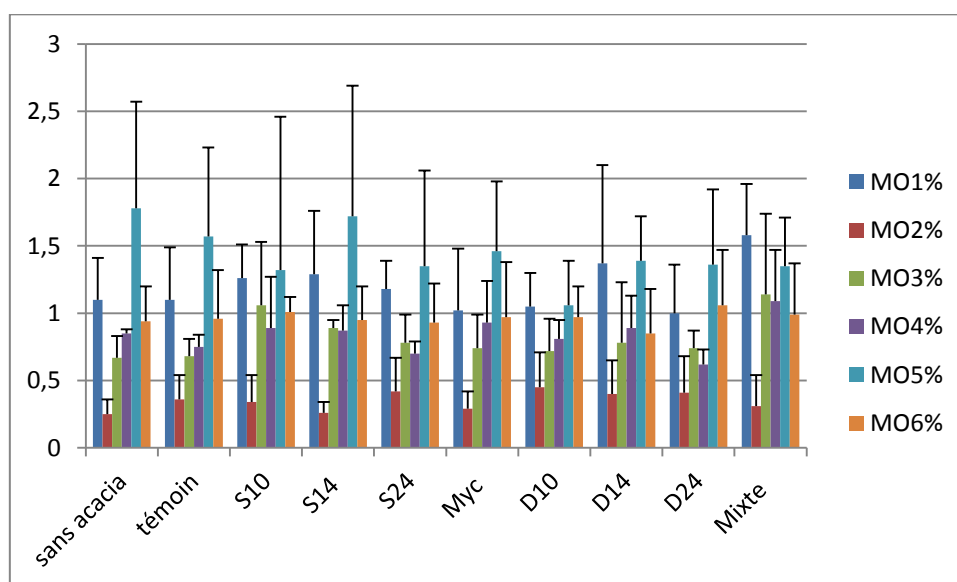


Figure 42 : Variation des teneurs en matière organique des sols au cours du temps T1, T2, T3, T4, T5, T6

1.9.La texture du sol

Le site connaît une hétérogénéité texturale dans ces différentes parcelles (Figure 43)

Les classes texturales sont basées sur la classification granulométrique USDA.

La classe texturale du sol des parcelles Sana acacia : (16% argile, 13% Limons, 72% sable), Témoin (16% argile, 12,5% limons, 71,5% sable), Myc (17,5% argile, 7 % limons, 75,5 % sable) et Mixte (17%argile, 14% limons ,72% sable) est sable limoneux

La classe texturale des parcelles S10 (22%argile, 14 %limons, 72 % sable) et D24 (19% argile, 15%limons, 68%sable) est limon sableux.

La classe texturale des parcelles S14 (20% argile,11% limons,65% sable), S24 (22,5 % argile,7 % limons,75,5% sable), D10 (22% argile,18% limons,63% sable) et D14(27% argile,18 % limons,58% sable) est limon sableux argileux.

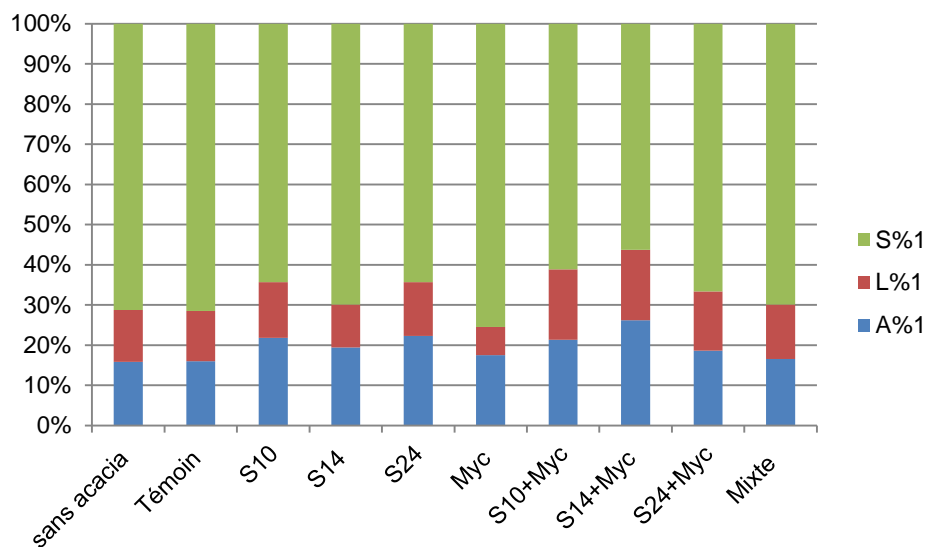


Figure 43 : La granulométrie du sol des dix parcelles

2. Discussion Générale

Les acacias, pins ou eucalyptus, sont les arbres qui ont été habituellement utilisés pour réhabiliter les milieux dégradés. Le but de cette revégétalisation sur l'environnement est d'améliorer la biodiversité végétale et les caractéristiques physico-chimiques des sols (Duponnois et al ., 2013). En outre, l'importance de la symbiose mycorhizienne en milieu aride, dans les zones méditerranéennes et sahéliennes a été prouvée dans la réussite de la revégétalisation et dans l'optimisation de la nutrition des plantes en azote et en phosphore (Duponnois et al ., 2010) ;

Nos résultats sont en compatibilité avec les travaux de Zhang et Chu ,2011 qui se résument dans la revégétalisation des 3 carrières situées dans une zone dégradée au sud de la chine (Hong Kong) en utilisant 3 types de plantes : *Eucalyptus* spp, *Acacia* spp et *Casuarina equisetifolia*. Les résultats montrent une accumulation du carbone organique, d'azote total et du phosphore assimilable dans les trois carrières. Ainsi, Les résultats de la réhabilitation d'une zone aride dégradée au Kenya, par *Cenchrus ciliaris*, *Eragrostis superba* , *Entrepogon macrostachyus* et *Acacia tortilis* montrent aussi un accroissement dans le taux du carbone organique et d'azote total (Mureithi et al . , 2014). En outre, les travaux de Remigi et al ., 2008 montrent, après sept ans de plantation d'*Acacia holosericea* qui a été inoculé par un champignon écto- mycorhizien *Pisolithus albus* dans une zone dégradée du Sénégal, que le contenu du sol en azote total, en carbone et en phosphore assimilable a été significativement élevé comparé au sol des cultures environnantes et au sol des *Acacia* non inoculés.

L'expérimentation de la réhabilitation menée pendant 12 mois par *Acacia raddiana* d'un site dégradé (station semi aride) situé au sud de la Tunisie, montre que le taux du sol en matière organique, en azote total, en phosphore assimilable et en cations échangeables : K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} sont significativement élevés que dans la prairie ouverte (Abdallah et al ., 2008)

Alors que les résultats de l'augmentation significative -dans les parcelles sans acacia- en matière organique du sol, en azote total, en Ca^{2+} et en K^+ sont compatibles avec les résultats des travaux de Jeddi et Chaieb, 2010 qui ont été réalisés dans les sols dégradés de la steppe de *Stipa tenacissima* (sud de la Tunisie) au cours d'une durée de 12 ans en excluant tout sorte de pâturage. Cependant, sa teneur en pH, Na^+ et EC a baissé contrairement à nos résultats.

Sous un climat semi-aride, la revégétalisation d'une mine de charbon, par le lisier de porc et de la paille des céréales, de 1997 à 2005 montre une diminution de la salinité initiale, une diminution significative des nitrates à une valeur acceptable. Cependant, le pH est

maintenu à la valeur initiale (Salazar et al., 2009). La re-végétalisation par *Populus simonii* de la sablière Horqin, qui est un désert situé au nord de la Chine, prouve un changement -à une profondeur de 0-5cm -dans les propriétés physicochimiques du sol qui est positivement corrélé avec l'âge des plantes et le développement de la croûte terrestre (Selon Zhao et al., 2011). Les résultats de la réhabilitation d'une sablière par *Populus gansuensis* montre que le sol situé à une profondeur de (0-15 cm), a une augmentation significative en carbone organique, inorganique et en azote total d'une durée de 7 ans (Zhong Su et al., 2010).

Les résultats du pH du sol (Figure 32) ont un lien étroit avec les variations saisonnières du pH d'où sa teneur est plus basse durant les périodes sèches et chaudes et elle est plus élevée durant les périodes pluvieuses et froides (Rengel, 2002 ; Gasser, 2011). Cependant, la diminution de la teneur du pH à T3, sous un couvert végétal peut être due à une libération des protons (H^+), lors du prélèvement des cations par la racine (Bye, 1999). Celle-ci peut aussi s'expliquer par une prolifération importante de la microflore, par la présence d'exsudat racinaire (Waligora, 2010 ; Davet, 1996). L'activité des microorganismes du sol dépend aussi de la température, de l'humidité et de la texture du sol. (Lundquist et al., 1999 ; Herisse, 2004 ; Steenwerth et al., 2008). Toutefois, on a observé - dans des conditions de laboratoire - que les Rhizobia décroissent le pH du sol, cependant les Bradyrhizobia en tendance de l'accroître (Dubey, 2011). En effet, les microorganismes acidifient le sol, par la synthèse des acides organiques. En outre, une activité sulfo-oxydative sous l'action des bactéries et des champignons, peut baisser le pH du milieu (Davet, 1996). Le pH a également une influence sur la vie microbienne. En gros, les champignons sont généralement dominants dans les sols acides et les bactéries dans les sols neutres ou alcalins (Herisse, 2004). Par ailleurs, on a trouvé que le pH est un facteur significatif, qui affecte la nodulation dans les sols des mines, avec un taux élevé de nodulation à un pH qui est entre 5,5 et 7,2 et un taux bas à un pH inférieur à 5,5 (Zahran, 1999). Les sols alcalins avec un pH égal ou supérieur à 7,8, limitent l'accessibilité des sols en fer, zinc, manganèse et spécialement le phosphore et le bore, d'où une réduction de la fixation d'azote (Graham et Allan., 2002). En outre, un pH entre 6,6 et 7,3 est favorable pour les activités microbiologiques qui contribuent à la biodisponibilité en azote, en soufre et en phosphore (USDA, 1998). Il existe très peu de réactions chimiques et microbiologiques dans les sols qui ne soient pas sensibles au pH (Brady et Weil, 2002).

Le pH est alcalin, malgré cette alcalinité, le sol reste peu salé (Figure 33). En effet, sous l'action de lessivage, la salinité peut baisser et être remplacée par l'alcalinisation. On peut avoir des sols peu salés, mais souvent sodiques ou alcalins (Job et al, 1997). Selon Le

gros, 2007, les carbonates en excès, peuvent être équilibrées par différents types de cations. Généralement, le Na^+ qui est majoritairement présent dans les sols alcalinisés, passe par le complexe absorbant et qui peu expliquer la sodisation enregistrée dans nos résultats (Figure 33).

Les valeurs de potassium échangeable sont supérieures à 100 ppm (Ryan *et al.*, 2001) (Figure 34). Donc, le risque d'une déficience en potassium est à écarter. Les sols à texture fine (texture argileuse et argilo-limoneuse) sont potentiellement plus riches en K total que les sols à texture grossière (sableuse) (Mhiri, 2002). Cependant, le potassium se présente dans sa majeure partie dans le sol, sous forme insoluble particulièrement dans les minéraux argileux, qui constituent à la fois le principal réservoir et le piège à potassium (Goldstein, 1994 ; Mhiri, 2002). Il est très facilement et fortement absorbé dans le complexe argilo-humique, ce qui rend sa teneur faible en solution du sol et donc les risques de lessivage sont limités (Dinger, 1997 ; Riou-Nivert, 2005). Cependant, sa teneur décroît dans les sols sableux fortement irrigués où il est lessivé (Carrow *et al.*, 2002). Toutefois, les régions arides et semi arides, sont potentiellement riches en potassium (Ryan *et al.*, 2001). Sa solubilité est faible dans les sols alcalins où l'alcalinité est due au CaCO_3 , en raison à une rétrogradation du potassium induite par le calcium Ca^{+2} (Van Lidth De Jeude, 2004). La nature minéralogique des argiles, joue un rôle déterminant dans cette rétrogradation (Cottenie *et al.*, 1972). En effet, certains microorganismes du sol KSB (Potassium-solubilizing-bacteria), sont capables de dégrader les minéraux silicatés et de libérer le potassium, ces bactéries peuvent aussi fixer l'azote et solubiliser le phosphore (Barriuso *et al.*, 2005). Cette solubilisation est assurée par les EPS (exopolysaccharides) et par les acides organiques (Freidrichet *al.* 1991, Ullman *et al.* 1996 ; Liu *et al.*, 2006). Morel (1996), signale que l'estimation de l'aptitude d'un sol à assurer l'alimentation des cultures en potassium doit être associée au taux d'argile et à la valeur de la CEC. Quoiqu'une baisse en potassium, peut être due à son absorption par les plantes en périodes de croissance (Belanger, 1977).

En effet un excès de calcium provoque une déficience en magnésium toutefois un excès de potassium inhibe l'absorption du magnésium (Hoskins, 1997). L'érosion est aussi l'une des causes principales d'une déficience magnésique (Boyer, 1978). Le magnésium est plus lessivé que le potassium, il est moins absorbé par les argiles. Sa disponibilité est limitée dans les sols légers par conséquent il est facilement lessivé (Unifa, 2010). Toutefois, les carences en magnésium et en potassium dans des sols argileux ou limoneux argileux sont très rares, mais elles sont très habituelles dans des sols sableux et calcaires (Massenet, 2013).

En outre, L'azote ammoniacal freine l'absorption du magnésium dans la terre à mauvaise activité microbienne où la matière organique évolue mal et où l'azote ammoniacal a parfois tendance à s'accumuler (Pousset, 2002).

En effet, le calcium joue un rôle vital dans le métabolisme de l'azote et l'absorption du NO_3^- par les plantes, et le magnésium a un rôle primordial dans le processus de la photosynthèse puisqu'il est un constituant essentiel de la chlorophylle. (Lepoivre, 2003 ; Oryschaket *al.* , 2013). En outre, le pH est supérieur à 8, ce qui est nuisible à la croissance d'un grand nombre des végétaux entraînant une mauvaise assimilation de certains éléments (dont le Magnésium et surtout le Fer), qui entraîne les symptômes bien connue de la chlorose ferrique (Faucard, 1994). Ce calcaire fournit le cation bivalent du calcium Ca^{+2} qui est la forme utilisable par les plantes, il est présent dans la solution du sol mais en quantité importante sous forme de cation échangeable dans les colloïdes (Khan Towhid, 2013). En effet, la libération progressive du calcium par dissolution consiste a une attaque du calcaire sous l'effet des eaux acides issues des précipitations (Coque, 2008). L'activité biochimique des microorganismes et des racines des plantes participent à cette solubilisation. (Wierzchos *et al.*, 2003 ; Salomon,2006).S'ajoute l'altération physicomécanique des roches calcaires par des facteurs climatiques (température, ensoleillement, vent, ect...) ou facteurs du site (l'altitude, les caractéristiques de la roche et des fractures, la conductivité thermique du massif, la présence de végétation ou d'une circulation d'eau) (Saad, 2012).

Djili ,2000 a prouvé que -dans le contexte des sols du Nord de l'Algérie-, une augmentation des taux de calcaire entre 0 et 2,5% provoque une augmentation du pH jusqu'à une valeur maximale de 7,82%.Ce calcaire bloque certains éléments indispensables aux plantes, comme le fer, B, Cu, Mn, Zn en solubilisation de la calcite au niveau des racines dont le fonctionnement se trouve perturbé, obstacle à la minéralisation de la matière organique par effet d'enrobage (Morel, 1996). Le calcaire actif (figure 37) est la fraction fine du calcaire d'un sol capable de libérer assez facilement du calcium, elle enrichie la solution du sol en bicarbonates solubles qui vont progressivement saturer le complexe d'adsorption du sol avec des quantités implorantes d'argile. (Pousset, 2002, Vasant *et al.* , 2009) Une terre peut être riche en calcaire total et relativement pauvre en calcaire actif. (Pousset, 2002).Il est l'indice de chlorose ferrique à une teneur voisine de 5% : La surabondance des ions calcium exerce un antagonisme sur la disponibilité d'autres nutriments tels que le potassium ou le fer et des signes de carences ou de dépérissement peuvent apparaître (Chlorose) (Pousset, 2002 ; Legros, 2007 ; Vasant *et al.* , 2009 ; OFME, 2011)

En effet, le phosphore est généralement déficient dans les sols alcalins-calcaires, il a tendance d'être insolubilisé par le calcium (phosphates calcique et magnésique) (Pousset, 2002 ; Ryan, et al. , 2001). Il est généralement riche en phosphate minéral insoluble, mais déficient en ortho phosphate essentiel pour la nutrition des plantes et les microorganismes (Sperber 1958 ; Sundara Rao et Sinha 1963, Tinker , 1980 ; Goldstein, 1986). En effet , le phosphore se trouve sous la forme organique et inorganique, la faible disponibilité en phosphore est due à la grande réaction des anions phosphoriques solubles avec Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} et Al^{3+} tout dépend des propriétés des sols (Gyaneshwar et al., 2002). Il se pourrait que les anions phosphoriques précipitent au contact du calcaire actif (Baize, 2000). Cependant, certains microorganismes sont capables de solubiliser les minéraux phosphatés tout en réduisant le pH par la sécrétion des acides organiques qui sont un bon chélateur des cations bivalents comme le Ca^{+2} et ils peuvent aussi former un complexe avec les ions métalliques associé au phosphore de ce fait le phosphore peut se libérer (Jones ,1998 ; Gyaneshwar et al., 2002 ; Pradipta, 2008). En effet, le mécanisme de solubilisation du phosphore minéral est assuré par les acides organiques cependant les phosphatases acides jouent un rôle majeur dans la minéralisation du phosphore organique (Goldstein, 1995 ; Kim et al. , 1997 ; Rodríguez et Fraga ., 1999). Les genres *Pseudomonas*, *Bacillus* et *Rhizobium* sont parmi les bactéries les plus puissantes dans le processus de solubilisation du phosphore (Rodriguez et Fraga., 1999) Toutefois, les mycorhizes par leurs hyphes rendent le phosphore et certains oligo- minéraux comme le calcium et le zinc accessibles à la plante hôte (Olsson et al., 1999). En agroforesterie, l'association mycorrhizal contribue beaucoup à la croissance des espèces d'acacias dans les sols infertiles (Dart et al ., 1991). En outre, la double inoculation par les arbuscules mycorrhiziens et les bactéries qui solubilisent le phosphore accroît l'absorption du phosphore natif du sol et le phosphore qui provient des roches phosphatées (Goenadi et al, 2000; Cabello et al, 2005)

En effet la biodisponibilité en azote dépend de l'activité des bactéries nitrifiantes, cependant leur activité dépend du pH : elles sont plus actives lorsque le pH se trouve entre 6,5 et 7,5 et la température optimale entre 30° à 35° Celsius (Biswas et Mukherjee, 2006). Un pH acide a tendance à limiter la fixation biologique de l'azote en raison de la faible teneur en calcium, phosphore, molybdène. Cependant, sous l'effet d'un sol alcalin, le phosphore, le cobalt le bore et le fer deviennent critiques (USDA ,1998 ; McCauley et al., 2009). Généralement, les légumineuses nécessitent plus de phosphore que d'autres plantes. Le molybdène est également un élément essentiel pour la nitrogénase et le fer est un composant

indispensable pour le fonctionnement de la leghémoglobine (Graham P et Allan D, 2002) Toute fois, l'antagonisme microbiologique peut réduire la nodulation (Kumara Rao et al, 1974).

Les teneurs déterminées en matière organique restent faibles, Godwin (1992) signale que les sols des régions semi arides contiennent peu de matière organique pas plus d'un pourcent. La matière organique provient principalement des débris végétaux, mais inclus aussi les microorganismes du sol et les résidus animaux (COG, 1992). Cette matière organique subit une humification puis une minéralisation. De ce fait, elle fournit nourriture et énergie aux microorganismes qui à leur tour fournissent les éléments nutritifs aux plantes (Carrier, 2003). En outre, elle améliore les caractéristiques physico-chimiques du sol, car elle joue un rôle favorable vis à vis de la structure et stabilité structurale des sols, de la rétention en eau, de la capacité d'échange cationique ainsi que de la stimulation de la croissance racinaire (Drouet, 2011).

Un sol sableux est faible en matière organique et une terre à très faible teneur en matière organique est généralement fragile et peu productive (Pousset, 2002). Un bon sol doit contenir entre 10 à 20 % d'argile, 5 à 10% de matière organique (Agriinfo.in, 2011). En effet les minéraux, la matière organique et les microorganismes constituent des éléments indispensables à toute pédogénèse (Bollag et Leyval., 1998) et conservation des sols.

Conclusion

Clicours.COM

Conclusion générales et perspectives

Au bout de 18 mois de bio-végétalisation, en vue de la réhabilitation des sols dégradés d'une carrière localisée dans un site d'une ancienne sablière de la commune de Terga (nord-ouest algérien), où on a expérimentalement planté des *Acacias saligna* avec des intrants de bio-fertilisants et non de l'agro-chimie, c'est-à-dire des inocula rhizobien et/ou mycorhizien, on a pu aboutir à une réelle et favorable modification des substrats à remédier, avec l'obtention d'un sol plus riches en potassium assimilable par la plante et que ces teneurs écartent toute déficience du sol en potassium, plus riche en phosphore assimilable, en azote total, en matière organique. Cependant, la nature calcaire du sol et l'effet antagoniste du calcaire actif plus précisément les cations Ca^{+2} dont les teneurs restent encore importantes, a ralenti l'expression de certains éléments qui restent faibles comme le phosphore, l'azote total, la matière organique et le magnésium échangeable dont les teneurs restent parfois modérés. Les teneurs excessives du Ca^{+2} , ont conduit également à une élévation des teneurs en sodium échangeables Na^{+} . Cette augmentation représente un moyen ou forme d'équilibre face à cette surabondance de ces cations. Toutefois, notre sol reste non ou peu salé.

Le pH de notre sol reste toujours alcalin, qui a dû être favorisé par la nature calcaire de la roche mère et le taux faible de la matière organique, qui caractérisent la plupart des sols du climat du semi aride.

Cependant, la nature et l'hétérogénéité texturale du sol influence le fonctionnement biochimique du sol, ainsi que l'activité microbiologique selon une disponibilité variable de la dynamique de l'eau du sol.

Dans le but d'avoir des résultats meilleurs, nous devrions abaisser l'alcalinité et l'excès du sol en calcium ou calcaire actif, par l'ajout d'un apport de matière organique. Cette expérimentation doit se suivre sur une durée plus longue (7 ans par exemple).

En effet, l'utilisation des engrais chimiques est responsable de la pollution des sols et de l'eau. L'eutrophisation de l'eau par les phosphates, mène à la destruction de la biodiversité. Les engrais azotés, provoquent également la pollution de la nappe phréatique par les nitrates et participent également au réchauffement climatique (effet de serre).

Ces travaux, ouvrent de nouvelles pistes et perspectives sur les possibilités scientifiques et économiques de ces procédés de fertilisation biologique ou naturelle, comme

moyen alternatif réel de soutien à la production végétale durable et de protection du milieu naturel et de réhabilitation et conservation des sols.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- Abdallah, Fathia., Noumia, Zouhaier., Touzard, Blaise., Ouled Belgacem, Azaiez., Neffatic, Mohamed., Chaieba, Mohamed., (2007). The influence of *Acacia tortilis* (Forssk.) Subsp. raddiana (Savi) and livestock grazing on grass species composition, yield and soil nutrients in arid environments of South Tunisia. *Flora*. 203, 116–125
- Ahiabor, B. D et Hirata H. (1994). Characteristic responses, of three tropical legumes to the inoculation, of two species of VAM fungi in Andosol soils with different fertilities. *Mycorrhiza*. 5, 63–70.
- Akiyama , K. , Matsuzaki , K. et Hayashi , H.(2005) . Plant sesquiterpenes, induce hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fungi. *Nature*.435, 824 – 827.
- Alizadeh, Omid. (2011). Mycorrhizal Symbiosis. *Advanced Studies in Biology*. 3(6), 273 – 281.
- Amaranthus, Mike et Simpson, Larry. (2011). *Mycorrhizal Fungi Expand Contemporary Cropping Opportunities*. A Plant Evolution Revolution. ACRES USA .The voice of Eco-Agriculture Vol. 41, No. 4
- Aubert, G. (1978).*Méthodes d'analyses des sols*. Marseille : Centre national de documentation et pédagogique.
- Audet, P. , Charest, C. (2006). Effects of AM colonization on “wild tobacco” plants grown in zinc-contaminated soil. *Mycorrhiza*. 16, 277-283.
- Baize, D.(2000) .*Guide des analyses en pédologie* (2 édition). Paris, INRA. 120 p.
- Barea, J.M ., Azcón-Aguilar, C. (1982). Production of plant growth-regulating substances, by the vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae*. *Appl Environ Microbiol*. 43, 810-813.

- Barriuso, J ., Ramos Santamaria, B ., Daza, C ., Gutiérrez, A ., Mañero, F. J. (2008). Effect of inoculation with putative plant growth-promoting rhizobacteria isolated from *Pinus* spp. on *Pinus pinea* growth, mycorrhization and rhizosphere microbial communities. *J. Appl. Microbiol.* 105(5), 1298-1309.
- Belanger, J. 1977. *Soil fertility*. In Countryside Press, Waterloo, WN. 160 p.
- Besserer, A ., Becard, G ., Roux, C et Sejalon-Delmas, N.(2009). Role of mitochondria in the response of arbuscular mycorrhizal fungi to strigolactones. *Plant Signal Behav.* 4, 75–77.
- Besserer, A ., Puech-Pagès , V., Kiefer, P ., Gomez-Roldan , V., Jauneau, A . , Roy, S ., Portais, J-C ., Roux, C ., Bécard, G ., Séjalon-Delmas, N.(2006). Strigolactones stimulate arbuscular mycorrhizal fungi by activating mitochondria. *PLoS Biology*, 4: e226.
- Biswas, T.D., et Mukherjee, S.K. (2006). *Text book of soil science* (second edition). Edition Tata McGraw-Hill. 61p.
- Bloom, A.J. (2011). Energetics of Nitrogen Acquisition, *Annual Plant Reviews*. 42, 63-81.
- Bollag, J.M et Leyval, C. (1998). *Interactions entre les minéraux des sols, les composés organiques et les microorganismes: Interactions constituants minéraux – constituants organiques - microorganismes du sol sur le cycle et la biodisponibilité des éléments*. Montpellier, 16ème congrès Mondial de science du sol.
- Bonin, S. Cours pédologie. 2006. Connaissance des sols - Introduction à la pédologie.
- Bouhe, M.B.(1972). *Lombriciens de France*. Ecologie et Systématique. INRA (Ann. Zool. Ecol. Anim numéro hors série 72/2), Paris. 671p.
- Boyer, J. (1978). *Le calcium et le magnésium dans les sols des régions tropicales-humides et subhumides*. Paris, Office de la recherche scientifique et technique outre-mer, n°35, ISBN 2-7099-0494-

- Brady, N.C et Weil, R.R. (2002). *The nature and properties of soil*. 13th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Education Inc. 960 p.
- Brady, N.C. (1990). *The nature and properties of soils*. 10th edition. Mac millan Publishing Co., New York, NY. 621 p.
- Brady, Nyle. C. et Weil, Ray. R. (2008). *The Nature and Properties of Soils*. 14 ed. Pearson-Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. 990 p.
- Bucher, M. (2007). Functional biology of plant phosphate uptake at root and mycorrhiza interfaces. *New Phytol.* 173, 11-26.
- Buee, M., Rossignol, M., Jauneau, A., Ranjeva, R., Bécard, G. (2000). The pre-symbiotic growth of arbuscular mycorrhizal fungi is induced by a branching factor partially purified from plant root exudates. *Molecular Plant-Microbe Interactions: MPMI*. 13, 693-698.
- Bye, P. (1999). *La truffe, la terre, la vie*. Paris, edition INRA. 167 p.
- Cabello, M., Irrazabal, G., Bucsinszky, A.M., Saparrat, M et Schalamuck, S. (2005). Effect of an arbuscular mycorrhizal fungus, *Glomus mosseae*, and a rock-phosphate-solubilizing fungus, *Penicillium thomii*, in *Mentha piperita* growth in a soilless medium. *Journal of Basic Microbiology*. 45(3), 182–189.
- Cale, M., Halbleib et Paul, W. Ludden. (2000). Regulation of Biological Nitrogen Fixation, *Recent Advances in Nutritional Sciences .J. Nutr.* 130 (5) ,1081-1084.
- Cardenas, L., Moldaway-Clarke, T.L., Sanchez, F., Quinto, C., Feijó, J.A., Kunkel, J.G., Mepler, P.K. (2000). Ion changes in legume root hairs responding to Nod factor. *Plant Physiol.* 123,443–451.
- Carrow, R.N., Waddington, D.V. et Rieke P.E. (2002). *Turfgrass Soil Fertility and Chemical Problems: Assessment and Management*. Ann Arbor Press, Chelsea, MI.

- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec et ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec. (2003). *Détermination de la matière organique par incinération : méthode de perte de feu (PAF)*. MA. 1010 – PAF 1.0, Ministère de l'Environnement du Québec. 9p.
- Chabaud, M., Genre, A., Sieberer, B.J., Faccio, A., Fournier, J., Novero, M., Barker, D.G. et Bonfante, P.(2011). Arbuscular mycorrhizal hyphopodia and germinated spore exudates trigger Ca²⁺ spiking in the legume and non legume root epidermis. *New Phytol.* 189, 347–355.
- Cluzeau, D., Cannavacciuolo, M., Peres, G. (1999) - *Indicateurs microbiologiques des sols : les lombriciens - Méthode d'échantillonnage dans les agrosystèmes en zone tempérée*. In 12^{ème} Colloque Viticole et Oenologique Ed. ITV Paris, p 25-35.
- Collin, C.B.(2006).Analyse et reorésentation de la couverture pédologique « application à la caractérisation des unités cartographiques de sols pour le programme IGCS d'un secteur du Baugeois. *Thèse de doctorat en cartographie des sols, Laboratoire de Science du Sol, I.N.H., Angers, et laboratoires Science du Sol et Infosol. INRA, Orléans, France.*
- Coque, R. (2008). Relief karstique. EncyclopediaUniversalis cortical root cells of *Medicago truncatula*. *Plant J.* 69, 822–830.
- Cottenie, A., D'Hoore, j., Herbillon. A., Jacobs. T., Manil. G., Noirfalise. A., Scheys. G., Sine L., Sys.C., Tavernier.R., Van Ruymbek.M.(1972). *Pedologie: Economie du sol en potassium , étude de la fixation et de la libération du potassium en conditions contrôlées*. Bulletin de la société Belge de pédologie. 141p.
- Crompton, H. (1992). *Acacia saligna* - for dry land fodder and soil stabilization, *NFT Highlights*, No. 92-03. Nitrogen Fixing Tree Association, Waimanalo, Hawaii.
- Dart, P.J., Umali-Garcia, M et Almendras, A. (1991). Role of symbiotic associations, in nutrition of tropical acacias. In: Turnbull, J.W., ed. *Advances in tropical acacia research (pp. 13–19)*.Canberra, ACIAR: *Proceedings N°35*.

- Davet, P. (1996). *Vie microbienne du sol et production végétale*. Paris, édition INRA. Pp131-132.
- Dénarie, J., Debellé, F., Promé, J.C. (1996). Rhizobium lipo-chitooligosaccharide nodulation factors: signaling molecules mediating recognition and morphogenesis. *Annu Rev Biochem.* 65,503–535.
- Deprince, A. (2003). *La faune du sol : diversité, méthodes d'étude, fonctions et perspectives*. Le Courrier de l'environnement n°49, pp123-138.
- Dinger, F. (1997). *végétalisation des espèces dégradées en altitude*, première édition : Cemagref édition.101 p.
- Diouf. D., Forestier, S., Neyra, M et Lesueur. (2003). Optimization of inoculation of *Leucaena leucocephala* end *Acacia mangium* with *rhizobium* under green house conditions *.Ann.For.S.* 60, 379-384.
- Dixon, R et Kahn, D. (2004). Genetic regulation of biological nitrogen fixation. *Nat Rev Microbiol* 2, 621–631.
- Dodd, J.C. (2000). The role of arbuscular mycorrhizal fungi in agro- and natural ecosystems . *Outlook Agr.* 29, 63–70.DOI: 10.1371/journal.pone.0006637.
- Downie, J.A., Walker, S.A. (1999). Plant responses to nodulation factors. *Curr Opin Plant Biol.* 2,483–489.
- Dubey, Y.P. (2011). Rhizobia – As ameliorant to soil reaction. *African Journal of Microbiology Research.* 5(24), 4091-4096.
- Duponnois, R., Hafidi, M., Ndoye, I., Galiana, A., Dreyfus, B., Prin, Y. (2010). In : Dia Abdoulaye (ed.), Duponnois Robin (ed.). *Le projet majeur africain de la Grande Muraille Verte : concepts et mise en oeuvre*. Marseille : IRD [Marseille].Pp171-182.

- Duponnois, Robin., Ezékiel, Baudoin., Hervé, Sanguin., Jean, Thioulouse., Christine, Le Roux., Estelle, Tournier., Antoine, Galiana., Yves, Prin., Bernard, Dreyfus.(2013). *L'introduction d'acacias australiens pour réhabiliter des écosystèmes dégradés est-elle dépourvue de risques environnementaux ?* Bois et forêts des tropiques, 2013, n° 318 (4). Forum / environmental risks.
- Esseling, J.J., Lhuissier, F.G.P et Emons, A.M.C. (2003). Nod Factor induced root hair curling: Continuous polar growth towards the point of Nod Factor application. *Plant Physiol.*132, 1982–1988.
- Laboratoire d'études Maritimes : LEM-Agence TAD. (2000). *Etude d'impact sur l'environnement (E.I.E) de la sablière de Terga-Wilaya de Ain Temouchent.*
- Felle, H.H., Kondorosi, E., Kondorosi, A., Schultze, M.(1999). Nod factors modulate the concentration of cytosolic free calcium differently in growing and non-growing root hairs of *Medicago sativa* L. *Planta.* 209,207–212.
- Foucard, J.(1994).*Filière pépinière de la production et de la plantation* .Technique et documentation. Paris : Edition Lavoisier. Pp 99-156
- Friedrich, S.N.P., Platonova, G.I., Karavaiko, E., Stichel and Glombitza, F.(1991).Chemical and microbiological solubilization of silicates. *Acta. Biotech.* 11(3),187-196. DOI: 10.1002/abio.370110302.
- Garcia, I.V., Mendoza, R.E.(2007). Arbuscular mycorrhizal fungi and plant symbiosis in a saline-sodic soil. *MYCORRHIZA.* 17(3),167-174.
- Garg, N., Chandel, C. (2009). Arbuscular mycorrhizal networks: process and functions. *A review Agronomy for Sustainable Development.* 30,581-599.
- Genre, A., Chabaud, M., Timmers, T., Bonfante, P., Barker, D.G. (2005). Arbuscular mycorrhizal fungi elicit a novel intracellular apparatus in *Medicago truncatula* root epidermal cells before infection. *The Plant Cell.* 17, 3489-3499.

- Geurts, René et Bisseling, Ton. (2002). Rhizobium Nod Factor Perception and Signalling. *The Plant Cell May*.14(1), S239-S249 [doi: http://dx.doi.org/10.1105/tpc.002451](http://dx.doi.org/10.1105/tpc.002451) .American Society of Plant Biologists.
- Girard, M.C., Walter, C., Remy, J.C., Berthelin, J., Morel, J.L.(2005). *Sols et Environnement*. Dunod (Ed.). 816p.
- Glick, B.R. (2012). *Plant Growth Promoting Bacteria: Mechanisms and Applications*, Hindawi Publishing Corporation, Scientifica.
- Gobat, J.M., Aragno, M., Matthey, W. (2003). *Le sol vivant : Bases de pédologie, Biologie des sols*. Presses polytechniques et universitaires romandes (Ed).
- Gobat Jean, Michel., Aragno, Michel., Matthey, Willy. (2010). *Le sol vivant Bases de pédologie-Biologie des sols*. 3^{ème} édition. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Godwin, R .G. (1992). Le génie agricole au service du développement: production vivrière en zones de faible pluviosité –façons culturales appropriées. *Bulletin des services agricoles de la FAO*83.40p.
- Goenadi, D.H., Siswanto et Sugiarto,Y.(2000). Bioactivation of poorly soluble phosphate rocks with a phosphate solubilizing fungus. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3), 927-932.
- Goldstein, A.H. (1986). Bacterial solubilization of mineral phosphates: Historical perspective and future prospects. *Amer. J.Alter .Agric*.1, 51-57.
- Goldstein, A.H. (1994). Involvement of the quino protein glucose dehydrogenase in the solubilization of exogeneous mineral phosphates by gram negative bacteria. In phosphate in micro-organisms: cellular and molecular biology. *Cell. Mol. Biol.*, Eds, 197-203.

- Goldstein, A.H. (1995). Recent progress in understanding the molecular genetics and biochemistry of calcium phosphate solubilization by Gram negative bacteria. *Biology, Agriculture and Horticulture*. 12(2), 185–193.
- Goltapeh, E. Mohammadi., Rezaee, Danesh Y.,, R, Prasad and A, Varma.(2008). Mycorrhizal Fungi: What We Know and What Should We Know? *Mycorrhiza*. Third Edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.3p.
- Gourinard ,Y.(1952).*Carte géologique de l'Algérie 1/50 000*.153,Oran, Service de la carte géologique de l'Algérie.
- Gyaneshware, P., Naresh,K.G., Parekh, L.J et Pool, P.S. (2002).Role of microorganisms in improving P nutrition of plants. *Plant and Soil*. 245(1), 83-93.
- Ha-Lin, Zhao., Yi-Rui, Guo ., Rui-Lian, Zhou., Sam, Drake.(2011). The effects of plantation development on biological soil crust and topsoil properties in a desert in northern China *Geoderma* .160(3), 367-372.
- Hazelton, P.A et Murphy, B.W. (2007). *Interpreting Soil Test Results: What Do All the Numbers Mean?* CSIRO Publishing, Collingwood.
- Hazledine, Saul., Jongho, Sun., Derin, Wysham., J. Allan, Downie., Giles, E. D. Oldroyd., Richard, J. Morris .(2009). Nonlinear Time Series Analysis of Nodulation Factor Induced Calcium Oscillations: Evidence for Deterministic Chaos? *PLoS ONE*. 4(8), p1.
- He ,X.H., Critchley, C., Bledsoe, C. (2003). Nitrogen transfer within and between plants through common mycorrhizal networks (CMNs), *Crit. Rev. Plant Sci*. 22, 531–567.
- Herisse, J.M.(2004).Biologie du sol, les microorganismes au service de la santé des plantes. *Green magazine n°08*.
- Hirsch, A.M. (1992). Developmental biology of legume nodulation. *New Phytol*. 122, 211–237.

- Hirsch, R.M., Slack, J.R. et Smith, R.A. (1982). Techniques of trend analysis for monthly water quality analysis. *Water Resource Research*.18 (1), 107–121.
- Hopkins, William G. (2003). Physiologie végétale. 2 édition américaine. Pp93-102.
- Jeddi, Kaouthar., Chaieb, Mohamed.(2010). Changes in soil properties and vegetation following live stock grazing exclusion in degraded arid environments of South Tunisia. *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*. 205(3), 184–189.
- Job, J.O., Gonzales Barrios, J.L et Gonzales, M. R. (1997). *Détermination précise de la salinité des sols par conductivimètre électromagnétique*. Coll. GEOFCAN « Géophysique des sols et des formations superficielles » Bondy. France.
- Jones, D.L. (1998).Organic acids in the rhizosphere –a critical review. *Plant soil*, 205(1), 25-44.
- Kapoor R., Bhatnagar, A.K. (2007). Attenuation of cadmium toxicity in mycorrhizal celery (*Apium graveolens* L.). *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 23,1083-1089.
- Khalvati AM, Hu Y, Mozafar A, Schmidhalter U. (2005). Quantification of water uptake by arbuscular mycorrhizal hyphae and its significance for leaf growth, water relations, and gas exchange of barley subjected to drought stress. *Plant Biol*. 7,706-712.
- Khan Towhid, O. (2013). Soils: Principals, Properties and Management. *Springer Dordrechi Heidelberg*: New York, London.143 p.
- Khosro Mohammadi, Yousef Sohrabi, Gholamreza Heidari, Shiva Khalesro and Mohammad Majidi. (2012). Effective factors on biological nitrogen fixation. *African Journal of Agricultural Research*. 7(12), 1782-1788.
- Kim, J., Rees, D.C. (1994). Nitrogenase and biological nitrogen fixation *Biochemistry*.33, 389-397.

- Kim, K.Y., Jordan, D et Krishnan, H.B (1997). *Rahnella aqualitis* abacterium isolated from soybean rhizosphere, can solubilize hydroxyl apatite. *FEMS Microbiology Lette.* 153(2), 273–277.
- Kosuta, S., Chabaud, M., Lougnon, G., Gough, C., DE'NARIE, J., BARKER, D.G et BE'CARD, G.(2003). A diffusible factor from arbuscular mycorrhizal fungi induces symbiosis-specific MtENOD11 expression in roots of *Medicago truncatula*. *Plant Physiology.* 131(3), 952-962.
- Kosuta, S., Hazledine, S., Sun, J., Miwa, H., Morris, R.J., Downie, J.A., et Oldroyd, G.E. (2008). Differential and chaotic calcium signatures in the symbiosis signaling pathway of legumes. *Proc.Natl. Acad. Sci. USA* .105, 9823–9828.
- Kumara, R., Abhisivar, S., Siende, S.T. (1974). Inhibition of groundnut *Rhizobium* in Indian Soils. *Proceeding of Indian National Science Academy.* 40B (5), 535-539.
- Langkamp, P.J(1987). *Germination of Australian native plant seed.* Melbourne, Australia: Inkata Press.
- Le gros, Jean-Paul. (2007). *Les grands sols du monde* .Presses polytechniques et universitaire Romande. Première édition. Pp 286-287.
- Lepoivre, P. (2003). *La lutte biologique en phytopathologie*, in phytopathologie. Bruxelles : Première édition , De Boeck Université. 33p.
- Linderman, R.G. (1988). Mycorrhizal interactions with the rhizosphere microflora: The mycorrhizosphere effect. *Phytopathology* .78, 366-371.
- Lindstrom, K.M., Murwira, A., Willems, N. Altier. (2010). « The biodiversity of beneficial microbe host mutualism: the case of rhizobia. ». *Research in Microbiology.* 161(6), 453-463.

- Liu, W., Xu, X., Wu, S., Yang, Q., Luo, Y et Christie, P.(2006). *Decomposition of silicate minerals by Bacillus mucilaginosus in liquid culture. Environ. Geochem. Health.*28(1-2), 133-140.
- Logi, Sbrana, Giovannetti. (1998). Cellular events involved in survival of individual arbuscular mycorrhizal symbionts growing in the absence of the host. *Applied environmental Microbiology.* 64,3473–3479.
- Lundquist, E. J., Scow, K. M., Jackson, L. E., Uesugi, S. L &Johnson C. R.(1999).Rapid response of soil microbial communities from conventional, low input and organic farming systems to a wet/dry cycle. *Soil Biology and Biochemistry*, 31 (12), 1661-1675.
- Luyten,E., Vanderleyden, J. (2000). *Eur. J. Soil Biol.* 36, 1–26.
- Mansouri, L.M. (2011).Production d'inoculum de *Rhizobium* nodulant *Acacia saligna* pour revégétaliser la carrière de Terga (Ain Témouchent). *Mémoire de magister. Département de biotechnologie. Université d'Oran es Sénia.*
- Marulanda, A., Azcon, R., Luiz-Lozano., J.M. (2003). Contribution of six arbuscular mycorrhizal fungal isolates to water uptake by *Lactuca sativa* plants under drought stress. *Physiol. Planta.*119, 526-533.
- Maslin, B. R et Mc Donald, M. W. (2004). *Acacia Search - Evaluation of Acacia as a woody crop option for southern Australia: Acacia saligna (Labill.) H. Wendl. Rural Industries Research and Development Corporation. Barton, ACT,* 204-214.
- Masson-Boivin, C., Giraud, E., Perret, X. and Batut, J.(2009). Establishing nitrogen-fixing symbiosis with legumes: how many rhizobium recipes? *Trends Microbiol.* 17,458-466.
- Mathieu C et Loz J. (1990) *.Dictionnaire de science du sol.* 2 eme édition. Lavoisier, 266 p.
- Michaelides, E.D. (1979). *Mini-monograph on Acacia cyanophylla.* Technical Consultation on Fast-Growing Plantation Broadleaved Trees for Mediterranean and Temperate Zones. Lisbon, Portugal, 16-20 October 1979. Rome, Italy: FAO.

- Midgley, S.J., Turnbull J.W et Pinyopusarek, K. (2003). Industrial *Acacias* in Asia: Small Brother or Big Competitor? In Wei, R.-P. and Xu, D. (eds) *Eucalyptus Plantations - Research, Management and Development, Proceedings. of International Symposium on "Eucalyptus plantations", Guangzhou/Zhaoqing, China, 1-6 September 2002.* Singapore.
- Milton, S.J., et A. V. Hall. (1981). Reproductive biology of Australian acacias in the southwestern Cape Province, South Africa. *Transactions of the Royal Society of South Africa* 44:465-487.
- Moat, A.G., Foster, J.W et Spector, M.P. (2002). *Microbial Physiology. 3 edition.* John Wiley and Sons, Inc. New York, New York. Pp 475-502.
- Moiroud, A. (1996). « Diversity and ecology of actinorhizal plants. ». *Acta Botanica Gallica* 143(7), 651-661.
- Morel, R. (1996). *Les sols cultivés (2ème édition).* Paris, Lavoisier.399 p.
- Morot-Gaudry, Jean-François. (1997). Assimilation de l'azote chez les plantes .Editeur : Inra
- Mureithi, Stephen, M., Ann, Verdoodt., Charles, K.K., Gachene., Jesse, Tnjoka.,Vivian O Wasonga, Stefaan De Neve ., Elizabeth, Meyerhoff., Eric ,Van Ranst.(2014). Impact of enclosure management on soil properties and microbial biomass in a restored semi-arid rangeland, Kenya. *J Arid Land* (2014) 6(5): 561–570. doi: 10.1007/s40333-014-0065-x
- National Academy of Sciences (NAS).(1980). *Acacia saligna.* In: *Firewood Crops; Shrubs and Tree Species for Energy Production* pp.100-101, Washington: National Academy of Sciences.
- Ofme. (2011).Sol acide? / Sol calcaire? Conséquences pour la forêt?.*Centre régionale de la propriété forestière, région PCA Fiche n° 273402.*

- Oldroyd, G.E. (2001). Dissecting Symbiosis: Developments in Nod Factor Signal Transduction. *Annals of Botany*. 87(6), 709-18.
- Olsson, N.P.A., Thingstrup, I., Jakobsen, I., Baath, E. (1999). Estimation of the biomass of arbuscular mycorrhizal fungi in a linseed field. *Soil Biology and Biochemistry*. 31(13), 1879–1887.
- Pacovsky, R.S., De Silva, P., Carvalho, M.T.V., Tsai, S.M. (1991). Growth and nutrient allocation in *Phaseolus vulgaris* L. colonized with endomycorrhizae or *Rhizobium*. *Plant Soil*. 132, 127–137.
- Paoletti, M.G. et Hassall, M. (1999). Woodlice (Isopoda: Oniscidea): their potential for assessing sustainability and use as bioindicators. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 74, 157–165.
- Parniske, M. (2008). Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. *Nat. Rev. Microbiol.* 6, 763–75.
- Pereira Alexandre, A, I. (2010). Temperature stress tolerance in chickpea rhizobia. *Thesis presented to obtain the PhD degree in biology. Université de Évora. Portugal*.
- Peres, G., Cluzeau, D., Curmi, P., Hallaire, V. (1998). Earthworm activity and soil structure., Peters, Elizabeth., Scot, Medbury., Elizabeth, Scholltz., Sigrum, Wolff., Saphir, Steave Clements., Craig, Cogger. (2009). *Healthy soils for sustainable gardens*. Brooklyn Botanic Garden. Inc. New York.
- Philipps, J., et Hayman, D.S. (1970). Improved procedure for clearing roots and staining plastic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 55, 545-554.
- Pousset, J. (2002). *Guide engrais vert et fertilité des sols* (2ème édition). Agrdécision, Groupe France Agricole (GFA). Pp 53-58.

- Pradipta, K.M. (2008). *Textbook of environmental Microbiology*. New Delhi (India), International Publishing House Pvt.Ltd .360 p.
- Ramanankierana, N., Ducouso, M., Rakotoarimanga, N., Prin, Y., Thioulouse, J., Randrianjohany, E., Ramaroson, L., Kisa, M., Galiana, A., Duponnois, R. (2007). Arbuscular mycorrhizas and ectomycorrhizas of *Uapaca bojeri* L. (Euphorbiaceae): sporophore diversity, patterns of root colonization, and effects on seedling growth and soil microbial catabolic diversity. *Mycorrhiza*. 17(3), 195-208.
- Randall, Scaetzel et Sharon, Anderson. (2005). *Soils genesis and geomorphology* .première édition. Combridge University Press.
- Redecker, D. (2000): Specific PCR primers to identify arbuscular mycorrhizal fungi within colonized roots. . *Mycorrhiza* 10: 73–80.
- Remigi, P., A, Faye., Kane, M., Deruaz, J., Thioulouse, M., Cissoko, Y., Prin, A. , Galiana ,B, Dreyfus et R, Duponnois.(2008). The Exotic Legume Tree Species *Acacia holosericea* Alters Microbial Soil Functionalities and the Structure of the Arbuscular Mycorrhizal Community. *Applied and environmental microbiology*. 74(5), 1485-1493.
- Rengel Z. (2002). *Role of pH in availability of ions in soil*. In: Rengel Z (ed) Handbook of plant growth. pH as a master variable in plant growth. Marcel Dekker, New York, pp 323-350.
- Reuter, D.J et Robinson, J.B. (1986). *Plant analysis : an interpretation manual*. First ed.: Melbourne : Inkata Press.
- Riou-Nivert, P. (2005). *Les résineux tome 2 : écologie et pathologie*, édition IDF (institut pour le développement forestier) : Paris, p 129.
- Rival, Pauline.(2013). *Coordination entre l'épiderme et le cortex dans l'établissement des endosymbioses racinaires chez Medicago truncatula : rôle du gène DMI3 codant une protéine kinase calcium et calmoduline dépendante*. Doctorat de l'université de Toulouse.

- Robert, M. (1996). *Le sol: Interface dans l'environnement, ressources pour le développement*. Paris, Milan, Barcelone: Masson.
- Rodriguez, H et R. Fraga. (1999). Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Advances in Biotechnology*.17(4-5), 319–339.
- Roger, P. et J.L. Garcia.2001. Intoduction à la microbiologie du sol. Laboratoire de microbiologie IRD institut de recherche pour le developpement IFR-BAIM institut fédératif de recherche en biotechnologie agro-industrielle de Marseille.16p, pp 34-36
- Rousk, Johannes., Erland, Baath., Philip,C. Brookes., Christian, L. Lauber., Catherine, Lozupone., J, Gregory. Caporaso., Rob, Knight et Noah, Fierer.(2010).Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil. *The ISME Journal*. 1–12
- Ruellan , A . , Blanchart, E. , Brauman A . , Grimaldi, M., Grünberger, O., Barbiero, L Chaplot,V. , Monga,O., Bernoux,M.(2008).*Les sols, des milieux vivants très fragiles*. Les dossiers thématiques de l'IRD.
- Ryan, J., Estefan, G et Abdul Rachid. (2001). Soil nutrients, sodium and anion analysis: potassium. *Soil and plant Analysis laboratory Manual* (Second edition). Aleppo, Syria: International center of agriculture research in the dry areas (ICARDA).93p.
- Saad, A. (2012). Influence du changement climatique et des conditions extrêmes sur les massifs fracture. Rôle des fluides dans leur processus d'altération. *Thèse de doctorat Géotechnique.Université Paris-Est, Ecole Doctorale Sciences, Ingénierie et environnement*.
- Salazara Miguel., Angela, Bosch-Serraa., Germán, Estudillosa et Rosa, Maria Pocha. (2009). Rehabilitation of Semi-Arid Coal Mine Spoil Bank Soils with Mine Residues and Farm Organic By-Products. *Arid Land Research and Management* .23(4), 327-341.
- Salomon, J.N. (2006).*Précis de Karstologie* (2eme édition). France, Presses Universitaires de Bordeaux : Pessac édition .285 p.

- Sanchez, F., Padilla, J.E., Hector, P et Lara, M.(1991).Control of nodulin genes in root nodule development and metabolism. *Annu. Rev. Plant Physiol .Plant Mol. Biol.* 42,507-528.
- Sawada, H. et al.(2003). Changing concepts in the systematics of bacterial nitrogen-fixing legume symbionts. *J. Gen. Appl. Microbiol.* 49, 155–179.
- Schreiner, R.P., Bethlenfalvay, G.J (1995). Mycorrhizal interactions in sustainable agriculture. *Critical Reviews in Biotechnology.* 15, 271-285.
- Schultze, M et Kondorosi, A. (1998). Regulation of symbiotic root nodule development. *Annu. Rev. Genet.* 32, 33-57.
- Schüßler, A., Schwarzott, D. et Walker, C. (2001). A new fungal phylum, the *Glomeromycota*: phylogeny and evolution. *Mycol. Res.* 105(12), 1413-1421.
- Selosse, M-A. et Le Tacon F. 1998. *The land flora: a phototroph–fungus partnership? Tree.* vol. 13, no. 1.
- Selvaraj, K., Ram Mohan, V., Szefer, P. (2004).Evaluation of metal contamination in coastal sediments of the Bay of Bengal, India. *Geochemical and statistical approaches Marine Pollution Bulletin.* 49, 174–185.
- Selvaraj, T. (1998). Studies on mycorrhizal and rhizobial symbioses on tolerance of tannery effluent treated *Prosopis juliflora*. *Ph.D. thesis, University of Madras, Chennai, India,* 209 p.
- Sieberer, B.J., Chabaud, M., Timmers, A.C., Monin, A., Fournier, J. and Barker, D.G. (2009)* A nuclear-targetedameleon demonstrates intranuclear Ca²⁺ spiking in *Medicago truncatula* root hairs in response to rhizobial nodulation factors. *Plant Physiol.* 151, 1197–1206.

Sieberer, B.J., Chabaud, M., Timmers, A.C.J., Fournire, J. and Barker, D.G. (2012). A switch in Ca²⁺ spiking is concomitant with endosymbiotic mi-crobe entry into cortical root cells of *Medicago truncatula*. *Plant J.*69, 822–830.

Smith, S.E, Read, D.J. *Mycorrhizal symbiosis. 3rd edn. Academic Press; 2008.*

Souty-Grosset, C., Badenhauer, I., Reynolds, J.D., Morel, A.(2005). Investigations on the potential of woodlice as bioindicators of grassland habitat quality. *European Journal of Soil Biology.* 41, 109–116.

Spanu, P et Bonfante-Fasolo, P.(1988). Cell-wall-bound peroxidase activity in roots of mycorrhizal *Allium porrum*. *New Phytol.*109, 119-124.

Speber, JI. (1958). Solution of apatite by soil microorganisms producing organic acids. *Aust J.Agron.Res.*9.782-787.

Sprent, J.I., Parsons, R. (2000). *Field Crops Research.* 65(2), 183-196.

Sprent, J.L.(1989).Which steps are essential for the formation of functional legume nodules? *New phytol.*11,129-153.

Steenwerth, K. L., Drenovsky, R. E., Lambert, J. J., Kluepfel , D. A., Scow, K. M. & Smart D.R.(2008). Soil morphology, depth and grapevine root frequency influence microbial communities in a Pinot noir vineyard.*Soil Biology and Biochemistry,* 40(6), 1330-1340.

Sundara Rao, W.V.B et M.K, Sinha. (1963). Phosphate dissolving organisms in soil and rhizosphère .*Indian J.Agric.Sci.*33,272-278.

Thomas,G.(1985). Géodynamique d'un bassin intra montagneux. Le bassin du bas du Chélif occidental (Algérie) durant le Mio-Plio-Quaternaire .*thèse es-science., Pau,* 594 p.

Tillard,P et Drevon,J.J. (1988). Nodulation and nitrogenase activity of chickpea cultivar inoculated with different strains of *rhizobium ciceri* .*Agronomy.*17, 429-441.

- Timmers, A. C., Auriac, M. C. and Truchet, G. (1999). Refined analysis of early symbiotic steps of the Rhizobium -Medicago interaction in relationship with microtubular cytoskeleton rearrangements. *Development*. 126, 3617-3628.
- Tinker, P.B.(1980). The role of phosphorus in plants. in the role of phosphorus in Agriculture , edt Kwasaneh F et sample E., pp 617-654.Madison , WI: American society of Agronomy.
- Tisdall, J.M.(1991). Fungal hyphae and structural stability of soil. *Australian Journal of Soil Research*. 29,729-743.
- Ullman, W.J., Kirchman, D.L et Welch, W.A.(1996). *Laboratory evidence by microbioally mediated silicate mineral dissolution in nature*. *Chem. Geol.* 132(1-4), 11-17.
- USDA, ARS, 2010. Taxon: *Acacia saligna* (Labill.) H. L. Wendl. National Genetics Resources Program. Germplasm Resources Information Network - (GRIN) [Online Database].
- Van Lidth de jeude, J.(2004). *Identification des dégâts causé aux cultures par les maladies*. Première édition : édition Fondation Agromisa , Wageningen , p 71.
- Van Spronsen, P.C., Bakhuizen, R., Van Brussel, AAN., Kijne, JW. (1994). Cell wall degradation during infection thread formation by the root nodule bacterium *Rhizobium leguminosarum* is a two step process. *Eur J Cell Biol.* 64, 88–94.
- Vasant, G ., Krichnamurthy, V.N ., Sudha , G ., Manik , D et Paranjape, K.(2009) . *The fertilizer encyclopedia*. New Jersey:John Wiley and Sons edition.11p.
- Vernié, T., Moreau, S., de Billy, F., Plet, J., Combier, J.P., Rogers, C et al. (2008). EFD Is an ERF transcription factor involved in the control of nodule number and differentiation in *Medicago truncatula*. *Plant Cell*.20, 2696–2713.
- Vijn I, das Neves L, van Kammen A, Franssen H, Bisseling T. (1993). Nod factors and nodulation in plants. *Science* .260, 1764– 1765.

- Vincent, J.M. (1980). *Factors controlling the legume-Rhizobium symbiosis*. In WE Newton,WH Orme-Johnson, eds, Nitrogen Fixation II. University Park Press, Baltimore, MD, pp 103-109 .
- Vincent,I.M. (1970).*A manual for the practical of root- nodule bacteria* .Oxford and Edinburg: Blackwell scientific publication.
- Walligora, C. (2010).*Racines et sol : un monde de communications et d'équilibres. Techniques culturales simplifiées,n°57.*
- Werner D et Newton WE. (2005). *Nitrogen fixation in agriculture, forestry, ecology and environment*. Springer, Netherlands.
- Wierchos, J., De Los Rios, A., Sancho, L. G., Green, A., Ascaso, C. (2003). The integrated microscopical study of Antarticendolithic microorganisms and their microhabitats.In: *Antartic Biology in a Global Context*. Leiden Huiskes , A.H.L., Gieskes, W.W.C., Rozema , J., Schorno , R.M.L., Van der Vries , S.M., Wolff, W.J, pp 152-156.
- Williamson, Joey. (2012). *Changing the pH of Your Soil*. HGIC Horticulture Extension Agent, Clemson University.
- Wood, Alan. R., Morris, Michael. J. (2007). Impact of the gall-forming rust fungus *Uromycladium tepperianum* on the invasive tree *Acacia saligna* in *South Africa*: 15 years of monitoring. *Biological Control*. 41(1), 68-77.
- Yolande, Dalpé.(2005). Les mycorhizes : un outil de protection des plantes mais non une panacée .*Phytoprotection*. 86(1), 53-59.
- Yong, Zhong. Su., Xue, Fen Wang., Rong., Yang., Jaehoon, Lee.(2010). Effects of sandy desertified land rehabilitation on soil carbon sequestration and aggregation in an arid region in China. *Journal of Environmental Management* . 91(11), 2109–2116.

Zahran, H.H. (1999). Rhizobium-legume symbiosis and nitrogen fixation under severe conditions and in an arid climate. *Microbiology and molecular biology reviews*, 63(4), 968–989.

Zhang, Hao., Chu, L.M.(2011). Plant community structure, soil properties and microbial characteristics in revegetated quarries. *Ecological Engineering*. 37(8). 1104–1111.

Références internet :

Agriinfo.in. (2011). *Soil Textural Classes. Introduction to soil science-My agriculture Information Bank.*

<http://www.agriinfo.in/default.aspx?page=topic&superid=4&topicid=266>

AgSource Laboratoire. (2006). *Understanding a soil analyses .Soil Analysis–AgSource Cooperative service.*

<http://agsource.crinet.com/page2903/UnderstandingASoilAnalysis>

Blamire, J. (2003) .*e-Learning for Quantitative analysis: Kjeldahl Method.* Science a distance

http://www.brooklyn.cuny.edu/bc/ahp/SDKC/Chem/SD_KjeldahlMethod.html

Burdass, D. (2002). *Rhizobium, Root Nodules et Nitrogen Fixation.* Society for general microbiology . *A post 16-resource*, Society for General Microbiology, U.K.

<http://biblio.telug.uqam.ca/LinkClick.aspx?fileticket=BBFPnTAWTnI=>

Carrier, A. (2003). *Que passe-t-il dans le sol ? serriculture maraîcher biologique : Agriculture, pêcheries et alimentation, P02.*

<http://www.agrireseau.qc.ca/legumesdeserre/Documents/QUE%20SE%20PASSE-T-IL%20DANS%20SOL%20%28AC%29%20-%2003-03-31.PDF>

COG Organic Field Crop Handbook. (1992). *The soil ecosystem. Soil chemistry (fertility): organic matter and humus.* Canadian Organic Growers. Inc,

http://eap.mcgill.ca/MagRack/COG/COGHandbook/COGHandbook_1_3.htm

- Cruyppenninck, Philippe.(2013) .Les mycorhizes, pour quels bénéfices ?
<http://jejardine.org/images/stories/Paris-art2.pdf>
- Dechamplain, Nadia (PISTES) et Gosselin, Lyne, (CRBF). (2002). *Les champignons mycorhiziens*. Centre de recherche en biologie forestière (CRBF)
<http://www.truffiere.org/mycorhizes.pdf>
- Drouet, Th.(2011).*Pédologie*. BING-F-302
[http://student.ulb.ac.be/~fcraddoc/pedologie drouet partie 1.pdf](http://student.ulb.ac.be/~fcraddoc/pedologie/drouet%20partie%201.pdf)
- Fortin, D. (2011).*Chapitre3: Les cycles biogéochimiques: carbone et azote*
<http://www.courseweb.uottawa.ca/evs3520/Data/Chapitre03.pdf>
- Gasser, M.O. (2011).*Variabilité temporelle dans les analyses de sols. Comité ad hoc échantillonnage des sols Drummondville* : institut de recherche et de développement en agroenvironnement(IRDA).Québec
[http://www.craaq.qc.ca/UserFiles/File/Comites/Adhoc_echantillon champ/Gasser 24 02 2011 PPT.pdf](http://www.craaq.qc.ca/UserFiles/File/Comites/Adhoc_echantillon_champ/Gasser_24_02_2011_PPT.pdf)
- Giasson, Philippe et Jaouich, Alfred. (2008). *Les Propriétés Physiques du Sol*. Première partie texture et structure.
http://www.banque-pdf.fr/fr_caracteristique-phisique-du-sol.html
- Graham, P et Allan, D. (2002). *Symbiotic Nitrogen Fixation: The Symbiosis between Legumes and Rhizobia* .Course on line, department of soil, water and climate: University of Minnesota.
[http://www.soils.umn.edu/academics/classes/soil3612/Symbiotic Nitrogen Fixation/Environmental.htm](http://www.soils.umn.edu/academics/classes/soil3612/Symbiotic_Nitrogen_Fixation/Environmental.htm)
- Hill Laboratories.(2014). *Soil tests and interpretation*.
<http://www.hill-laboratories.com/file/fileid/15530>

Hodjes, S.C. (2000). *Methods of Phosphorus Analysis for Soils, Sediments, Residuals, and Waters*. Southern Cooperative Series Bulletin n°396. Publishing Institution: North Carolina State University.

http://www.sera17.ext.vt.edu/Documents/Methods_of_P_Analysis_2000.pdf

Horneck, D.A., Sullivan, D.M., Owen J.S et Hart, J.M. (2011). *Soil Test Interpretation Guide*. Oregon state university, Extension service.

http://extension.oregonstate.edu/sorec/sites/default/files/soil_test_interpretation_ec1478.pdf

Hoskins, B.R. (1997). *Formerly "Soil Testing Handbook for Professional Agriculturalists"*. Soil testing handbook for professionals in agriculture, horticulture, nutrient and residuals management. Third edition, Maine Forestry and Agricultural Experiment Station : University of Maine.

http://anlab.umesci.maine.edu/soillab_files/faq/handbook.pdf

Fuchs, Jacques, G., Herisse, Jean-Michel. (1999). *Fertilité des sols : Les produits biologiques: bien les connaître pour mieux les utiliser*. biophyta : Institut de recherches et de consultations en agronomie et écologie appliquées.

http://www.biophyt.ch/documents/cours_paris.pdf

Lianes, Cathrine. (2011). Cycles biogéochimiques bactéries du sol.

http://bacterioweb.univ-fcomte.fr/bibliotheque/M1BBCM/Cycles_biogeochimiques_Bacteries_du_sol.pdf

Massenet, Jean. Yves. (2003). *Cours de pédologie*, chapitre V chimie du sol.

<http://jymassenet-foret.fr/cours/pedologie/PEDO5.pdf>

McCauley, A., Clain, Jones., Jeff, Jacobsen. (2009). *Soil PH and organic matter*. A self –study course from MSU extension continuing, Education series, *Nutrient management* module N°8, Montana State University Extension 4449-8

<http://landresources.montana.edu/NM/Modules/Module8.pdf>

Mhiri, A. (2002). *Le potassium dans les sols de Tunisie*. Atelier sur la gestion de la fertilisation potassique, Acquis et perspectives de la recherche. Institut National Agronomique de Tunisie.

<http://www.ipipotash.org/udocs/LE%20POTASSIUM%20DANS%20LES%20SOLS%20DE%20TUNISIE.pdf>

Oryschak, M., Chrapko, D., Nicole, Huggins-Rawlins, N., Jones, S., Korth, C., Kryzanowski L., Neden, J., Pauly, D., Tremblett, K. et Wallace, T. (2013). *The Nutrient Management Planning Guide for Alberta*. Nutrient management planning Guide.

[http://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdocs.nsf/all/epw11920/\\$FILE/nutrient-management-planning-guide.pdf](http://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/epw11920/$FILE/nutrient-management-planning-guide.pdf)

Rosen, Carl J., Bierman, Peter M., et D. Eliason Roger. (2008). *Soil pH Modification*. Department of Soil, Water, and Climate. University of Minnesota.

<http://www.extension.umn.edu/garden/yard-garden/soils/soil-test-interpretations-and-fertilizer-management/#ph-modification>

SITI. (2013). Système d'Information Taxonomique Intégré Amérique du Nord *Acacia saligna*.

http://www.cbif.gc.ca/pls/itisca/next?v_tsn=182091&taxa=&p_format=&p_ifx=&p_lang=fr

UNIFA (Union des industries de la fertilisation). (2010). Ferti-pratiques ,Magnésium de la plante à l'animal .Fiche N° 19.

http://www.unifa.fr/fichiers/ferti-pratiques/ferti-pratique_19.pdf

USDA (United States Department of Agriculture). (1998). *Soil Quality Indicators: pH*. Natural Resources Conservation Service, Soil Quality Information Sheet.

<http://soils.usda.gov/sqi/publications/files/indicate.pdf>

Whiting, David., Card, Adrian et Wilson, Carl. (2011). *Soil pH*. Colorado State University Extension

http://www.eaglecounty.us/CSU/Documents/Horticulture_Docs/222_Soil_pH_Garden_Notes/

Zinsou, C. (2013). Cours de métabolisme. *Métabolisme de l'azote et de l'ammoniac*

<http://calamar.univ-ag.fr/deugsv/Documents/Cours/Bioch-Zinsou/%20Azote.pdf>

Article scientifique

Clicours.com

Bio-Revegetation Impact on the Physicochemical Characteristics of a Sandy Quarry Soil in Terga Beach Region in Algeria

Amina. A. Mouffak¹, Hassini. Tsaki¹, Adalkader Bekki² & Laid Krabia³

¹Laboratoire d'éco-pédologie, University of Oran, Departement of Biology, Oran, Algeria

²Laboratoire de Biotechnologie des Rhizobiums et Amélioration des Plantes, University of Oran, Department of Biotechnology, Oran, Algeria

³Institut National des Sols, de l'Irrigation et du Drainage El-Matmar, Relizane, Algeria

Correspondence: Amina.A. Mouffak¹, Laboratoire d'écopédologie, University of Oran, Departement of Biology, BP1524, El Menaouer, Oran, Algeria. Tel: 213-774-577-602. E-mail: fafaanima@gmail.com

Received: December 28, 2013 Accepted: March 14, 2014 Online Published: May 15, 2014

doi:10.5539/jas.v6n6p155

URL: <http://dx.doi.org/10.5539/jas.v6n6p155>

Abstract

In order to define the impact of a bio-revegetation effect on soil physicochemical properties, we used *Acacia Saligna* in variants with bio-fertilizers such as rhizobia and mycorrhizae that play a key role in the productivity and sustainability of soil as well as the environmental protection. The area of study is a degraded sandy quarry in Terga, a coastal semi-arid area located in the northwestern part of Algerian. Our sampling and analysis of soil were made after each trimester of experiments in the fields, using four blocks, each one containing ten plots. Sampling is a composite of soil that was made in each plot diagonally on a depth of 10 cm and a diameter of 30 cm from the plant, at different times: first trimester (3 months), second (6 months), and third (9 months). Preliminary results showed a real and favorable modification of substrates by obtaining materials with less alkaline pH, there is a significant phosphorus increase in the second and third trimester compared to the first trimester, however the soil calcareous nature prevents the expression of some parameters resulting in a small improvement in total nitrogen and a deficiency in both exchangeable magnesium and organic matter.

Keywords: sandy quarry, revegetation, *Acacia Saligna*, rhizobia and mycorrhizal inocula, total nitrogen, available phosphorus

Abbreviations

Myc: Single endomycorrhizae inoculation. Con: control.

S10, S14, S24: Single Rhizobial inoculation.

D10, D14, D24: Dual Rhizobial + Endomycorrhizae inoculation.

Mix: mixed Inoculation with the 3 rhizobial strains (S10+S14+S24) + endomycorrhizae.

CT: Total limestone, CA: active limestone, Ca: exchangeable calcium, Mg: exchangeable magnesium.

P: available phosphorus, N: total nitrogen.

T1, T2, T3: first trimester, second trimester, third trimester.

1. Introduction

The soil is the living epidermis of earth, at the interface between the atmosphere, rocks and the living world. It is the meeting point of the plant world, animal and mineral that provides primary production on which human population, flora and fauna depend directly. Soil participates in the great cycles of energy, water and elements (Robert, 1996). It is essential to human activities and the functioning of terrestrial ecosystems. The soil is no longer considered an inert medium. It evolves in space and time. This development gives it variability in its morphological, physical, chemical and biological properties (Collin, 2006). However; it stays a nonrenewable resource because of the long time required for its formation process. Therefore, its preservation and restoration by biological and non-aggressive means to the environment is a major challenge of sustainable development.

In order to re-vegetate a degraded sandy quarry located in Terga (Province of Ain Témouchent in northwest Algeria), *Acacia saligna* plants with rhizobia (nitrogen fixing symbiont) and mycorrhizal inocula were used.

Originally from Australia *Acacia saligna* is a nitrogen-fixing legume, introduced in Algeria, which is characterized by rapid growth and tolerance to drought, salinity and alkalinity; despite the fact that it has a short life varying between 10 and 20 years (Maslin & McDonald, 2004). However, microbial inocula or bio-fertilizers that have been used on an experimental basis in the soil can be defined as a preparation containing live and efficient microbial cells whose role is to increase the number of these microorganisms, and accelerate microbial processes, thus increasing the assimilation of some plant nutrients such as nitrogen and phosphorus. The goal of our work is to investigate the impact of this bio-revegetation on the soil edaphic aspects over time.

2. Materials and Methods

2.1 Study Area

The experimental study site, chosen according to its highly degraded character of quarry pit-end operating land, was located in the town of Terga, which extended over an area of 65.07 km² (average central location at latitude 35°25'07" North and Longitude 1°10'39" West). It covered an area of 120ha located at the mouth of the Oued El Malah, about 7 km from Terga village (Province of Ain Témouchent). The average altitude of this vast terrace, gently sloping towards the sea, was between 200 and 400 m (Figure 1).

a. Detailed view :

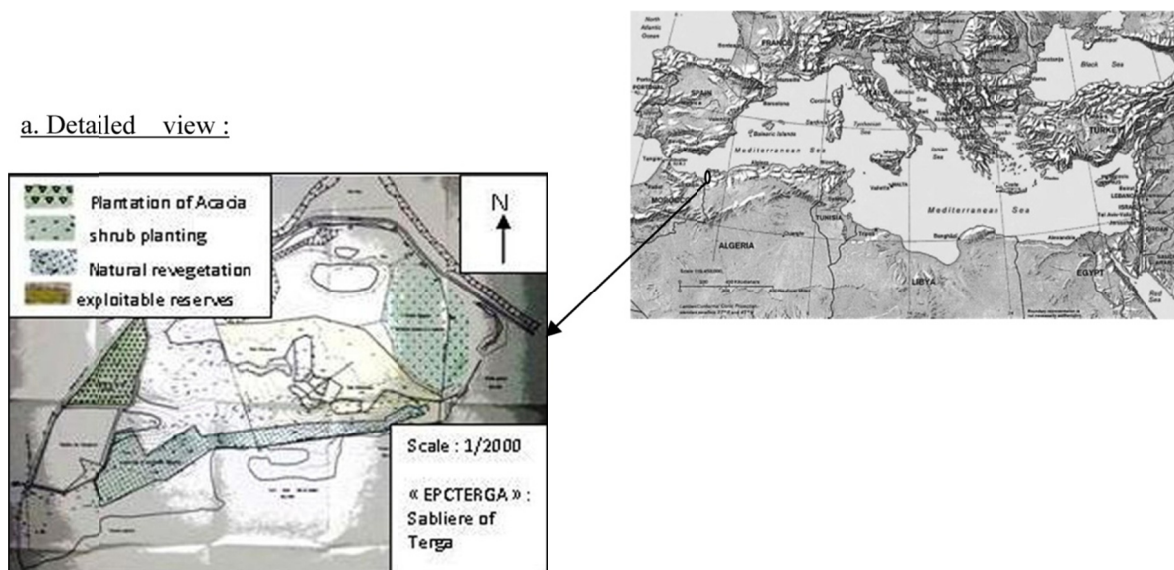


Figure 1. Map location of the study area (scale: 1/19.450.000; detail:1/2000)

2.2 Re-Vegetation Site

The experimental site of the old quarry revegetation contained four blocks, each containing ten plots: A non *Acacia Saligna* plot (bare soil), an *Acacia Saligna* plot (control), three plots of *Acacia saligna* with single rhizobial inoculation with three selected strains: S10, S14 and S24 based on their efficiency *in vitro*, a plot of *Acacia saligna* with single mycorrhizae inoculation (Myc), three plots of *Acacia Saligna* with dual inoculation rhizobial strain S10, S14, S24 + mycorrhizae (D10, D14, D24), and finally a plot of *Acacia Saligna* with mixed inoculation S10+S14+S24+ mycorrhizae (Mix). The layout of all plots and blocks is shown Figure 2.

2.3 Materials

2.3.1 The Rhizobial Strains

The bacterial strains were isolated from nodules of *Acacia Saligna* of 6 plants *in natura* from Terga area. Each nodule was washed successively with water and then disinfected in sodium hypochlorite 12% for 1 min and then rinsed 10 times with sterile distilled water. Nodules were crushed under aseptic conditions on YMA medium. However, purification of colonies was obtained after a study of their phenotypic characteristics. Afterward, the best and efficient strains were got via nodulation test and abiotic factors test (Temperature, pH, salinity) (Mansouri, 2011).

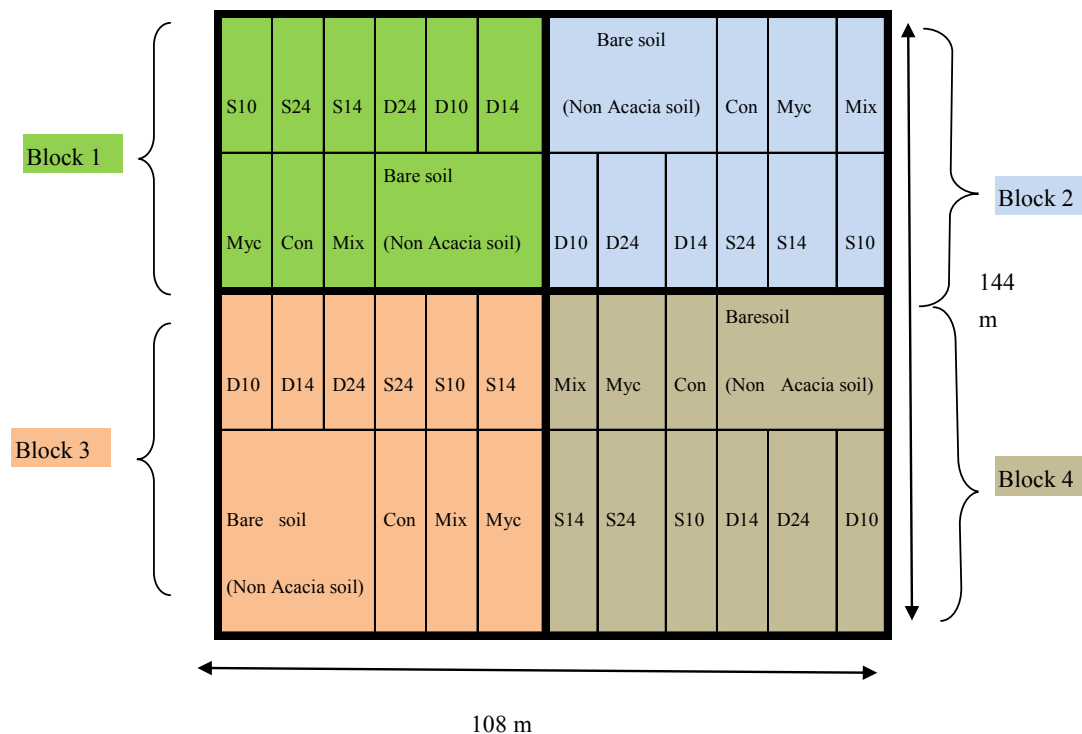


Figure 2. Presentation of the device to test plots distributed in complete blocks in total randomization

2.3.2 Inoculum Preparation

An isolated colony was inoculated in an Erlenmeyer flask of 500 ml containing 100 ml of (YMA) broth which was already sterilized at 120° C for 20 min (Vincent, 1970). After 5-7 days of incubation, 100 ml of each inoculum containing about 30×10^8 bacteria/ml was transferred into a 2 L erlenmeyer flask filled up to 1 L to allow aeration of medium during agitation (Mansouri, 2011).

2.3.3 Test Nursery Inoculation

Acacia Saligna seeds were already scarified with H_2SO_4 for 90 min, after they were rinsed with sterile distilled water and then germinated in water agar 0.8% (Tillard & Drevon, 1988). After 6 days, seeds were transplanted into plastic bags and then transferred to nursery. The soil used was composed of 25% of the career's sand and 75% of peat (Mansouri, 2011). Each 5 ml of a pure culture of rhizobia containing approximately 30×10^8 bacteria/ml was used in the soil at the collar when transplanting. One week after the seedlings, plantlets received a second inoculation (Diouf et al., 2003; Mansouri, 2011).

2.3.4 Mycorrhizal Inoculums Preparation

Acacia Salina fresh roots were collected from 7 trees of *Acacia Salina* in Terga town and 7 other trees in the city of Oran. At each site (Terga and Oran) samples of fine roots were removed from *Acacia Saligna* root system, and then they were well washed, then submerged in a 20% KOH solution for 20 min at 90°C. They were then thoroughly rinsed with water and soaked in a 1% HCl solution for 5 minutes. Roots were then stained in a solution of 0.1% trypan blue in lactophenol for 20 minutes (Philipps & Hayman, 1970). About 50 random fragments of roots thus treated were cut to pieces of about 1cm length and compacted between slides and layers. Fragments were then observed under a light microscope 10x40 to estimate the endomycorrhizal frequency (Mansouri, 2011).

2.3.5 Nursery Inoculation Tests

Roots mycorrhization whose frequency rate was 100% were used, an application of about 1g of fresh endomycorrhizal roots against each of the root system at the time of transplanting plantlets (Mansouri, 2011). After 8 months of warehousing in the nursery, the plantlets were transferred to the field (Mansouri, 2011).

2.4 Sampling

Sampling is a composite of soil (from reworked materials) that was made in each plot diagonally on a depth of 10 cm and a diameter of 30 cm from the plant at different times T1 (3 months), T2 (6 months), and T3 (9 months)

(Figure 3). The soil is dried in the open air for a week and then crushed and sieved through a diameter of 2mm to obtain the fraction of fine soil to perform a set of physico-chemical analysis.



a. Seedlings of *Acacia Saligna*, the planting day(T0) c. *Acacia Saligna*, 6 months after planting (T2)



b. *Acacia Saligna*, 3 months after planting (T1) d. *Acacia Saligna*, 9 months after planting (T3)

Figure 3. Re-vegetation sites at different trimester after plantation T0, T1, T2, T3

2.5 Physical Analysis

2.5.1 pH Measurement

About 20 g of soil was weighed, 50 ml of boiled distilled water was added to it and the mixture was stirred vigorously for 2 hours. The content of the beaker was abandoned then the pH is measured using a pH meter after a brief agitation (Aubert, 1978).

2.6 Chemical Analysis

2.6.1 Identification of Organic Matter by Calcination

The soil sample was dried overnight (16 hours) at 150°C. The crucible was cleaned by heating to red then was cooled in a desiccator for 10 minutes. The empty crucible was weighed, then 10 g of dried soil was added and the final weight was recorded. Afterward, the soil was calcined in a muffle furnace at 375°C for 16 hours. Finally the crucible containing the ashes was cooled in a desiccator and weighed (Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 2003).

2.6.2 Measurement of Total Limestone Content by the Bernard Calcimeter

1 g of soil was weighed, and then 5 ml of HCl $\frac{1}{2}$ was introduced into the Bernard calcimeter finger. Next, the soil amount was weighed, and entered into the calcimeter vial after moistening it a little. The vial was closed by connecting to calcimeter, while the liquid of the graduated scale had to beat zero. The flax was then stirred to allow the mixture of the soil with HCl. This agitation resulted in the release of CO $_2$. When the liquid level was stable the CO $_2$ volume was read. The calcimeter was calibrated with pure anhydrous CaCO $_3$ (Aubert, 1978).

2.6.3 Measurement of Active Limestone Content by Drouineau – Galet Method

250 ml of ammonium oxalate 0.2 N was added to 10 g of soil, the content was stirred for 2 hours and was filtered. In a 100 ml beaker, 10 ml of the filtrate was poured as well as 10 ml H $_2$ SO $_4$ 1/10. The beaker was placed in an oven at a temperature of 60°C, afterward it was placed on a magnetic stirrer surmounted by a buret containing potassium permanganate solution N/10. The permanganate was titrated until we obtained a persistent pink color. n was the

number of milliliters of KMnO_4 poured. In the same way 10 ml of solution of ammonium oxalate was titrated, N was the number of milliliters of KMnO_4 poured for control (Aubert, 1978).

2.6.4 Measurement of Total Nitrogen Content by the Kjeldahl Method

1 g of the soil was weighed and was put into a digestion flask containing 12-15 ml of concentrated sulfuric acid (H_2SO_4), then 7g of potassium sulfate and a catalyst as Copper were added, the digestion was brought to a "rolling boil" (370°C to 400°C) and the mixture was heated until white fumes could be seen; then 250 ml of water was added. The pH mixture was increased, with 45% NaOH solution, so the ammonium (NH_4^+) ions were converted to ammonia (NH_3), which was a gas that was distilled and then trapped in a special solution of about 15 ml HCl in 70 ml of water. Afterward, an indicator color was added to the trapping solution showing an important amount of trapped acid was still present. Afterward, a standard solution of NaOH was put into the buret and the trapping acid solution was titrated with the sodium hydroxide solution (Blamir, 2003).

2.6.5 Measurement of Absorbed Phosphorus by the Olsen Method

1 g of soil was put into a 50 ml erlenmeyer flask, then 20 ml of extracting solution was added to each flask which was shaken at 200 rpm or more for 30 minutes at a room temperature, afterward extracts were filtered through Whatmann filter paper # 42, then phosphorus was analyzed by colorimetry or inductively coupled plasma emission spectroscopy using a blank and standards prepared in the Olsen P extracting solution (Hodges, 2000).

2.6.6 Identification of Exchangeable Cations (Ca^{2+} , Mg^{2+}) by Atomic Absorption Spectrophotometry

10 g of soil was poured into a tube percolation mixing soil with a defined amount of quartz sand, after the bulb tube surmounting the percolation was filled of 500 ml ammonium acetate (77.08 g/l). The percolation took place during about 8 hours. Then percolate was collected into a 500 ml flask. Finally, the percolating was up to 500 ml with a solution of ammonium acetate (Aubert, 1978).

The Measurement of calcium rates was done by establishing a calibration range of 0, 4, 8, 12, 16 and 20 ppm from Ca^{+2} (40 ppm) solutions. The extract solution was diluted to obtain a concentration of less than 20 ppm (Aubert, 1978). The measurement of magnesium rates was done by establishing a calibration range of 1, 2, 3, 4 and 5 ppm from magnesium solutions (20 ppm) each complete 100 ml flask, with distilled water (Aubert, 1978).

2.7 Statistics Analysis

The average concentrations of various parameters analyzed are affected by an analysis of variance using the Fisher's exact test at $P=5\%$ using the software SPSS 8.0 for windows.

3. Results and Discussion

We note that the non re-vegetated plots recorded an increased pH values over time: the reported T1 (summer) pH is lower than that of autumn (T2) which is lower than that of winter (T3) (Figure 4.a). There is a significant increase of pH ($p<0.05$) in T2 compared to T1 on control plots (8.37 compared to 8.04), S14 (8.46 compared to 7.99), D10 (8.52 compared to 8.06), D14 (8.43 compared to 8.04), D24 (8.65 compared to 7.97). There is also a significant increase of pH ($p<0.05$) in T2 compared to T3 on the plots: D10 (8.52 compared to 8.05), D14 (8.43 compared to 8.09) and D24 (8.65 compared to 8.13). Moreover, there is a significant pH decrease at $p<0.05$ in T3 on the plots of D10 and D14 relative to the non Acacia plots (8.05, 8.09 compared to 8.29). In fact, these results are closely related with the seasonal variations in pH, since pH rates decrease in hot dry weather and increase in rainy and cold weather (Gasser, 2011). However, the decrease in pH levels in T3 under a vegetative cover may be due to a release of protons (H^+) during the uptake of cations by roots (Bye, 1999). In addition, the root exudates may indirectly lead to a decrease in pH because it stimulates the proliferation of soil microorganisms that synthesize organic acids and thus acidifies the soil (Davet, 1996; Waligora, 2010). The activity of soil microorganisms also depends on the temperature, moisture and soil texture (Lundquist et al., 1999; Steenwerth et al., 2008). Nevertheless, it was observed in laboratory conditions that rhizobia decreases soil pH; while Bradyrhizobia trends to increase it (Dubey, 2011). It was found however that the pH is a significant factor that affects the nodulation in soils mines with a high rate of nodulation at a pH which is between 5.5 and 7.2 and a low rate to a pH below 5.5 (Zahrn, 1999). Meanwhile, alkaline soils with a pH greater than or equal to 7.8 limit accessibility to Iron, Zinc, Manganese and mainly Boron and Phosphorus in soil, thereby reducing the Nitrogen fixation (Graham & Allan, 2002)

We found, a deficiency of exchangeable Magnesium for every plot at various times (T1, T2, T3) (Figure 4.b), with rates well below the standards that vary between 10% and 20% (Reuter et al., 1997). In fact, an excess of Calcium causes a Magnesium deficiency. However, an excess of Potassium inhibits the absorption of magnesium (Pousset, 2002). Erosion could also be one of the main causes of magnesium deficiency (Boyer, 1978). Thus, the soil is moderately calcareous (Figure 4.c), however, there is a significant decrease at $p<0.05$ in the total content of

limestone at T2 in S14 plots (15.32%) compared to bare soil (18.55%) and a significant increase ($P < 0.05$) at T3 in D24 plots (19.22%) compared to non Acacia plots (18.45%). Similarly, we recorded a significant increase ($p < 0.05$) at T2 and T3 compared to T1 in Myc plots (18, 12, 12% and 19% compared to 12.83%) and mix (18.9% and 18.77% compared to 13.15%) and a significant increase ($p < 0.05$) at T3 compared to T1 in S14 plots (19.1% compared to 14.53%).

This limestone provides divalent calcium Ca^{2+} that is present especially in the colloid as an exchangeable cation which is the form used by plants (Khan Towhid, 2013). The Calcium content at T2 increases significantly ($p < 0.05$) in D24 plots compared to control and non Acacias plots (88.98 meq/100g compared to 50.1 meq/100 g and 50.23 meq/100g). There is also a significant increase ($p < 0.05$) in T2 compared to T1 in S14 plots (63.63 meq/100g compared to 17.93 meq/100g), D24 (88.98 meq/100g compared to 24.75 meq/100g); and mix plots (50.98 meq/100g compared to 20.03 meq/100g) and a significant increase ($p < 0.05$) in T2 compared to T3 in D24 plots (88.98 meq/100g compared to 27.16 meq/100g) (Figure 4.d).

The level of active limestone changes but not significantly. However its content is close to or exceeds 5% (Figure 4.e). Therefore, limestone solubilization and the gradual release of Calcium can be achieved by acid rainwater or by the biochemical activities of either microorganisms or plant roots (Wierzchos et al., 2003; Salomon, 2006; Coque, 2008). Moreover, the abundance of Calcium ions has an antagonistic effect on other nutrients availability such as Potassium, Iron, Boron, Copper, Manganese, Zinc and signs of deficiency or fading can appear on plants (chlorosis) (Pousset, 2002; Vasant et al., 2009; Ofme, 2011; Morel, 1996). In addition, it inhibits the mineralization of organic matter under the effect of coating (Morel, 1996). Although, land may be rich in total limestone, but relatively poor in active limestone (Pousset, 2002).

The Phosphorus level is low between 1 and 9 ppm. (According to AgSource Laboratories, 2013) (Figure 4.f). However there is an evolution in content over time, where there is a significant increase ($p < 0.05$) of phosphorus in T2 compared to T1 in S10 (6.78 ppm compared to 5.2 ppm), S14 (7.59 ppm compared to 5.82 ppm), S24 (7.16 ppm compared to 3.95 ppm), Myc (7.55 ppm compared to 4.67 ppm) and D24 (7.92 ppm compared to 5.32 ppm) plots. On the other hand, there is a significant increase ($p < 0.05$) in T3 compared to T1 in D10 (7.45 ppm compared to 5.07 ppm) and Mix (7.77 ppm compared to 5.8 ppm) plots. In fact, Phosphorus is generally low in calcareous alkaline soils. It tends to be insolubilized by the Calcium (Calcium Phosphate and Magnesium) and it is possible that the phosphoric anions precipitate at the contact of the active limestone (Pousset, 2002; Ryan et al., 2001; Baize, 2000). However, Phosphorus is found in organic and inorganic forms. Low Phosphorus availability is due to the larger action of phosphoric anions soluble with Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} and Al^{3+} , depending on the geochemical soil properties (Gyaneshwar et al., 2002). Some microorganisms are able to solubilize phosphate minerals while reducing the pH by the secretion of organic acids which are good chelator of divalent cations such as Ca^{2+} and they can also form a complex with the metal ions associated with Phosphorus, thus releasing Phosphorus (Jones, 1998; Gyaneshwar et al., 2002; Pradipta, 2008). The mechanism of solubilization of inorganic Phosphorus is provided by organic acids; although the acid phosphatases play a major role in the mineralization of organic phosphorus (Goldstein, 1995; Kim et al., 1997; Rodriguez & Fraga, 1999). The genera *Pseudomonas*, *Bacillus* and *Rhizobium* are among the most powerful bacteria in the process of dissolution of Phosphorus (Rodriguez & Fraga, 1999). However, mycorrhizal hyphae make the Phosphorus and certain mineral traces such as Calcium and Zinc available to the host plant (Olsson et al., 1999). In agroforestry, mycorrhizal association contributes to the growth of Acacia species in infertile soils (Dart et al., 1991). Moreover, the dual inoculation by arbuscular mycorrhizal and bacteria that solubilize phosphorus increases the absorption of native soil Phosphorus as well as Phosphorus coming from Phosphate rocks (Goenadi et al., 2000; Cabello et al., 2005).

Total Nitrogen contents have not changed much except for the plots S14 where there has been a significant increase ($p < 0.05$) in T3 compared to T1 (0.052% compared to 0.023%) (Figure 4.g). It is true that the bioavailability of Nitrogen depends primarily on the activity of nitrifying bacteria, but their activity is pH-dependent: they are, in fact, more active when the pH is between 6.5 and 7.5 and the optimum temperature between 30° to 35° Celsius (Biswas & Mukherjee, 2006). Although, microbiological antagonism may reduce nodulation (Kumara et al., 1974).

Organic matter levels determined are very low (<2%) (Figure 4.h). This result is in accord with Godwin (1992), who reported that soils in semi-arid regions contain little organic matter, of no more than one percent. Additionally, sandy soils are low in organic matter which generally would make them weak and unproductive (Pousset, 2002). In fact, minerals, organic matter and microorganisms are the key elements in pedogenesis and soil conservation (Bollag & Leyval, 1998).

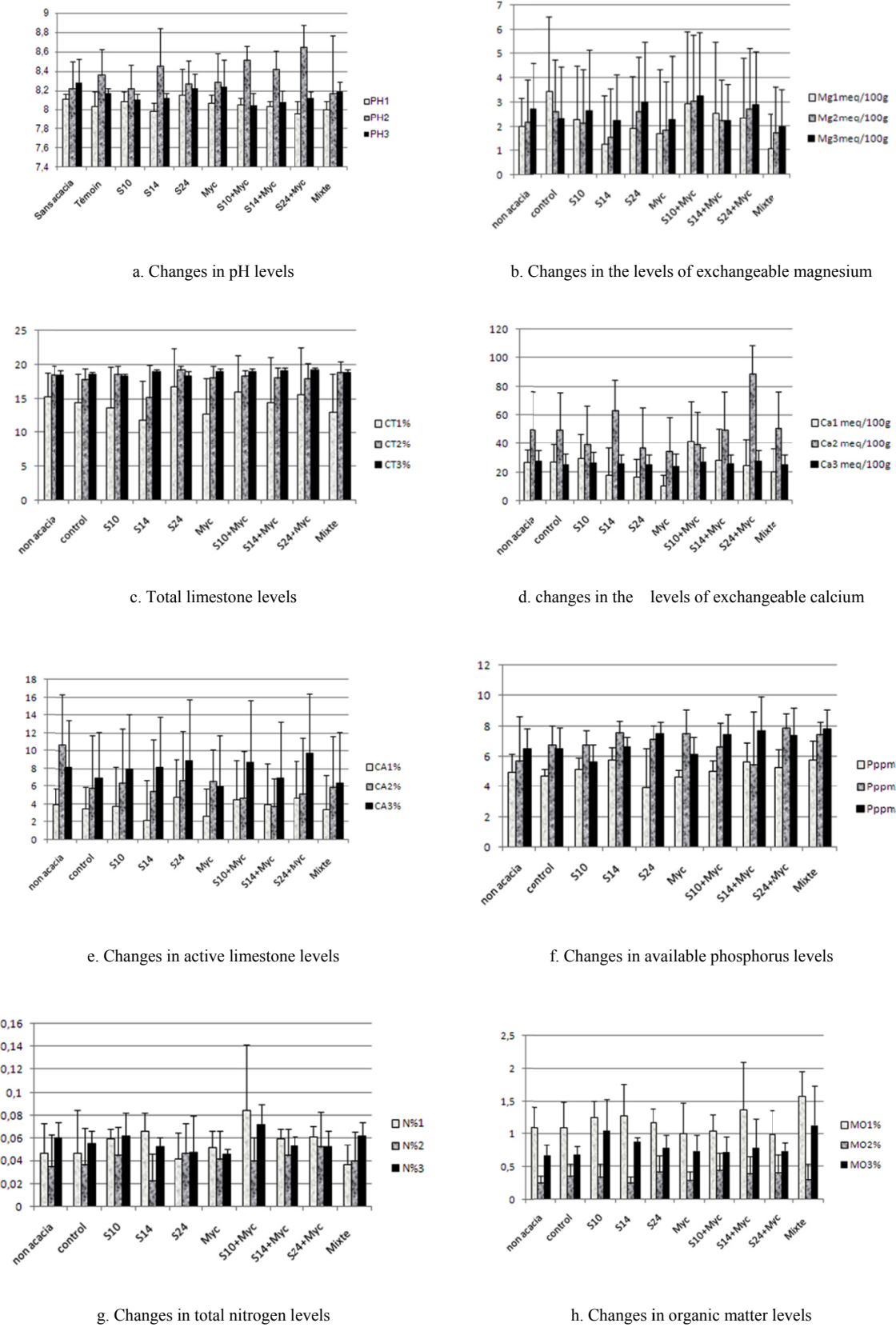


Figure 4. Changes in the levels of pH, exchangeable magnesium, total limestone, exchangeable calcium, active limestone, available phosphorus, total nitrogen and organic matter during the three trimesters T1, T2, T3

3. Conclusion

After nine months of a bio-re-vegetation, we could achieve at a less alkaline pH soil and an improvement in phosphorus content. However, the soil calcareous nature and the rate of either active limestone or the exchangeable Calcium results in a small increase in total Nitrogen and organic matter, and makes exchangeable magnesium contents deficient. In perspective, the factor time may be important in this study, so the experimentation can be conducted over a period of two years or more.

Acknowledgements

We would like to thank Mr A. Bouraoui director of Terga quarry for helping us to make sampling, Ms A. Nehila for her help in the various steps of sampling; I thank so much Mrs Z. Mouffak for correcting my paper and Ms. F. Boukhatem for correcting the microbiology part of the manuscript.

References

- AgSource Laboratoire. (2006). *Understanding a soil analyses. Soil Analysis-AgSource Cooperative service*. Retrieved from <http://agsource.crinet.com/page2903/UnderstandingASoilAnalysis>
- Aubert, G. (1978). *Méthodes d'analyses des sols*. Marseille: Centre national de documentation et pédagogique.
- Baize, D. (2000). *Guide des analyses en pédologie* (2nd ed.). Paris, INRA.
- Biswas, T. D., & Mukherjee, S. K. (2006). *Text book of soil science* (2nd ed.). edition Tata McGraw-Hill.
- Blamire, J. (2003). *e-Learning for Quantitative analysis: Kjeldahl Method. Science a distance*. Retrieved from http://www.brooklyn.cuny.edu/bc/ahp/SDKC/Chem/SD_KjeldahlMethod.html
- Bollag, J. M., & Leyval, C. (1998). *Interactions entre les minéraux des sols, les composés organiques et les microorganismes: Interactions constituants minéraux - constituants organiques - microorganismes du sol sur le cycle et la biodisponibilité des éléments*. Montpellier, 16ème congrès Mondial de science du sol.
- Boyer, J. (1978). *Le calcium et le magnésium dans les sols des régions tropicales-humides et subhumides*. Paris, Office de la recherche scientifique et technique outre-mer, n°35.
- Bye, P. (1999). *La truffe, la terre, la vie*. Paris, edition INRA.
- Cabello, M., Irrazabal, G., Bucsinszky, A. M., Saparrat, M., & Schalamuck, S. (2005). Effect of an arbuscular mycorrhizal fungus, *Glomus mosseae*, and a rock-phosphate-solubilizing fungus, *Penicillium thomii*, in *Mentha piperita* growth in a soilless medium. *Journal of Basic Microbiology*, 45(3), 182-189. <http://dx.doi.org/10.1002/jobm.200410409>
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec et ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec. (2003). *Détermination de la matière organique par incinération : méthode de perte de feu (PAF), MA. 1010 - PAF 1.0, Ministère de l'Environnement du Québec*, p9.
- Collin, C. B. (2006). Analyse et reorésentation de la couverture pédologique « application à la caractérisation des unités cartographiques de sols pour le programme I.GCS d'un secteur du Baugeois .*Thèse de doctorat en cartographie des sols, Laboratoire de Science du Sol, I.N.H., Angers, et laboratoires Science du Sol et Infosol. INRA, Orléans, France*.
- Coque, R. (2008). Relief karstique. *Encyclopedia Universalis*.
- Dart, P. J., Umali-Garcia, M., & Almendras, A. (1991). Role of symbiotic associations in nutrition of tropical acacias. In Turnbull, J. W. (Ed.), *Advances in tropical acacia research* (pp. 13-19). Canberra, ACIAR: Proceedings N°35.
- Davet, P. (1996). *Vie microbienne du sol et production végétale*. Paris, edition INRA.
- Diouf, D., Forestier, S., Neyra, M., & Lesueur. (2003). Optimization of inoculation of *Leucaena leucocephala* end *Acacia mangium* with *rhizobium* under green house conditions. *Ann. For. Sc*, 60, 379-384.
- Dubey, Y. P. (2011). Rhizobia - As ameliorant to soil reaction. *African Journal of Microbiology Research*, 5(24), 4091-4096. <http://dx.doi.org/10.5897/AJMR11.013>
- Gasser, M. O. (2011). *Variabilité temporelle dans les analyses de sols. Comité ad hoc échantillonnage des sols Drummondville: institut de recherche et de développement en agroenvironnement(IRDA). Québec*. Retrieved from http://www.craaq.qc.ca/UserFiles/File/Comites/Adhoc_echantillon_champ/Gasser_24_02_2011_PPT.pdf

- Godwin, R. G. (1992). Le génie agricole au service du développement: production vivrière en zones de faible pluviosité -façons culturales appropriées. *Bulletin des services agricoles de la FAO* 83.
- Goenadi, D., Siswanto, H., & Sugiarto, Y. (2000). Bioactivation of poorly soluble phosphate rocks with a phosphate solubilizing fungus. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3), 927-932.
- Goldstein, A. H. (1995). Recent progress in understanding the molecular genetics and biochemistry of calcium phosphate solubilization by Gram negative bacteria. *Biology, Agriculture and Horticulture*, 12(2), 185-193. <http://dx.doi.org/10.1080/01448765.1995.9754736>
- Graham, P., & Allan, D. (2002). *Symbiotic Nitrogen Fixation: The Symbiosis between Legumes and Rhizobia*. Course on line, department of soil, water and climate: University of Minnesota. Retrieved from http://www.soils.umn.edu/academics/classes/soil3612/Symbiotic_Nitrogen_Fixation/Environmental.htm
- Gyaneshware, P., Naresh, K. G., Parekh, L. J., & Pool, P. S. (2002). Role of microorganisms in improving P nutrition of plants. *Plant and Soil*, 245(1), 83-93. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1020663916259>
- Hodjes, S. C. (2000). *Methods of Phosphorus Analysis for Soils, Sediments, Residuals, and Waters*. Southern Cooperative Series Bulletin n°396. Publishing Institution: North Carolina State University. Retrieved from http://www.soil.ncsu.edu/sera17/publications/sera17-2/pm_cover.htm
- Jones, D. L. (1998). Organic acids in the rhizosphere -a critical review. *Plant soil*, 205(1), 25-44. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1004356007312>
- Khan Towhid, O. (2013). Soils: Principals, Properties and Management. *Springer Dordrechi Heidelberg*: New York, London.
- Kim, K. Y., Jordan, D., & Krishnan, H. B. (1997). *Rahnella aqualitisa* bacterium isolated from soybean rhizosphere, can solubilize hydroxyl apatite. *FEMS Microbiology Letter*, 153(2), 273-277. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1097\(97\)00246-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1097(97)00246-2)
- Kumara, R., Abhisivar, S., & Siende, S. T. (1974). Inhibition of groundnut Rhizobium in Indian Soils. *Proceeding of Indian National Science Academy*, 40B(5), 535-539.
- Lundquist, E. J., Scow, K. M., Jackson, L. E., Uesugi, S. L., & Johnson C. R. (1999). Rapid response of soil microbial communities from conventional, low input and organic farming systems to a wet/dry cycle. *Soil Biology and Biochemistry*, 31(12), 1661-1675. [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00080-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00080-2)
- Mansouri, L. M. (2011). Production d'inoculum de *Rhizobium* nodulant *Acacia Saligna* pour revégétaliser la carrière de Terga (Ain Témouchent). *Mémoire de magister, laboratoire de biotechnologie des rhizobia et amélioration des plantes. Département de biotechnologie. Université d'Oran es Sénia*.
- Maslin, B. R., & Mc Donald, M. W. (2004). Acacia Search - Evaluation of Acacia as a woody crop option for southern Australia: *Acacia saligna* (Labill.) H. Wendl. *Rural Industries Research and Development Corporation. Barton, ACT* (pp. 204-214).
- Morel, R. (1996). *Les sols cultivés* (2nd ed.). Paris: Lavoisier.
- Ofme. (2011). Sol acide? Sol calcaire? Conséquences pour la forêt? *Centre régionale de la propriété forestière, région PCA Fiche n° 273402*.
- Olsson, N. P. A., Thingstrup, I., Jakobsen, I., & Baath, E. (1999). Estimation of the biomass of arbuscular mycorrhizal fungi in a linseed field. *Soil Biology and Biochemistry*, 31(13), 1879-1887. [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00119-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00119-4)
- Philipps, J., & Hayman, D. S. (1970). Improved procedure for clearing roots and staining plastic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans. Br. Mycol. Soc*, 55, 545-554.
- Pousset, J. (2002). *Guide engrais vert et fertilité des sols* (2nd ed.). Agrécision, Groupe France Agricole (GFA).
- Pradipta, K. M. (2008). *Textbook of environmental Microbiology*. New Delhi (India), International Publishing House Pvt. Ltd.
- Reuter, D. J., Robinson, J. B., & Dutkiewicz, C. (1997). *Plant Analysis: An Interpretation Manual* (2nd ed.). Victoria, Collingwood: CSIRO Publishing.
- Robert, M. (1996). *Le sol: Interface dans l'environnement, ressources pour le développement*. Paris, Milan, Barcelone: Masson.

- Rodriguez, H., & Fraga, R. (1999). Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Advances in Biotechnology*, 17(4-5), 319-339. [http://dx.doi.org/10.1016/S0734-9750\(99\)00014-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0734-9750(99)00014-2)
- Ryan, J., Estefan, G., & Abdul, R. (2001). Soil nutrients, sodium and anion analysis: Potassium. *Soil and plant Analysis laboratory Manual* (2nd ed.). Aleppo, Syria: International center of agriculture research in the dry areas (ICARDA).
- Salomon, J. N. (2006). *Précis de Karstologie* (2 ed.). France, Presses Universitaires de Bordeaux: Pessac édition.
- Steenwerth, K. L., Drenovsky, R. E., Lambert, J. J., Kluepfel, D. A., Scow, K. M., & Smart, D. R. (2008). Soil morphology, depth and grapevine root frequency influence microbial communities in a Pinot noir vineyard. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(6), 1330-1340. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.04.031>
- Tillard, P., & Drevon, J. J. (1988). Nodulation and nitrogenase activity of chickpea cultivar inoculated with different strains of *rhizobium ciceri*. *Agronomy*, 17, 429-441
- Vasant, G., Krichnamurthy, V. N., Sudha, G., Manik, D., & Paranjape, K. (2009). *The fertilizer encyclopedia*. New Jersey: John Wiley and Sons edition.
- Vincent, I. M. (1970). *A manual for the practical of root- nodule bacteria*. Oxford and Edinburg: Blackwell scientific publication.
- Walligora, C. (2010). Racines et sol: un monde de communications et d'équilibres. *Techniques culturelles simplifiées*, n°57.
- Wierchos, J., De Los Rios, A., Sancho, L. G., Green, A., & Ascaso, C. (2003). The integrated microscopical study of Antarticean dolithic microorganisms and their microhabitats. In A. H. L. Leiden Huiskes, W. W. C. Gieskes, J. Rozema, R. M. L. Schorno, S. M. Van der Vries, & W. J. Wolff (Eds.), *Antartic Biology in a Global Context* (pp. 152-156).
- Zahran, H. H. (1999). Rhizobium- legume symbiosis and nitrogen fixation under severe conditions and in an arid climate. *Microbiology and molecular biology reviews*, 63(4), 968-989.

Copyrights

Copyright for this article is retained by the author(s), with first publication rights granted to the journal.

This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>).

Annexes

1. Les normes du potassium assimilable d'après Horneck et al ,2011

	Extractable or soil test K	Recommendation (lb K ₂ O/acre)
Low	<150 ppm* <0.4 meq/100 g soil	100–300
Medium	150–250 ppm 0.4–0.6 meq/100 g soil	60–250
High	250–800 ppm 0.6–2.0 meq/100 g soil	0
Excessive	>800 ppm >2.0 meq/100 g soil	0†

2. Les normes de l'azote total d'après Hazelton et Murphy, 2007

Rating	Total N % by Wt
Very low	<0.05
Low	0.05 - 0.15
Medium	0.15 - 0.25
High	0.25 - 0.50
Very high	> 0.50

3. Les normes des cations échangeables d'après Hazelton et Murphy, 2007

Rating	Exchangeable Cations				
	CEC meq/100g	Exch Ca meq/100g	Exch Mg meq/100g	Exch Na meq/100g	Exch K meq/100g
Very Low	< 6	< 2	< 0.3	< 0.1	< 0.2
Low	6 - 12	2 - 5	0.3 - 1.0	0.1 - 0.3	0.2 - 0.3
Moderate	12 - 25	5 - 10	1 - 3	0.3 - 0.7	0.3 - 0.7
High	25 - 40	10 - 20	3 - 8	0.7 - 2.0	0.7 - 2.0
Very High	> 40	> 20	> 8	> 2	> 2

4. Les normes du phosphore assimilable selon Agsource laboratries ,2006

Rating	Bray Phosphorus PPM	Olsen Phosphorus PPM
Low	1 - 15	1 - 9
Low to adequate	15 - 25	10 - 15
Adequate	26 - 40	16 - 24
High	> 40	> 24

5. Les normes de la matière organique d'après Hills Laboratories ,2014

Level	Organic C (%)	Organic Matter (%)
Very Low	< 2	< 3
Low	2 - 4	3 - 7
Medium	4 - 10	7 - 17
High	10 - 20	17 - 35
Very High	> 20	> 35

6. Les normes de salinité selon Mathieu et al 2003

mmhos.cm ⁻¹ dS.m ⁻¹	0,6	1	2	3	4
CE _{1/5}	non salé	légère- ment salé	salé	très salé	extrê- mement salé
CE _{1/10}	non salé	lège- rem- salé	salé	très salé	extrêmement salé

7. Les normes de calcaire total selon Loz et Mathieu, 1990

- ✓ Sols très faiblement calcaires avec un taux de CaCO₃ < 2%.
- ✓ Sols faiblement calcaires avec un taux de CaCO₃ de 2 à 10%.
- ✓ Sols moyennement calcaires avec un taux de CaCO₃ de 10 à 25%.
- ✓ Sols fortement calcaires avec un taux de CaCO₃ de 25 à 50%.
- ✓ Sols très fortement calcaires avec un taux de CaCO₃ > 50%