

Table des matières

	Pages
Dédicace	2
Remerciements.....	3
Résumé	5
Liste des abréviations.....	15
Listes des figures.....	16
Liste des tableaux.....	18
Introduction.....	19
Etude bibliographique.....	23
<u>Chapitre I : Contexte général sur les changements des terres et état des lieux de la carrière de Terga (Ain Témouchent)</u>	23
1. Les conséquences environnementales des changements de la nature et qualité des terres et la place des microorganismes dans la manifestation de la qualité des études des sols.....	23
2. Description de la carrière de Terga d'Ain Témouchent et son historique.....	25
2.1. Le climat.....	27
2.2. Recensement des espèces végétales avant l'exploitation.....	28
2.3. L'intérêt de la revégétalisation du littoral témouchentois.....	28
<u>Chapitre II : Généralités sur l'étude des sols</u>	30
1. Le sol.....	31
1.1. Le sol matrice physique et chimique complexe, hétérogène mais structurée.....	31
1.1.1. <i>La fraction minérale</i>	35
1.1.2. <i>La matière organique</i>	36
1.1.3. <i>L'eau et l'air</i>	36

1.2.	Le sol niche écologique de biodiversité.....	37
1.3.	Le sol réservoir de diversité.....	38
1.4.	Le sol source de fonctions environnementales.....	40
2.	Les caractères édaphiques du sol.....	41
2.1.	Les caractérisations physiques.....	41
2.1.1.	<i>La texture</i>	41
a.	Les sables.....	42
b.	Les limons.....	42
c.	Les argiles.....	42
2.1.2.	<i>La classe texturale du sol</i>	42
2.1.3.	<i>L'importance de la texture du sol</i>	44
2.1.4.	<i>La structure</i>	44
2.1.5.	<i>Les agrégats micro-habitats du sol</i>	45
2.1.6.	<i>La porosité du sol</i>	45
2.1.7.	<i>Le pH du sol</i>	46
a.	Facteurs influant sur le pH du sol.....	48
2.1.8.	<i>La salinité</i>	49
2.2.	Les caractérisations chimiques.....	49
2.2.1.	<i>La matière organique</i>	49
2.2.2.	<i>Le calcaire total</i>	49
2.2.3.	<i>Le calcaire actif</i>	50
2.2.4.	<i>Le fonctionnement biologique du sol</i>	50
3.	Les microorganismes du sol.....	50
3.1.	Historique de l'écologie microbienne.....	50
3.2.	La grande diversité biologique des sols.....	51

3.2.1.	<i>Les bactéries</i>	52
3.2.2.	<i>Les actinobactéries</i>	53
3.2.3.	<i>Les champignons</i>	54
3.2.4.	<i>Les levures</i>	55
3.2.5.	<i>Les virus</i>	55
3.2.6.	<i>Les algues</i>	56
3.2.7.	<i>Les protozoaires</i>	57
3.2.8.	<i>La faune du sol</i>	57
3.2.9.	<i>Les organes souterrains des végétaux</i>	58
3.3.	Facteurs influençant la structure des communautés microbiennes du sol.....	59
3.3.1.	<i>Facteurs abiotiques</i>	59
	a. Influence du travail du sol.....	60
	b. Influence de l'azote disponible.....	60
	c. Influence de la température.....	61
	d. Influence du pH et de l'humidité des sols.....	61
3.3.2.	<i>Facteurs biotiques</i>	62
3.4.	Interactions entre populations microbiennes.....	64
3.5.	Interactions entre les microorganismes et les plantes.....	65
3.5.1.	<i>Interactions non symbiotiques</i>	65
3.5.2.	<i>Interactions symbiotiques</i>	66
	a. Les symbioses mycorhiziennes.....	66
	b. Les Symbioses fixatrices d'azote.....	68
3.6.	Rôle de la communauté microbienne dans le sol.....	69
4.	Approches de modélisation mathématique.....	70
4.1.	Les modèles biologiques.....	73

Chapitre III : Matériels et méthodes	75
1. Description de la zone expérimentale (présentation du site d'étude).....	75
1.1. Situation géographique de la sablière de Terga.....	75
1.2. Morphologie du site de Terga.....	75
2. Echantillonnage du sol.....	76
3. Analyses physico-chimiques.....	80
3.1. Analyses physiques.....	80
3.1.1. <i>Analyse granulométrique</i>	80
3.1.2. <i>L'humidité</i>	80
3.1.3. <i>Mesure du pH</i>	81
3.2. Analyses chimiques.....	81
3.2.1. <i>Mesure de la conductivité électrique</i>	81
3.2.2. <i>Dosage du calcaire total</i>	82
3.2.3. <i>Dosage du calcaire actif</i>	83
3.2.4. <i>Carbone total et matière organique</i>	84
4. Isolement de la population microbienne.....	84
5. Analyses statistiques et modélisation mathématiques des données.....	85
Chapitre IV : Résultats et discussion	89
1. Résultats des analyses physico- chimiques.....	89
2. L'évaluation de la flore microbienne.....	92
3. Résultats des analyses statistiques.....	98
4. Approche de modélisation mathématique de population microbienne du sol.....	104
Conclusion et perspectives	112
Références bibliographiques.....	115
Annexe	

Publication dans la revue scientifique canadienne au « Journal of	138
Agricultural Science ».....	143

La liste des abréviations

ADN : Acide désoxyribonucléique

ADNr : ADN ribosomique

ARN : acide ribonucléique

CaCO₃ : Carbonate de calcium

CE : Conductivité électrique

CGtase : Cyclodextrin glycosyltransferase

CH₄ : Méthane

CO₂ : Dioxyde de carbone

CEC : Complexe d'échange cationique

C/N : Rapport carbone sur l'azote

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

H⁺ : Hydrogène

H₂SO₄ : Acide sulfurique

Hcl : Acide chlorhydrique

H₂O₂ : Peroxyde d'hydrogène

NO₂ : Peroxyde d'azote

MO : Matière organique

MYA : Mycorhization des racines

MNP : Le nombre le plus probable

N₂ : L'azote atmosphérique

N : Azote total

O₂ : Oxygène

pH : Potentiel hydrogène

USD : United States Department of Agriculture

UFC : Unité Formant Colonie.

La liste des figures

Figure.1 : Carte de situation de la zone d'étude.....	26
Figure.2 : Schéma conceptuel représentant l'approche utilisée dans la synthèse bibliographique pour étudier la réponse des microorganismes à l'apport des caractères édaphiques du sol.....	30
Figure .3 : Le positionnement et la complexité externe et interne du sol.....	32
Figure .4 : Vue du sol en termes des niches écologiques.....	33
Figure.5 : Proportion des principaux composants du sol en volume.....	34
Figure .6 : Les fonctions environnementales du sol.....	40
Figure .7 : Représentation schématique de la constitution d'un volume de sol.....	43
Figure.8 : Triangle de textures du Département d'Agriculture des Etats-Unis (USDA).....	43
Figure.9 : La disponibilité des nutriments et de l'activité microbienne affectée par le pH du sol d'après	46
Figure.10 : Gramme de pH extrêmes pour la plupart des sols minéraux et gammes dans les régions arides des sols d'après	47
Figure.11 : Le pH du sol et la croissance des plantes d'après.....	48
Figure .12 : Les différents rôles des algues.....	56
Figure.13 : Carte de localisation de terrain d'étude Terga (Ain Témouchent).....	76
Figure.14 : Les trois parcelles d'échantillonnage du site Terga (Ain Témouchent).....	78
Figure .15 : Les différentes plantes choisis pour l'échantillonnage au site de Terga (Ain Témouchent).....	79
Figure. 16a : La flore microbienne totale des différents échantillons de sol durant la saison d'été.....	92
Figure. 16b : La flore microbienne totale des différents échantillons de sol	

durant la saison de printemps.....	93
Figure. 16c : La flore microbienne totale des différents échantillons de sol durant la saison d'automne.....	94
Figure. 16c : La flore microbienne totale des différents échantillons de sol durant la saison d'hiver.....	95
Figure .17 : La flore totale du sol nu à différentes saisons.....	96
Figure .18 : La flore totale du sol rhizosphérique de la forêt native à différentes saisons.....	99
Figure .19 : La flore totale du sol rhizosphérique du sol revégétalisé par l'homme à différentes saisons.....	100
Figure .a : Carte de corrélation saison de printemps.....	101
Figure .b : Carte de corrélation saison d'été.....	101
Figure .c : Carte de corrélation saison d'hiver.....	102
Figure .d : Carte de corrélation saison d'automne.....	102
Figure .20 : Cartes de corrélations (a, b, c et d) à différentes saisons.....	102
Figure .e : Carte d'analyse factorielle saison d'été.....	103
Figure .f : Carte d'analyse factorielle saison d'automne.....	103
Figure .g : Carte d'analyse factorielle saison d'hiver.....	103
Figure .h : Carte d'analyse factorielle saison de printemps.....	103
Figure.21 : Cartes d'analyses factorielles (a, b, c et d) à différentes saisons.....	103
Figure .22 : Représentation de la flore microbienne en relation avec les caractères édaphiques du sol (le pH) pendant les quatre saisons.....	104
Figure .23 : L'évolution des populations microbiennes selon deux modèles supérieurs pour le nombre le plus important et inférieurs pour les populations faibles.....	107

La liste des tableaux

Tableau.1 : Liste des espèces végétales observées au niveau de la carrière de Terga (Ain Témouchent) avant l'exploitation.....	29
Tableau.2 : Biocénose du sol ..	39
Tableau.3 : Principaux taxons de microorganismes du sol	52
Tableau .4 : Les normes de salinité du sol.....	82
Tableau .5 : Récapitulatif du nombre de population microbienne en fonction des types de sol et de pH.....	87
Tableau .6 : Résultats des analyses physico-chimiques du sol de Terga (Ain Témouchent).....	91

Introduction

Introduction

Au cours du XX^{ème} siècle, les activités humaines se sont intensifiées et ceci est, en partie, dû à l'augmentation de la population mondiale et aux besoins croissants en alimentation associée, mais aussi à cause de la forte demande d'une partie de cette population à développer son bien être. Cette intensification des activités humaines a provoqué une altération de notre environnement et est la cause d'une érosion significative de biodiversité à l'échelle planétaire.

L'environnement est particulièrement confronté à ce type de phénomène. Une telle perte de biodiversité entraîne une modification des processus biologiques et de la stabilité des écosystèmes (Balvanera *et al.*, 2006). D'un point de vue écologique, le sol représente l'un des plus importants réservoirs de diversité biologique de notre planète et surtout l'un des derniers remparts pour cette biodiversité (Swift, 1998). Il est aussi le lieu de nombreux processus biologiques et écologiques. A ce titre, les communautés microbiennes apparaissent encore de façon récurrente comme une "boîte noire" fonctionnelle génératrice de flux dont l'intensité ne dépend que de facteurs abiotiques comme la température, l'humidité, le pH...ect, excluant l'hypothèse que la diversité et la composition des communautés microbiennes ainsi que les interactions trophiques (compétition, commensalisme,...) entre les populations puissent jouer un rôle fonctionnel (McGill, 1996 ; Gignoux *et al.*, 2001).

L'activité microbienne est elle-même régulée par les diverses espèces et stades de croissance des plantes ainsi que par les conditions reliées à la santé du sol (Girvan *et al.* 2004; Schloter *et al.*, 2003; van Elsas et Garbeva 2002). Il est donc tout à fait légitime, surtout en agriculture biologique, de chercher à utiliser des mesures biologiques pour mieux connaître les sols et les gérer au mieux dans une perspective agronomique durable. Certains sols peuvent être améliorés, d'autres au contraire ont de faibles capacités d'amélioration, d'autres encore, victimes de procédés irréversibles, sont définitivement affaiblis, tels que le sol de Terga (Wilaya d'Ain Témouchent, dans l'ouest Algérien) qui est exposé à d'éventuelles exploitations. La stabilisation de cette région passe par le maintien en équilibre de son fragile écosystème. Or, en Algérie, la majorité des carrières du littoral connaît une

déstabilisation accrue en raison de la dégradation de leur végétation sensible au piétinement.

La dégradation des sols est un problème majeur de l'agriculture et conduit souvent à l'abandon des grandes superficies cultivables et à la désertification du milieu. La région du Terga est soumise à des processus de dégradation très poussés, (Stroosnijder, 1992). Si de nombreux travaux sur les caractéristiques physico-chimiques des sols dégradés existent, très peu d'études se sont intéressées à la quantification de l'activité biologique dans ces sols. En effet, selon (Ambouta *et al.* 1996), les dégradations physique (encroûtement) et chimique (appauvrissement en éléments nutritifs) sont de loin les plus importantes alors que la dégradation biologique constitue une des formes de dégradation des terres, de baisse des capacités de production due à l'altération des caractéristiques des sols.

Cette dégradation résulte d'une baisse de l'activité biologique du sol, laquelle est entretenue par l'apport de matières organiques et par la présence de divers êtres vivants (faune, microorganismes, racines de plantes, etc.). Ces êtres vivants améliorent la structure du sol, enrichissent la biomasse et parfois permettent la fixation d'azote atmosphérique par les plantes. De ce fait, l'activité biologique reste une composante essentielle de la fertilité du sol. Elle intervient en agissant d'une part sur le stock d'éléments minéraux assimilables, obtenus par minéralisation de la matière organique et d'autre part sur la structure du sol. Diverses communautés sont soupçonnées de favoriser la stabilité de l'écosystème, la productivité et la durabilité (Giller *et al.*, 1997).

Pour contribuer à restaurer la végétation de la carrière de Terga, des analyses édaphiques et microbiologiques des sols ont été nécessaires. En effet, elles nous permettent de comprendre la répartition de la flore microbienne et d'intégrer la modélisation mathématique qui permet de simuler la dynamique des éléments chimiques dans le sol et plus précisément le sol des carrières et de simplifier les processus biotiques. Enfin on essaiera de démontrer comment la modélisation peut être utilisée pour comprendre l'évolution de la population microbienne des sols.

Plusieurs études montrent qu'il y a un manque de connaissance concernant:

- L'identification des microorganismes du sol,
- Leurs distributions spatiales dans les petites et grandes échelles,
- Leurs implications dans le fonctionnement du sol (Ranjard *et al.*, 2010).

Ce qui résulte d'une absence ou bien d'insuffisance des modèles de considération de la communauté bactérienne et conduit aux problématiques suivantes :

- Quelles sont les mesures des modèles qui peuvent évaluer la dynamique des populations microbiennes afin d'améliorer la modélisation des fonctions biologiques et le fonctionnement de la structure du sol ? En quoi la prise en compte des processus physico-chimiques améliorerait les prévisions fonctionnelles pour la revégétalisation des sols de carrières ?.
- Quelles sont les actions diverses des exploitations des carrières sur l'environnement entraînant la modification des caractères essentiels des sols?
- Et quels sont les objectifs fixés et les moyens biologiques utilisés pour sa réhabilitation en tenant compte de l'action des microorganismes dans ce processus de remédiation?.

Les objectifs du présent manuscrit se présentent comme suit :

- Étude du comportement de la communauté microbienne dans la sablière de Terga, face à d'éventuelles perturbations liées à l'exploitation.
- Réaliser des mesures, sur des échantillons de sol ou sur le terrain, permettant de paramétrer un modèle mathématique.

Tous ces objectifs se concentrent dans un seul objectif très important qui est la Réhabilitation et la restauration des sites dégradés.

Dans ce manuscrit, la première partie présente une étude bibliographique divisée en trois grandes parties distinctes. La première rapporte des données générales sur le sol et ses caractéristiques physiques et chimiques, la deuxième porte sur les micro-organismes du sol et leurs rôles et la troisième se focalise sur la modélisation mathématique et son utilisation en Biologie.

La deuxième partie est consacrée aux matériels et aux méthodes expérimentales mis en place pour la réalisation de ce travail. La troisième partie présente et discute l'ensemble des résultats obtenus.

Nous terminons par une conclusion générale et envisageons les perspectives possibles à la poursuite de ce travail.

Etude bibliographique

Chapitre I : Contexte général sur les changements des terres et état des lieux de la carrière de Terga (Ain T'émouchent).

L'objectif de cette étude bibliographique est de présenter le contexte scientifique dans lequel se sont inscrits les travaux de thèse, c'est-à-dire d'identifier les travaux déjà réalisés sur la réponse des communautés microbiennes du sol en relation avec les caractères édaphiques, tout en mettant en évidence les manques à ce niveau et en pointant les questions de recherche qui ont été les bases de travail durant nos travaux de thèse.

1. Les conséquences environnementales des changements de la nature et qualité des terres et la place des microorganismes dans la manifestation de la qualité des études des sols

Le dégradation des terres fut longtemps considéré comme un problème à retombées essentiellement locales mais, actuellement, il apparaît comme un facteur présentant des conséquences plus globales (Foley *et al.*, 2005). En effet, les dégradations des terres liés à l'agriculture se sont produits, et se produisent encore, sur de très grandes surfaces de la planète : selon les estimations proposées par Vitousek *et al.* 1997, un tiers de la moitié de la surface de la Terre aurait été sujette à des modifications d'origine anthropique. Ces dégradations sont de natures très différentes : il peut s'agir de conversion de forêts en terres arables ou en prairies, ou de l'intensification des cultures par exemple (Foley *et al.*, 2005). Le point commun de toutes ces dégradations est leur origine dictée par les contraintes et les besoins engendrés par les activités humaines.

La remarquable intensification de l'agriculture qui s'est déroulée au cours du dernier siècle a permis de doubler la production mondiale de nourriture en augmentant la surface agricole de seulement 10 % (Tilman, 1999). Cela a pu être réalisé grâce à la sélection de cultivars de plantes à haut rendement, à l'usage de l'irrigation, à la mécanisation et à l'utilisation massive de fertilisants et de pesticides. Malheureusement ces dégradations se sont déroulées au prix d'un changement des conditions environnementales. La conversion des forêts en terres cultivées et le

labour des sols arables sont ainsi mis en cause pour leur participation dans les émissions de gaz à effet de serre (CO_2 , N_2O) (Johnson *et al.*, 2007).

L'usage croissant des différents pesticides et fertilisants associés à l'agriculture intensive est à l'origine de fréquents problèmes de contamination et de potabilité des eaux (nappes phréatiques) et notamment de l'eutrophisation des eaux douces et marines (Khan et Ansari, 2005; Glibert *et al.*, 2006; Csatho *et al.*, 2007). Ces dégradations entraînent également la modification et la fragmentation des habitats naturels avec leurs conséquences sur la biodiversité (Robinson et Sutherland, 2002). Enfin, les techniques de culture intensive peuvent engendrer une dégradation des propriétés physico-chimiques du sol, telles que la teneur en matière organique, avec à terme des pertes de fertilité et même l'érosion des couches superficielles du sol.

Certaines formes de dégradations des terres se révèlent donc à la fois nécessaires aux besoins humains (en terme notamment de production de nourriture) mais également à l'origine de conditions environnementales dégradées, permettant d'anticiper une perte plus ou moins intense et plus ou moins durable des services fournis par les écosystèmes (Hooper *et al.*, 2005; Diaz *et al.*, 2007).

Durant ces dernières décennies, les conséquences des dégradations des systèmes de production agricole ont fait l'objet de nombreuses études. Les dégradations peuvent donc avoir des impacts considérables sur les processus écologiques et, par extrapolation, sur les services rendus par les écosystèmes tels que la régulation du climat, des cycles biogéochimiques, le contrôle de l'érosion, la formation du sol, le rôle d'habitat pour les êtres vivants, la production de nourriture, d'énergie, de matériaux, la source de divertissement, de patrimoine génétique (Costanza *et al.*, 1997). Ces dégradations peuvent influencer les processus écosystémiques directement *via* leurs effets physiques ou chimiques, et indirectement via leurs effets sur la biodiversité (changement de la composition, du nombre d'espèces et ou altération des capacités des espèces (Diaz *et al.*, 2007). Selon le scénario prédictif de Sala *et al.* (2000), ces dégradations constitueraient d'ailleurs le facteur majeur des changements de biodiversité, et ce, plus fortement que le

changement climatique, l'augmentation du dépôt d'azote ou du CO₂ atmosphérique, et les échanges biotiques. Cet impact a été attribué aux changements drastiques des habitats causés par des dégradations, qui modifient les conditions environnementales, elles-mêmes déterminant des modifications voire des disparitions d'espèces.

Les microorganismes jouent un rôle fondamental dans le fonctionnement de l'écosystème: la décomposition de la matière organique, le maintien de la structure du sol, la transformation des nutriments et la production de gaz à effet de serre via les cycles biogéochimiques (carbone et azote essentiellement). De nombreuses connaissances ont été acquises sur les effets des dégradations des terres sur les stocks de carbone ou les émissions de gaz à effet de serre (CO₂, N₂O, CH₄). Par contre, les connaissances sur les microorganismes à l'origine de ces processus et sur leur réponse aux dégradations sont encore trop rares.

C'est dans ce contexte que s'intègre notre travail, il vise une étude sur un site dégradé de la carrière de Terga (Ain-Témouchent) afin de révéler l'évolution de la population microbienne pour la réhabilitation et la revégétalisation de ce site.

2. Description de la carrière de Terga d'Ain Témouchent et son historique

À environ 90 km d'Oran, vers l'ouest se situe la zone côtière de Terga [Figure. 1]. Le site est caractérisé par l'étalement d'une crique sur 600 m du sud sud-ouest au nord nord-est limitée par deux promontoires, l'un au nord s'élevant à 10 m environ et l'autre au sud s'élevant à plus de 30 m, entre les deux s'étire une vaste plage sablonneuse occupée en grande partie par des habitations balnéaires datant pour la plupart de l'époque coloniale.

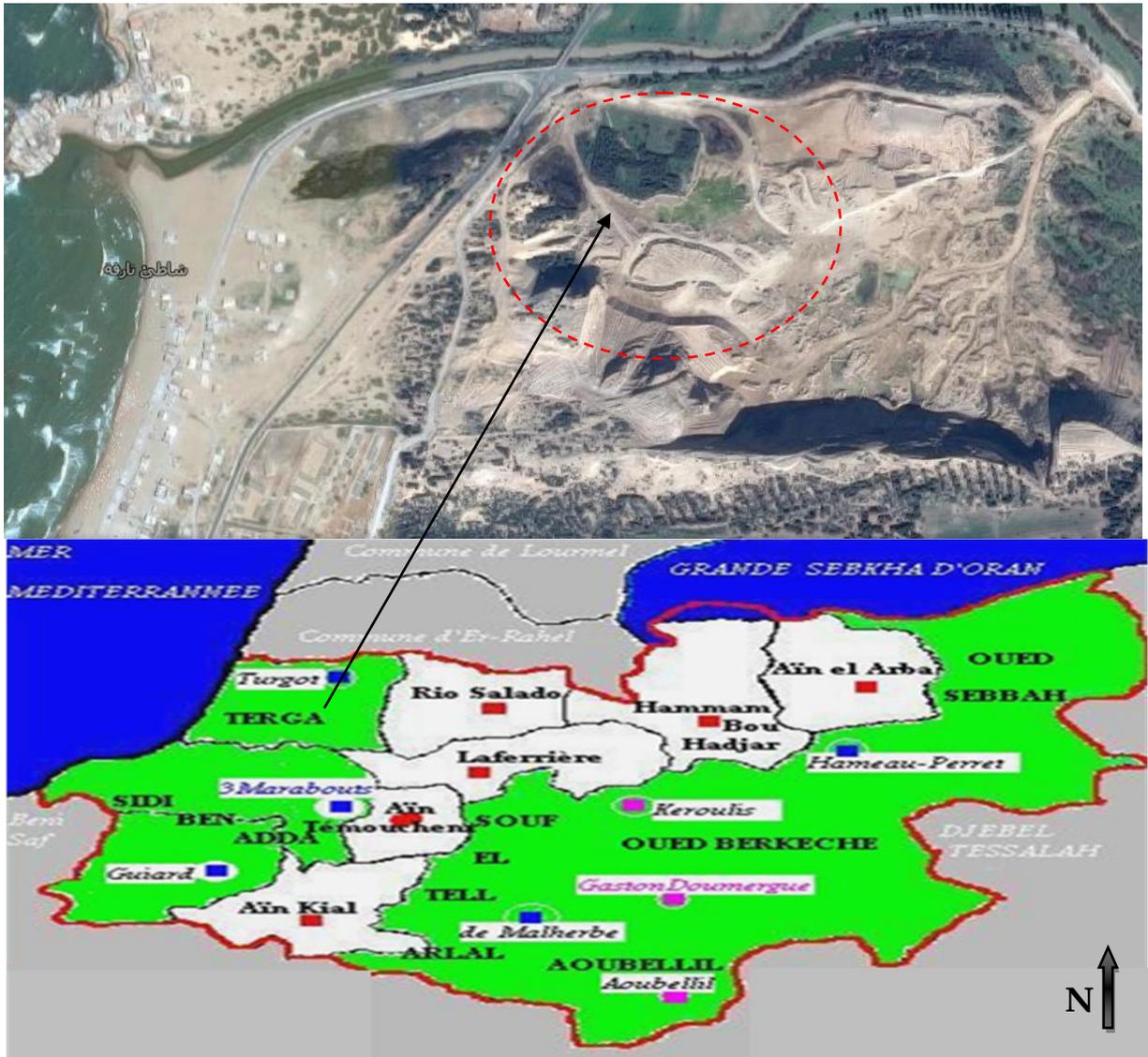


Figure. 1 : Carte de situation de la zone d'étude. Source: Google Maps

Latitude : 35° 17' 22'' Nord 1° 08' 28'' , Longitude : Ouest / 35.28954, -1.14099, échelle 1/200.

Au-delà de l'arrière de la plage à l'est du chemin de wilaya n°20, s'élève rapidement une grande masse sablonneuse à 70m de hauteur occupant 55 hectares, à l'arrière de la dune s'allonge un plateau dominant la mer d'une cinquantaine de mètres d'altitude sauf à l'embouchure de l'Oued El Malah. Il est caractérisé par des rides allongés ouest-est plus ou moins occupées par une couverture végétale naturelle, tandis que les fonds apparaissent cultivés (arboriculture, vigne ou labours).

D'importantes quantités de sable de bonne qualité pour la confection du béton sont stockées au niveau des dunes de Terga, elles ont depuis longtemps attiré l'attention des autorités locales et régionales, une grande sablière fut installée à Terga et actuellement l'Entreprise Publique de la Commune de Terga produit environ 3200 m³/jour de sable. Cette quantité est extraite pour alimenter les chantiers de construction de la région ouest en dépassant depuis 2001 la limite prescrite par le cahier des charges qui limite l'extraction à 3000 t/jour.

Le volume de production s'est accentué suite à la fermeture des sablières de Ain El Turck, d'El Macta et de Mostaganem vers la fin des années quatre vingt-dix : suite au séisme d'Ain Témouchent de 2001 et de Boumerdes en 2003, ainsi qu'au lancement d'importants chantiers d'habitats résidentiels dans la région ouest à partir de 2001 menés par des puissantes entreprises chinoises très demandeuses en matériaux de construction (Ghodbani, 2008).

Cette situation implique une occupation anarchique de terrains de grande valeur (foncière, écologique ou patrimoniale). Une action urgente s'impose donc afin de limiter les atteintes et d'intervenir dans le cadre d'un projet intégré au développement durable.

Dans le cadre de la préservation de l'écosystème ; la gestion et la valorisation des ressources naturelles s'imposent désormais.

2.1. Le climat

Le climat est aride à semi-aride avec des précipitations pluviométriques irrégulières allant de 300 à 350 mm d'eau par an, avec des périodes sèches au printemps, en été et particulièrement en automne.

La moyenne de température la plus élevée est dans la saison estivale 25 °C et la température la plus basse est enregistrée de 8.7 °C pour Beni Saf et de 9.5 °C pour Cap Falcon (E.I.E de la sablière de Terga ,2000).

2.2. Recensement des espèces végétales avant l'exploitation

Au cours de cette exploitation, il y a eu suppression de 51% de la couverture végétale naturelle dont des genévriers centenaires. La surface extraite est estimée à 19 ha. L'arrachage a touché aussi des surfaces composées de *Retama monosperma* en 1987 par les services des forêts sur le versant nord de la dune. Le tableau suivant montre les espèces locales avant l'exploitation (E.I.E de la sablière de Terga ,2000).

2.3. L'intérêt de la revégétalisation du littoral témouchentois

L'intérêt de sauvegarder le littoral de Terga se justifie par la richesse de son patrimoine écologique support d'une flore intéressante jouant un rôle fondamental dans l'équilibre dynamique de tout le système côtier , mais aussi par la présence d'une forte tendance à la littoralisation qui constitue un maillon important dans l'écosystème de la région Nord-Ouest d'Algérie.

L'exploitation anarchique et non rationnelle devient de plus en plus alarmante compte tenu de la forte demande de sable qui ne cesse d'augmenter depuis 1991. Les menaces qui guettent ce site sensible ont conduit à une dégradation du paysage côtier, à la régression de la couverture végétale originelle, à l'ensablement des terres agricoles limitrophes et à un déséquilibre de la dynamique fluviale de l'Oued Maleh (inondations du 13 et 14 octobre 2000).

Dans ce genre d'exploitation il n'est pas recommandé d'imposer une réglementation drastique de l'extraction du sable mais plutôt de prévoir un mode de gestion permettant de sauvegarder l'équilibre de l'écosystème.

Toutes ces raisons apparaissent comme suffisantes pour justifier à la fois la sensibilité du site et l'engagement d'une stratégie dont l'objectif est le maintien de l'équilibre environnemental du périmètre et la préservation de la diversité biologique de ce site (Ghodbani, 2008).

Tableau.1: Liste des espèces végétales observées au niveau de la carrière de Terga avant l'exploitation (E.I.E de la sabliere de Terga ,2000).

Strate graminéenne ou herbacée	Abondance
<i>Asteriscusmaritimum</i>	Peu abondant
<i>Ammophillaarenaria</i> (oyat*)	Peu abondant
<i>Lobularic maritime</i>	Peu abondant
<i>Lotus creticus</i> (lotier)	Peu abondant
<i>Polygonummaritimum</i>	Peu abondant
<i>Crucianella maritime</i>	Peu abondant
<i>Orlaya maritime</i>	Peu abondant
<i>Cakile maritime</i>	Peu abondant
<i>Carpobrotusedulis</i>	Peu abondant
<i>Cynodondactylon</i>	Peu abondant
<i>plantago sp.</i>	Peu abondant
<i>Erigeron canadensis</i> (vergerette)	Peu abondant
Plante à bulbes	Abondance
<i>Pancratiummaritimum</i> (Lis mentholé) kikout	Peu abondant
<i>Urgineamaritimum</i> (jacinthe de mer) feraoun	Peu abondant
Strate arborescente	Abondance
<i>Juniperusphoenicea</i> (genévrier de phoenicie)	Abondant
<i>Juniperusoxycedrus</i> (genévrier oxycèdre)	Abondant
<i>Ephedrafragilis</i>	Peu abondante
<i>Pistacialentiscus</i> (pistachier)	Abondant
<i>Phillyreaangustifolia</i> (philaire)	Abondant
<i>Retamamonosperma</i> (rtem)	Reboisement
<i>Acacia cyanophylla</i>	Reboisement
Strate arbustive ou arbrisseau	Abondance
<i>Atriplexhalinus</i>	Pas abondant
<i>Phragmitescommunis</i> (roseau à balai)	Abondant
<i>Arundo donax</i> (roseau)	Abondant
<i>Typha latifolia</i> (berdi)	Peu abondant
<i>Rhamnus lycioides</i> (cheroura)	Peu abondant
<i>Phyllireaangustifolia</i> (phyllacie)	Abondant
<i>Pistacialentiscus</i> (pistachier) drou	Abondant
<i>Ricinuscommunis</i> (ricin) kheroua	Peu abondant
<i>Salicornia arabica</i>	Peu abondant
<i>Inulaviscora</i> (inule) magramane	Peu abondant
<i>Datura stramonium</i> (stramoine) mandj	Peu abondant
<i>Halogetonsativus</i>	Peu abondant
<i>Chenopodiumsp.</i>	Peu abondant
<i>Daphneguidium</i> (lazzaz)	Peu abondant
<i>Cavilemaritima</i>	Peu abondant
<i>Glauciumcorniculatum</i> (glaucie) bougaraoun	Peu abondant
<i>Elychrysumstocchas</i> (immortelle)	Peu abondant
<i>Salsola kali</i>	Peu abondant
<i>Arthrocnemuindicum</i>	Peu abondant

*Nom vernaculaire en gras.

Chapitre II : Généralités sur l'étude des sols

Cette étude bibliographique de la littérature internationale n'est pas complète sans décrire le sol qui est une ressource non renouvelable et ses constituants qui ont été structurés en 3 parties décrites dans le schéma conceptuel en [Figure. 2].

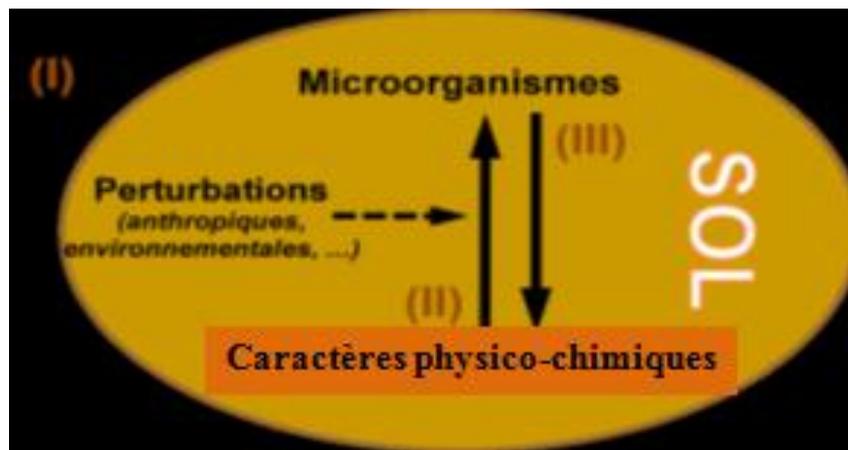


Figure. 2 : Schéma conceptuel représentant l'approche utilisée dans l'étude bibliographique pour étudier la réponse des microorganismes à l'apport des caractères édaphiques du sol.

Cette section correspond à une description des acteurs principaux : le sol, les microorganismes et les caractères physico-chimiques et traite la relation des caractères physico-chimiques sur les communautés microbiennes et leurs rôles fonctionnels dans le sol.

La flèche en pointillée dans le schéma conceptuel représente les perturbations extérieures qui peuvent intervenir sur la dynamique de la population microbienne qui sont prises en compte et qui sont détaillées lors de cette étude.

Les trois acteurs principaux de notre schéma conceptuel [Figure. 2] sont le sol, les caractères édaphiques du sol et les microorganismes. Ce sont les fortes interactions entre ces trois acteurs qui vont déterminer les fonctions, les processus, les cycles biogéochimiques du sol et les services éco-systémiques qu'ils fournissent.

1. Le sol

1.1. Le sol matrice physique et chimique complexe, hétérogène mais structurée

D'un point de vue spatial, la pédosphère est la couche superficielle et meuble de la croûte terrestre qui se trouve à l'interface de 4 autres grands milieux naturels de la planète : la lithosphère, l'hydrosphère, l'atmosphère et la biosphère [Figure .3]. Verticalement, elle s'étend de la roche altérée jusqu'à la surface, qui peut varier de quelques décimètres à quelques mètres sous nos climats tempérés. Horizontalement, elle couvre, de façon presque continue, la surface des continents, seulement interrompue par les affleurements rocheux, les cours d'eau et les constructions de l'homme (Gobat *et al.*, 1998).

Au niveau de sa composition, le sol est une matrice complexe qui est formée [Figure.4] :

- d'une phase liquide correspondant à une solution chimique complexe nécessaire à la réalisation des réactions importantes qui ont lieu dans les sols ;
- d'une phase gazeuse qui est contenue dans les pores ouverts des sols. Ces pores comprennent des gaz atmosphériques et des gaz libérés lors des réactions chimiques et biologiques ;
- d'une phase solide constituée en majeure partie de particules minérales de taille et de nature minéralogiques différentes. Secondairement, elle est formée de constituants organiques allant de fragments végétaux ou d'animaux à des macromolécules organiques complexes. En plus de cette complexité multiphasique, les variabilités de texture (composition granulométrique) et de structure (mode d'assemblage des constituants minéraux et organiques) confèrent au sol une importante complexité et une forte hétérogénéité spatiale à petite et grande échelles.

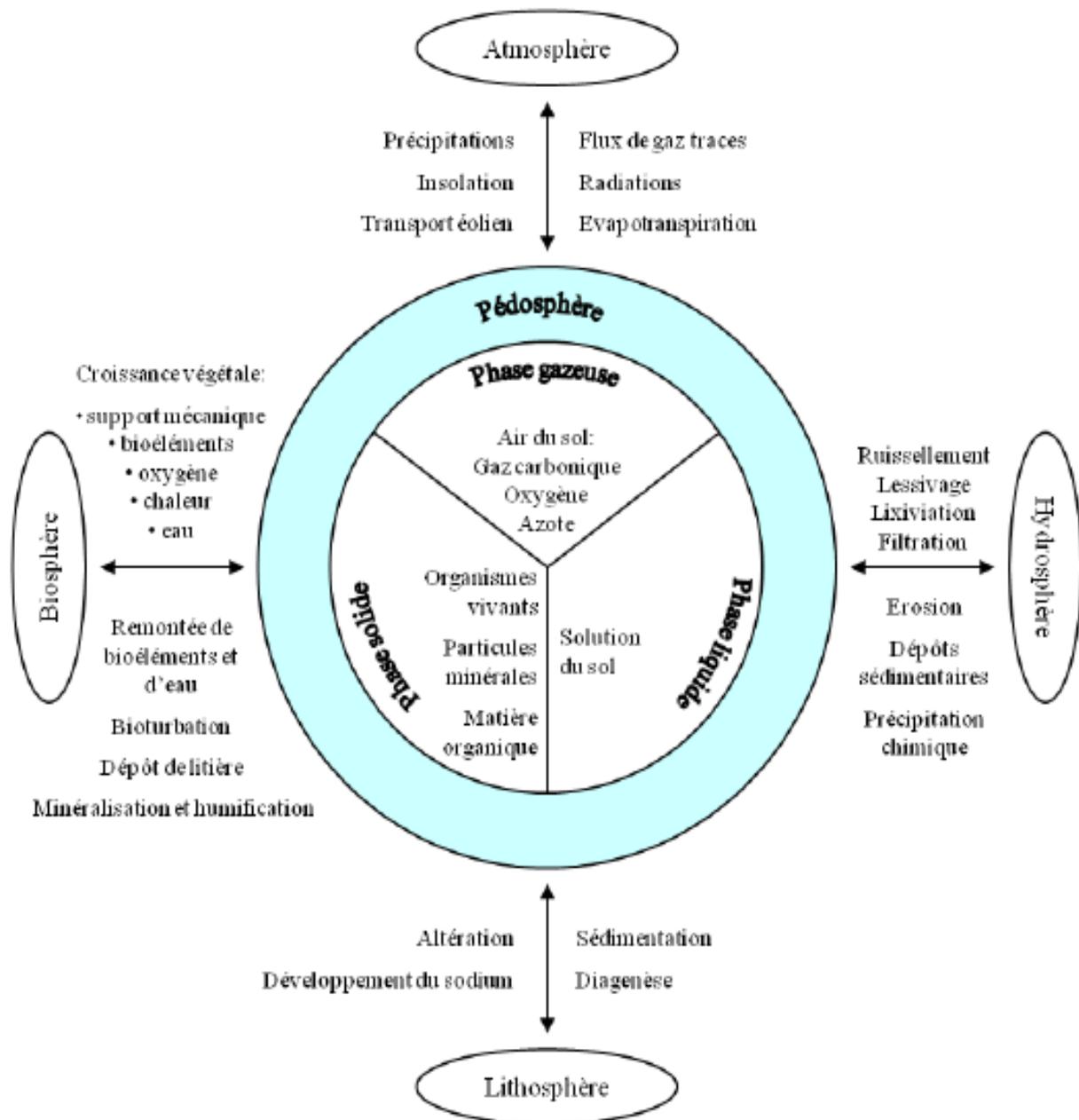


Figure. 3 : Le positionnement et la complexité externe et interne du sol. *Source : Gobat et al., 1998.*

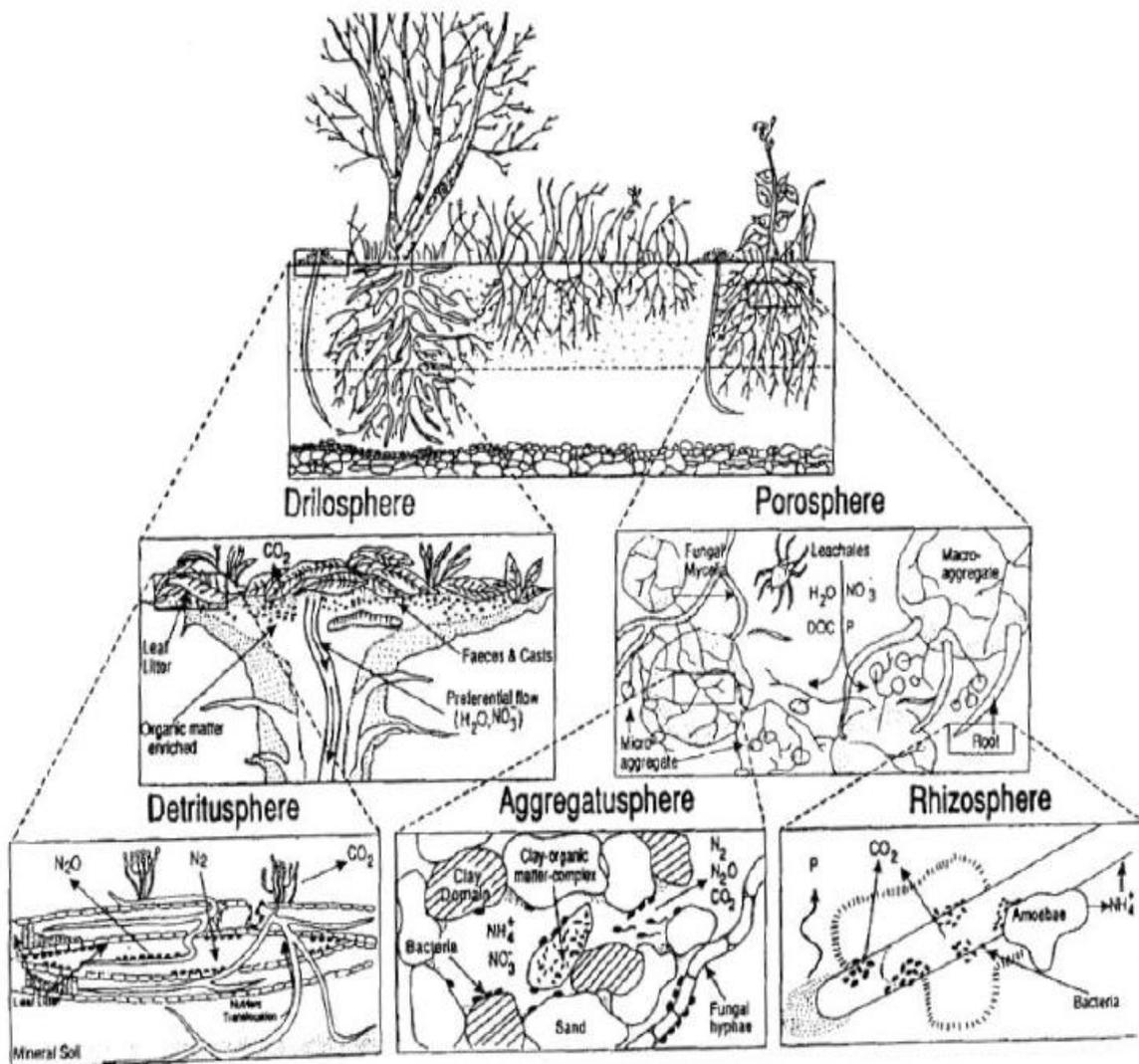


Figure. 4 : Vue du sol en termes de niches écologiques. *Source : Beare et al., 1995, dessiné par Terry Moore.*

L'organisation, qui en ressort, permet l'existence d'une mosaïque de micro- et de macro-environnements (agrégat, motte, parcelle, champ, paysage...) différents en termes de caractéristiques physico-chimiques et structurales qui représentent une multitude d'habitats pour les organismes indigènes (Bruand, 2009 ; Girard *et al.*, 2005). Au niveau des sols cultivés, la structure du sol évolue en permanence sous l'effet de diverses contraintes qui sont liées à l'action des engins et des outils, du climat et des êtres vivants dans le sol. Elles engendrent des processus comme le tassement, la fragmentation, la fissuration, la perforation, la prise en masse, l'effondrement et affectent aussi les caractéristiques physico-chimiques du sol (Girard *et al.*, 2005 ; Richard et Roger-Estrade, 2009).

Le sol est constitué de cinq composants majeurs : fraction minérale, matière organique, eau, air et organismes vivants (Alexander, 1977) [Figure .5]. Les matières organiques et minérales s'organisent de manière à créer des vides alors occupés par l'air et l'eau (les pores).

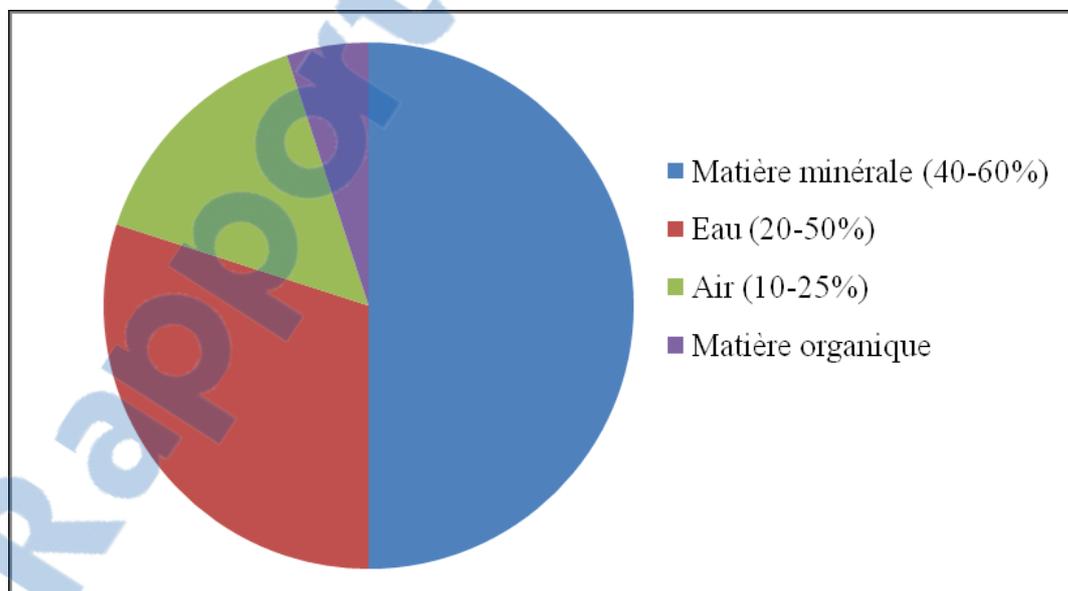


Figure. 5 : Proportion des principaux composants du sol en volume (White, 2006).

1.1.1. *La fraction minérale*

Dépend du type de roche mère à partir duquel le sol s'est formé. La fraction minérale des sols résulte de l'action de deux principaux phénomènes (Best, 1995). La désagrégation physique due aux alternances chaud/froid, le gel, le vent ou l'eau fractionnant la roche en morceaux de taille de plus en plus faible, les particules générées conservant la composition minéralogique initiale (Gobat, 2003). L'altération due à l'eau, associée ou non à l'oxygène, au gaz carbonique CO₂ ou à des acides organiques (Gobat, 2003) provoque une transformation des minéraux primaires avec formation de minéraux secondaires (comme l'argile) dont l'ensemble constitue le complexe d'altération (Duchaufour, 1977).

Cette fraction minérale est constituée de particules de différentes tailles, classées généralement selon leur diamètre : la fraction grossière (>2mm) et la terre fine (<2mm) (sables, limons et argiles). La proportion relative aux éléments de la terre fine détermine la texture d'un sol conditionnant directement la structure d'un sol. Les argiles sont le résultat de l'altération des roches par hydrolyse des minéraux silicatés (Gobat, 2003). Les minéraux argileux formés sont des phyllosilicates, constitués de feuillets organisés en couches. Certaines argiles sont capables d'expansion suite à l'hydratation des couches interfoliaires (Gobat, 2003). Une autre composante de la réactivité des particules argileuses est leur surface spécifique. Plus leur surface disponible est élevée, plus leur réactivité sera prédominante (Alexander, 1977). L'adsorption des molécules et ions à la surface des argiles augmente avec leur surface disponible par unité de masse (White, 2006). Par ailleurs les phyllosilicates argileux sont des colloïdes possédant d'autres propriétés qui vont influencer la structure, la porosité ou la capacité d'échange ionique du sol. En effet les argiles sont chargées électronégativement, sont hydrophiles, mais aussi lipophiles présentant un pouvoir de dispersion et de floculation. Ces propriétés varient suivant les structures minéralogiques et les surfaces développées respectives, régissent la formation d'agrégats, cimentent les particules et favorisent l'habitat microbien (Gobat, 2003).

1.1.2. *La matière organique*

Par ses propriétés physicochimiques, la matière organique interagit avec les particules de sol et participe ainsi à sa structuration. La matière organique fraîche provient des déchets des organismes, de leurs sécrétions ou des tissus morts. Mais elle provient majoritairement de débris végétaux (cellulose, hemicellulose, lignine, tanins) (Chenu, 1993). Ces composés organiques humifiés sont séparés en trois fractions suivant leur solubilité : les acides fulviques très solubles à tout pH, les acides humiques insolubles à pH acide, et l'humine insoluble. Les acides fulviques sont électronégatifs et ont la capacité de complexer les cations. Les acides humiques forment des complexes avec les argiles, les minéraux, et ions métalliques ainsi qu'avec les composés organiques hydrophobes (Parent et Velegol, 2004). Des composés lipidiques (acides gras, cires, résines) et azotés (ADN, chitine, muréline, urée, amines, protéines) sont également présents dans le sol. Ces composés provenant des bactéries, plantes ou animaux peuvent se fixer à des composés humifiés (Gobat, 2003) ou à des colloïdes minéraux. Le sol contient également des êtres vivants appartenant à chacun des grands groupes du vivant : bacteria, archeobacteria, et eucarya. Nous allons nous intéresser plus particulièrement aux bactéries et tous les microorganismes du sol, même si les autres groupes participent également à la structuration du sol interagissant donc avec les bactéries.

1.1.3. *L'eau et l'air*

L'eau circule et est retenue dans le sol par le réseau des pores. Ces pores sont occupés par un réseau aqueux discontinu, sauf quand le sol est saturé, portant des substances inorganiques ou organiques dissoutes et comprennent une phase gazeuse.

L'eau gravitationnelle circule librement dans les macro-pores de diamètre supérieur à 10 μ m, constitués entre les agrégats et à l'intérieur des macro-agrégats. Une partie de l'eau est fortement retenue par capillarité à l'intérieur des micropores (<10 μ m) (Robert, 1992) constitués à l'intérieur des micro-agrégats. La disponibilité de l'eau résulte de la combinaison des potentiels matriciel et osmotique. La rétention et potentiellement l'immobilisation de l'eau sont plus importantes dans les

microporosités dues à un potentiel matriciel plus élevé que dans les macroporosités, maintenant les microporosités dans un état plus humide que les macroporosités quand le sol est soumis à de fortes pluies. L'eau du sol est très importante dans l'écologie des micro-organismes du sol car la disponibilité des nutriments et l'intégrité des membranes bactériennes nécessitent que la solution du sol soit largement disponible et circulante (Ranjard et Richaume, 2001).

La diffusion des gaz, comme la circulation de l'eau, dépendent de la distribution de l'espace poreux. La diffusion de gaz est faible dans les micropores (Baver, 1961). Le faible renouvellement de l'atmosphère dans ces microenvironnements combinés avec la consommation biologique de l'oxygène, peuvent conduire à un développement rapide et à la persistance de conditions anaérobies. La survie des microorganismes dépend donc de leur capacité pour une respiration alternée, remplaçant l'oxygène par un autre accepteur final d'électrons. Il a été montré par exemple que les zones anaérobies à l'intérieur d'un agrégat artificiel sont préférentiellement colonisées par des populations bactériennes capables d'utiliser le nitrate comme accepteur final d'électrons (Philippot, 1996).

La proportion relative de liquide et de gaz affectant les phénomènes aérobie et anaérobies, dépend de la saturation des sols et de la circulation à l'intérieur du réseau des pores (Robert, 1992).

1.2. Le sol niche écologique de biodiversité

L'organisation du sol peut être aussi appréhendée en termes de niche écologique. Ces niches écologiques, dues en majeure partie à des apports de composés carbonés, sont des sphères d'influence où il existe une haute activité biologique. Actuellement, sept principales sphères d'influence (domaines fonctionnels) dans le sol ont été mises en évidence : la détritusphère, la rhizosphère, la porosphère, l'agrégatusphère, la drilosphère, la termitosphère et la myrmecosphère [Figure .3]. Elles ont été identifiées selon leur origine et leur importance dans les processus et les fonctions régulatrices majeurs du sol comme l'agrégation, la décomposition de la matière organique, les cycles des nutriments,

l'activité microbienne et la productivité des plantes (Beare *et al.*, 1995 ; Brown *et al.*, 2000) [Figure .4]. Au niveau des sols agricoles, la détritosphère (zone sous l'influence des résidus végétaux) et la rhizosphère (zone sous l'influence des racines) constituent les principaux «hots spots » d'activités biologiques (Gaillard *et al.*, 1999).

1.3. Le sol réservoir de diversité

Le sol est considéré comme l'habitat majeur de la biosphère terrestre. Il héberge de très nombreux organismes vivants, appelé biocénose, parmi lesquels on distingue [Tableau .2] :

- les racines des plantes ;
- la faune du sol (lombrics, mollusques, arthropodes, nématodes) qui est principalement dominée par les lombriciens grâce à leur redoutable compétitivité vis-à-vis des ressources trophiques du sol (Girard *et al.*, 2005) ;
- la microflore du sol: algues, champignons et bactéries, sans oublier les archées et virus qui restent largement à être explorés et qui sont donc souvent omis dans les inventaires de la biocénose (Fierer *et al.*, 2007b).

Cette composante vivante du sol peut représenter jusqu'à 4% du carbone organique total du sol et est conditionnée par la structure du sol, en raison de son importance pour l'ensemble du fonctionnement physique du sol (circulation de l'eau, de l'air, évolution de la température...). L'abondance relative et absolue des organismes indigènes du sol est en fonction de la taille des organismes et de leur capacité à coloniser les différentes niches disponibles dans la matrice sol [Tableau .2].

La biocénose du sol commence à être bien décrite, principalement au niveau des macro-organismes, et l'objectif des scientifiques, à l'heure actuelle, est de relier cette forte diversité au fonctionnement des écosystèmes et d'identifier les conséquences de modifications et/ou perte de diversité (Coleman *et al.*, 2005).

Tableau .2 : Biocénose du sol : ordres de grandeur par famille.

		Nombre d'espèces	Taille	Abondance	Biomasse (g/m ²)	Régime alimentaire
Faune du sol						
Microfaune (Microphages-Consommateurs des colonies bactériennes)	Nématodes	65	0,1 à 5 mm	10 ⁶ à 10 ⁸ / m ²	1 à 30 g/m ²	Champignons, bactéries, débris organiques, algues (action de prédation stimulant le renouvellement de la microflore)
	Protozoaires	68	0,2 mm	10 ³ à 10 ¹¹ / m ²	6 à > 30 g/m ²	
Mésafaune (Broyeurs de feuilles)	Arthropodes inférieurs et enchytraéides	Arthropodes : 140 Enchytraéides : 36	de 0,2 à 4 mm	2 x 10 ⁴ à 4 x 10 ⁵ /m ²	0,2 à 400 g/m ²	Résidus de végétaux, algues, champignons, bactéries
Macrofaune (« Ingénieurs de l'écosystème » : fragmentation des matières organiques et brassage avec les matières minérales)	Taupes, hérissons, lombrics, araignées, myriapodes (mille-pattes), fourmis, ...	Lombrics : 11 Myriapodes : 6 ...	Taille > 1cm (ex : lombrics : 3 à 30 cm, jusqu'à 3m)	Lombrics : 10 à 10 ³ /m ² Myriapodes : 20 à 700 /m ² ...	Lombrics : 20 à 400 g/m ² Myriapodes : 0,5 à 12,5 g/m ² ...	Résidus de végétaux, champignons, bactéries, cadavres d'invertébrés
Microflore du sol (micro-organismes)						
Bactéries	Indispensables au fonctionnement des cycles du carbone et de l'azote		de l'ordre du µm	10 ⁸ à 10 ⁹ / g de sol	2 à 200 g/m ²	Matière organique, azote atmosphérique
Champignons	Dégradent la matière organique morte	104 génotypes microbiens différents /g de sol	> 1 µm	10 ⁴ à 10 ⁶ /g de sol	100 à 150 g/m ²	Résidus de végétaux, parasite ou symbiote mycorhizien
Algues	Capables de créer de la matière organique à partir d'éléments minéraux sans photosynthèse		0,2 mm	10 ² à 10 ⁴ / g de sol	5 à 20 g/m ²	Arthropodes

1.4. Le sol source de fonctions environnementales

Les fonctions environnementales du sol sont multiples [Figure. 6] et participent aux services écosystémiques; entre autre, on retrouve des fonctions liées à la production agricole, à la régulation des flux, à la dynamique des écosystèmes, à la protection contre les pollutions et au support physique des activités anthropiques.

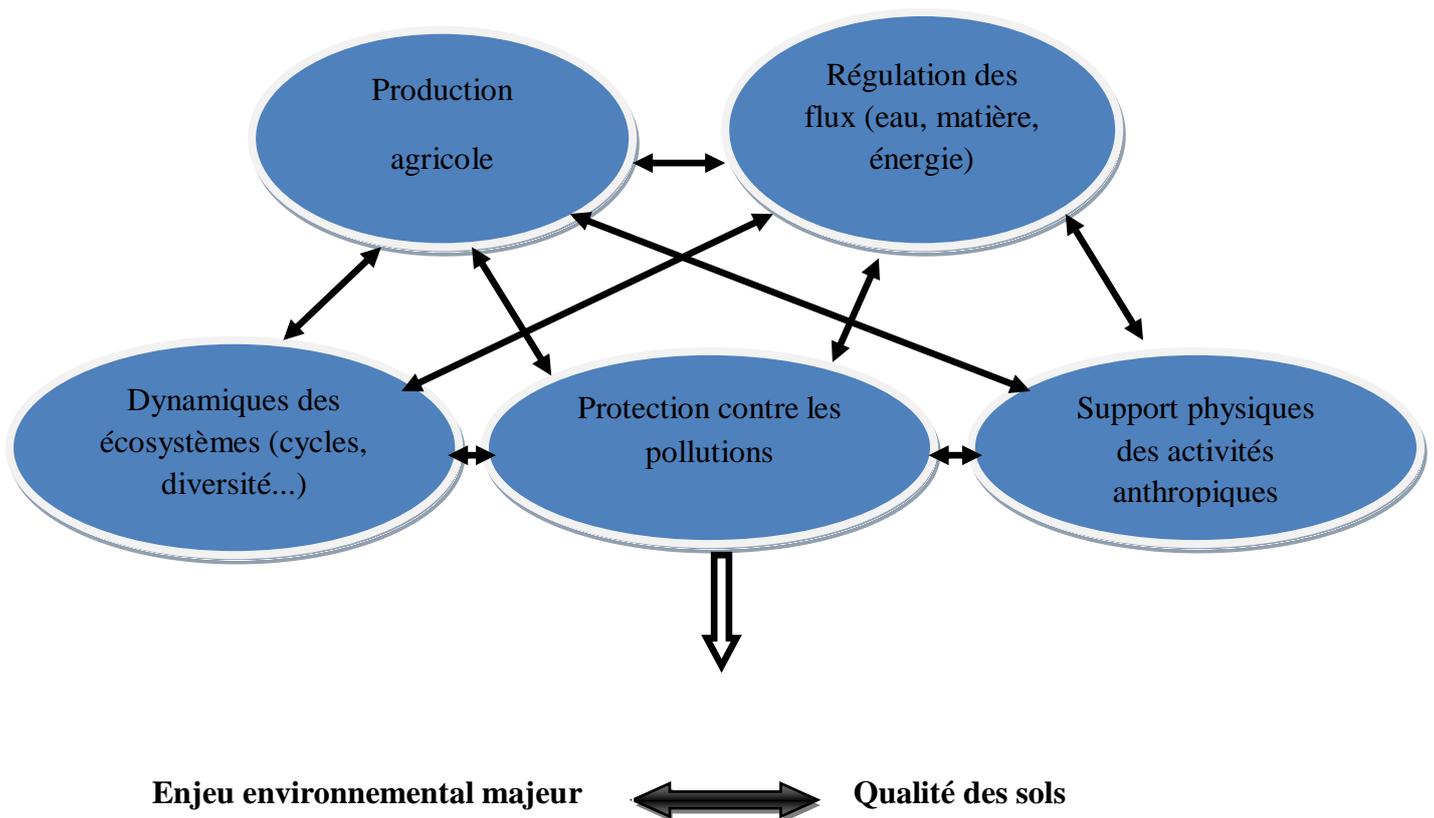


Figure .6 : Les fonctions environnementales du sol. Selon ;Gobat et al., 1998.

Il en résulte que le sol est une ressource essentielle pour les sociétés humaines et les écosystèmes. Sachant que cette ressource est fragile et non renouvelable à une échelle de temps humaine (dû aux vitesses de dégradation qui peuvent être très rapides contrairement aux processus de formation et de régénération qui sont extrêmement lents), il convient de protéger la qualité des sols (c'est-à-dire son aptitude à remplir ses fonctions) contre les dégradations croissantes liées notamment

à la croissance démographique (besoins alimentaires, besoins de logements et d'infrastructures) ou aux pollutions (ponctuelles ou d'origine atmosphérique).

2. Les caractères édaphiques du sol

2.1. Les caractérisations physiques

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. Les propriétés physiques d'un sol dépendent de la quantité, la taille, la forme, l'arrangement et la composition minérale de ses particules. Ces propriétés dépendent aussi de la teneur en matière organique et elles sont liées aussi à deux notions fondamentales : la texture et la structure (AgriInfo.in, 2011 ; Drouet, 2011).

2.1.1. 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). La proportion de chaque groupe de taille dans un sol donné (la texture) ne peut pas être facilement modifiée et il est considéré comme une propriété fondamentale d'un sol. En effet l'analyse granulométrique permet de fractionner le sol en différentes classes, selon la *loi de Stokes*

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

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)

a. Les sables

Dont le diamètre des particules est compris entre 0.05 mm et 2 mm, est constitué de quartz, et peut également contenir des fragments de feldspath et mica et des minéraux lourds tels le zircon, tourmaline et d'amphibole.

Le sable est représenté par des dimensions uniformes qui peut être généralement sphérique qui n'est pas nécessairement lisse et a une surface dentelée caractérisée par l'absence de cohésion et de plasticité et très difficile à mouler (Bonin, 2006 ; Giasson et Jaouich, 2008 ; AgriInfo.in, 2011).

b. Les limons

La taille des particules est intermédiaire entre le sable et l'argile. Le limon a un diamètre compris entre 2 μ m et 0.05mm. Il participe avec l'argile et le sable à former le squelette du sol qui se caractérise par une plasticité et une cohésion modérée. (Bonin, 2006 ; Giasson et Jaouich, 2008 ; AgriInfo.in, 2011).

c. Les argiles

La taille de ces particules est inférieure à 0,002 mm. Il a une forme d'une aiguille ou une plaque, appartenant à un groupe des minéraux aluminosilicates

Ce sont des minéraux secondaires provenant de minéraux primaires dans la roche et se caractérise par une plasticité et une cohésion modérée. (Bonin, 2006 ; Giasson et Jaouich, 2008 ; AgriInfo.in, 2011).

2.1.2. La classe texturale du sol

La texture du sol est donc définie par une analyse de la distribution de taille de particules par différentes méthodes représentatives. En général, les méthodes sont utilisées pour séparer les particules de sol en trois différentes classes : sable, limon et argile. Le sol est aussi classé en fonction de la proportion des grains appartenant aux trois classes principales qui sont représentées sous forme de triangle [Figure .8]

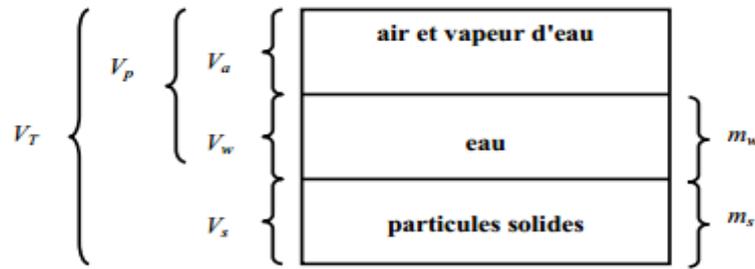


Figure. 7 : Représentation schématique de la constitution d'un volume de sol.

V_T : volume total apparent

m_T : masse totale

V_s : volume de la phase solide

m_s : masse de la phase solide

V_w : volume de la phase liquide

m_w : masse de la phase liquide

V_a : volume de la phase gazeuse

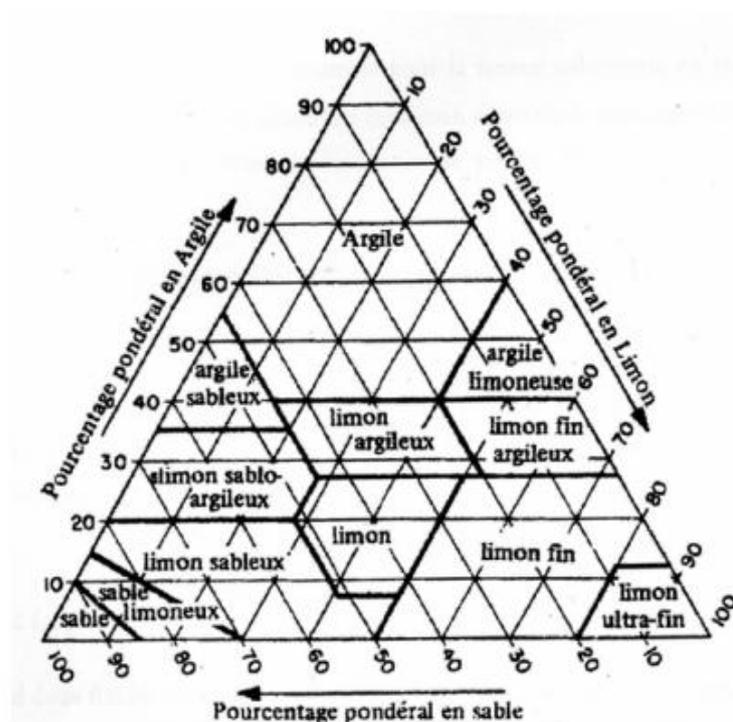


Figure. 8 : Triangle de textures. Selon le Département de l'Agriculture des États-Unis (USDA).

2.1.3. *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 très fertile. (AgriInfo.in, 2011 ; Drouet, 2011).

En générale, les meilleurs sols agricoles sont celles contiennent : 10-20 % d'argile, 5-10% de la matière organique et le reste à partager entre le limon et sable (AgriInfo.in, 2011).

2.1.4. *La structure*

La structure du sol peut être définie comme le regroupement de particules primaires du sol en de larges unités de composés d'origine, de taille et de formes différentes (Lavelle et Spain 2001). Ces unités sont séparées entre eux par les espaces porales, lesquelles permettent les mouvements d'eau et les échanges gazeux avec l'atmosphère. Ces unités structurales peuvent résulter du découpage du sol par des fissures provoquées par des contraintes mécaniques dues, soit aux variations de volume, à l'humidification (gonflement) ou à la dessiccation, soit au travail du sol (Lavelle et Spain 2001; Callot *et al.*, 1982). Ils peuvent aussi provenir directement ou indirectement de l'action biologique de la faune et de la flore du sol ainsi que de l'activité racinaire (Oades, 1993).

La structure du sol a une importance considérable sur son fonctionnement. D'une part, elle détermine la pénétration des racines dans le sol, d'autre part, elle agit sur les déplacements d'eau, d'éléments nutritifs de la masse du sol vers les racines (Callot *et al.*, 1982; Lavelle et Spain, 2001). La structure du sol agit également sur la distribution et l'activité des organismes du sol à travers son influence sur la circulation de l'eau, la distribution de la matière organique et des éléments nutritifs ou fournissant des habitats ou refuges favorables aux organismes du sol (Lavelle et Spain, 2001). La structure du sol agit directement sur les nématodes, en limitant leur déplacement. Elles les affectent aussi indirectement, à travers la disponibilité de l'eau, de l'O₂ et de substrats (Nicholas, 1975).

2.1.5. Les agrégats micro-habitats du sol

Les minéraux argileux n'existent généralement pas sous forme libre dans le sol, mais seulement en couches, ou en revêtement sur les particules de sables et de limons, ou aussi en unités orientées entre ces particules et associé à la matière organique du sol. Les agrégats du sol sont des combinaisons de composés organiques et minérales du sol, rassemblés en micro (<50 µm de diamètre) et macroagrégats (<50 µm de diamètre en moyenne). Reliés par des filaments mycéliens, ils ont la caractéristique de ne pas se disperser dans l'eau. Ils constituent l'un des biotopes particuliers du sol, l'autre étant représenté par les espaces interagrégats (Arpin *et al.*, 1980). De part leur constitution physique, leur composition chimique et biologique, ils représentent dans le sol des micro-habitats très importants pour les procaryotes.

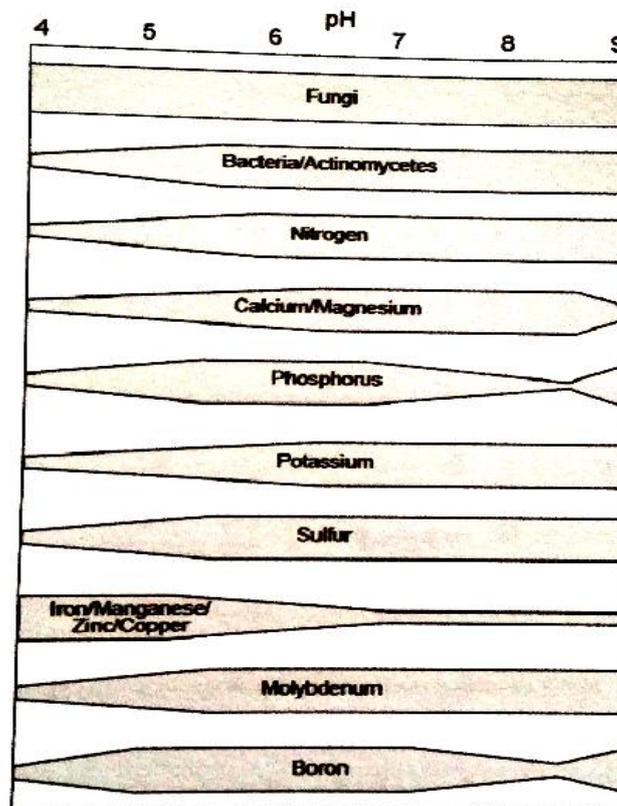
2.1.6. La porosité du sol

L'empilement des particules de sol dans les agrégats et aussi des agrégats dans le sol, laisse, une certaine quantité de vides qui constituent la porosité du sol (Callot *et al.*, 1982) dans laquelle gaz et liquide peuvent circuler. La taille et la forme des pores, le potentiel hydrique de l'eau, la présence de substrats (carbones assimilables, organismes proies etc ...) dans ces pores et leurs conditions d'aération sont autant de facteurs qui contrôlent la distribution et l'activité des organismes dans le sol.

La porosité du sol constitue un facteur important dans les relations trophiques dans les sols, notamment dans les relations nématodes et populations microbiennes et minéralisation de l'azote (Hassink *et al.*, 1993, 1994).

2.1.7. 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 microorganismes dans le sol. L'effet du pH sur l'activité microbienne et la disponibilité des nutriments dans les sols minéraux, est illustré par la figure 9 (Rosen *et al.*, 2008).

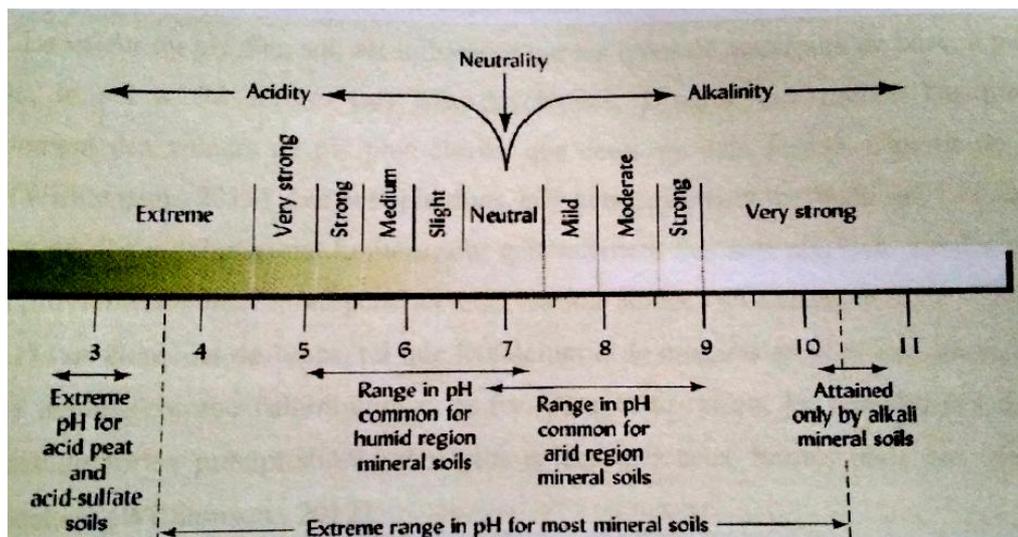


- Plus large est la bande, plus grande est la disponibilité ou l'activité.
- Voir la traduction française de la légende anglaise en page 138 de l'annexe.

Figure. 9 : 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 touche 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 nous sommes référés à la gamme du pH proposé par Brady et Weil, 2008 [Figure. 10].



- Voir la traduction française de la légende anglaise en page 138 de l'annexe.

Figure. 10 : Gamme de pH extrêmes pour la plupart des sols minéraux et gammes dans les 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
	<4.5	Too acid for most plants

- Voir la traduction française de la légende anglaise en page 139 de l'annexe.

Figure. 11 : le pH du sol et la croissance des plantes d'après Whiting *et al.*, 2010.

Pendants les saisons où les précipitations sont 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).

a. 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).

2.1.8. 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 maximal 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 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).

2.2. Les caractérisations chimiques

2.2.1. 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 microbiologique, ainsi que, la stimulation de la croissance racinaire (AgriInfo.in, 2011).

2.2.2. Le calcaire total

Le calcaire total est une composante héritée 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).

2.2.3. *Le calcaire actif*

La quantité du calcaire peut nous renseigner sur la réactivité du calcaire. Le calcaire actif est important pour les plantes, son diamètre est inférieur à 20 µm (Baize, 2000).

2.3.4. *Le fonctionnement biologique du sol*

Le sol est un milieu biologique vivant où se développe une activité très intense de plantes, animaux et microorganismes. C'est donc un assemblage d'organismes extrêmement divers, qui régulent les processus de décomposition de la matière organique et du flux des nutriments à travers un réseau trophique très complexe dans le sol (Bardgett et Griffiths, 1997).

3. Les microorganismes du sol

3.1. Historique de l'écologie microbienne

Le premier symposium en écologie microbienne a eu lieu en 1957, le premier ouvrage sur cette discipline fut publié par Brock en 1966 et les premiers journaux scientifiques destinés à l'écologie microbienne sont apparus en 1974 et 1976, on prend en exemple (*Applied and Environmental Microbiology* et *Microbial Ecology*).

C'est à la fin du XIX^{ème} - début du XX^{ème} siècle, que les microbiologistes se sont penchés sur le rôle écologique des microorganismes en étudiant leurs interventions dans les différents cycles comme celui du carbone, de l'azote et du soufre. On peut citer : Sergei Winogradsky qui a découvert les bactéries photosynthétiques responsable de l'incorporation du CO₂ dans la matière organique et a étudié la décomposition de la cellulose.

Plusieurs études sur la vaste diversité microbienne dans les sols (Bakken *et al.*, 1985 ; Torsvik *et al.*, 1990 ; Amann *et al.*, 1995) et ces interactions avec d'autres organismes et celles avec leur habitat (initié par Brock en 1987) ont stimulé le développement d'un grand progrès méthodologiques pour s'affranchir des meilleurs méthodes de culture.

En 1985, Pace *et al.* Introduisent une approche basée sur l'extraction, l'amplification, le clonage et la caractérisation des gènes d'ADNr directement des

environnements naturels et ouvrent la voie à des innovations techniques majeures en biologie moléculaire et en biochimie (électrophorèse, amplification *in vitro* de l'ADN, bio-informatique) permettant l'étude du génome de ces populations (génomique).

Plusieurs études ont été consacrées à ce type d'approche et ont fourni les bases pour comprendre le monde microbien et son rôle dans le fonctionnement des écosystèmes (Torsvik *et al.*, 1990).

Cependant l'ADN de la microflore ne correspond qu'au potentiel génétique de la communauté et non à son activité. Or un des enjeux des études d'écologie microbienne est de mettre en relation la diversité génétique et les activités de la microflore afin d'étudier et de prédire le fonctionnement des communautés microbiennes et ses conséquences sur l'environnement.

C'est pourquoi depuis la fin des années 1990, des progrès continuent d'être réalisés dans le domaine du transcriptome (étude des ARN) et du protéome (étude des protéines) grâce au développement de méthodologies pour extraire, amplifier et caractériser les ARN et les protéines.

Au jour d'aujourd'hui, l'écologie microbienne est connue pour être une science intégrative avec des interconnexions fortes avec la systématique, la génétique, la biochimie, la biologie moléculaire, la physiologie, la modélisation, la paléobiologie, les sciences du sol, la parasitologie, l'épidémiologie...avec des implications importantes dans l'alimentation, la santé publique et l'environnement qui nécessitent encore des avancées technologiques pour améliorer notre compréhension des processus gérés par les microorganismes.

3.2. La grande diversité des sols

Les microorganismes sont une composante essentielle du sol, principalement représentée par les champignons (eucaryotes) et les bactéries (procaryotes). Une densité de 10^9 microorganismes par gramme de sol peut être atteinte, ainsi que de formidables niveaux de diversité : quelques dizaines à centaines de milliers de taxons ou groupes microbiens par gramme [Tableau. 2] (Torsvik, 2002). Malgré cette fantastique diversité, seulement 7000 procaryotes ont été décrits à l'heure actuelle (Alain *et al.*, 2009).

Les microorganismes du sol sont constitués de 5 principaux groupes: les virus, les bactéries les actinobactéries, les champignons, les levures, les algues et les protozoaires. Mais les bactéries, les actinobactéries et les champignons représentent l'essentiel de la biomasse microbienne du sol (Lavelle et Spain, 2001; Focht et Martin, 1979). Leurs activités sont proposées par Roger *et al.* (2001). [Tableau.3]

Tableau. 3 : Principaux taxons de microorganismes du sol (Roger *et al.*, 2001).

Grands groupes	Taxons considérés comme importants dans le sol	Commentaires
Virus		
Procaryotes photosynthétiques	Cyanobactéries	Ex. Cyanophycées (algues)
Bactéries	Bactéries pourpres et vertes	
	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	
	Eugléniens	aussi dans les Protozoaires
	Algues jaunes, Diatomées	
Protozoaires	Amibes	
	Testacés	
	Flagellés	
	Ciliés	

3.2.1. Les bactéries

Les bactéries sont ubiquitaires et présentent une population très abondante dans le sol. Leur activité est principalement concentrée dans les premiers cm du sol. et constituent avec les champignons la biomasse dominante du sol (Anderson et Domsch, 1978; Christensen et Funck-Jensen, 1989). C'est également une population très diversifiée estimée à 30000 espèces dans le sol (Hawksworth et Mound, 1991).

On note que parmi ces bactéries, les bactéries hétérotrophes qui sont les plus dominants des microorganismes dans le sol. En plus de la consommation et la minéralisation, elles jouent un rôle essentiel dans le flux d'énergie à travers le sol (Bakken, 1997; Focht et Martin, 1979, Berthelin et Toutain, 1979).

Les bactéries interviennent également dans un grand nombre d'interactions mutualistes et antagonistes avec les autres organismes du sol. Elles représentent un maillon dans les différents cycles comme le cycle de l'azote (ammonification, nitrification, dénitrification, fixation symbiotique de N₂), du carbone (décomposition et minéralisation) du phosphore et du soufre. Ceci en plus du recyclage des déchets et des polluants principalement les pesticides (Toop *et al.*, 1997; leung *et al.*, 1997). Elles interviennent également dans le maintien de la structure du sol, par la formation d'agrégats et amélioration de la porosité par le biais de la fabrication d'humus.

3.2.2. *Les actinobactéries*

Les actinomycètes sont des bactéries filamenteuses hétérotrophes qui sont pour la plupart des gram-positifs. Ces bactéries possèdent un mycélium plus en moins ramifié dont le diamètre varie entre 0,5-1,5 μ m qui est plus fin que celui des champignons (Berthelin et Toutain, 1979).

Ils ne se développent pas durant ces premiers stades en raison de leur inaptitude à la compétition, par contre, ils se développent relativement bien sur une matière organique partiellement dégradée et inapte à porter une microflore fongique et bactérienne (Crawford, 1993).

Les actinomycètes sont des décomposeurs primaires de la matière végétale résistante comme l'écorce, les feuilles et les tiges. Parmi ces microorganismes, les *Frankia* qui forment des symbioses fixatrices d'azote en associations avec les casuarinacées et d'autres plantes supérieures (Lavelle et Spain, 2001; Normand *et al.*, 2000 et Stolp, 1988) et ils produisent des substances probiotiques et antibiotiques (Kieser *et al.*, 2000).

La plupart des actinomycètes sont terrestres, certaines espèces sont marines (Mincer *et al.*, 2002). La plupart des espèces sont chimioorganotrophes, aérobies, mésophiles et croissent de façon optimale dans la gamme de pH 5,0 à 9,0 avec une proximité optimale à la neutralité (Williams et Wellington, 1982a; Goodfellow et Williams, 1983).

La disponibilité des nutriments, la nature et l'abondance de la matière organique, la salinité, la teneur en humidité relative, la température, le pH et la végétation du sol sont les facteurs qui contrôlent l'abondance et l'activité des actinomycètes dans le sol (Goodfellow et Williams, 1983).

Elle est essentiellement représentée par les genres *Nocardia* et *Streptomyces*, et en général 3 à 15 fois plus faible que celle des bactéries variant entre 10^5 et 10^8 unités /g de sol. Leur densité augmente dans les sols alcalins et décroît dans les sols acides (Goodfellow et Williams, 1983).

3.2.3. Les champignons

Les champignons sont des eucaryotes dotés d'une structure filamenteuse végétative appelée mycélium. La plupart ont une membrane chitineuse et constituent quatre principaux groupes qui diffèrent par la structure de leur mycélium et de leur organe reproducteur: les Zygomycètes, les Ascomycètes, les Basidiomycètes et les Deutéromycètes (Lavelle et Spain, 2001). La majorité des grands groupes taxonomiques de champignons sont hébergés dans le sol (Thorn, 1997). Ils présentent une grande diversité dont le nombre est estimé à 1,5 millions (Hawksworth et Mound, 1991).

Ils sont souvent dominants dans les sols (Shields *et al.*, 1973). Dans certains cas ils sont importants en constituant une portion du pool de nutriment, pouvant être plus important que tous les autres microorganismes, plantes et animaux réunis (Anderson *et al.*, 1978 et Nannipieri *et al.*, 1978). Ils jouent des rôles importants dans les cycles des nutriments du sol (Thom, 1997, Bloem *et al.*, 1994) notamment dans la décomposition de la matière organique en dégradant la cellulose et la lignine des végétaux (Maier *et al.*, 2000). Ils sont aussi impliqués dans les chaînes alimentaires

complexes par leurs interactions trophiques avec la faune et les autres microorganismes, comme source de nourriture mais aussi comme parasites ou prédateurs. Ils interviennent dans un grand nombre d'interactions mutualistes (mycorhizes, champignon-termites) et ont une part une importance dans plusieurs relations commensales et compétitives avec les autres organismes du sol. C'est des microorganismes qui interviennent dans le recyclage des déchets (Moore et de Ruyter, 1991; De Ruyter *et al*, 1993).

3.2.4. *Les levures*

Les levures sont des champignons unicellulaires pour une partie ou l'ensemble de leur cycle végétatif. Certaines peuvent former des associations cellulaires ou se présenter sous une forme filamenteuse à certains stades de leur vie (Bouix et Leveau, 1991). Elles se reproduisent par bourgeonnement ou par fission binaire (scissiparité) (Kreger-Van, 1984).

Dans la nature, les levures se trouvent principalement sur les végétaux riches en sucres directement assimilables (Bouix et Leveau, 1991). D'autres, se développent au niveau des eaux douces et profondes associées au plancton (Van Uden et Fell, 1968 et Ahearn, 1973). Par ailleurs, une large variété de levures vit à la surface des plantes, des champignons et des animaux.

Les levures sont distribuées dans le sol 10^5 à 10^6 unités formant des colonies par gramme de sol on cite comme exemple quelques espèces *Debaryomyces occidentalis*, *Schizoblastosporion strakeyihenricci* et certains d'espèces de *Lipomyces* et *Cryptococcus*. (Phaff et Starmer., 1987).

3.2.5. *Les virus*

Ce sont les 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 Gracia, 2001).

3.2.6. Les algues

Les algues, considérées comme relativement peu abondantes, sont rencontrées à la surface ou la couche superficielle du sol (Wild, 1993), en incluent des espèces coccoïdes ou filamenteuses. Contrairement aux Cyanobactéries qui sont dominantes dans les sols neutres et alcalins, les algues sont les plus courants dans les sols acides. Les groupes les plus courants sont ; les Chlorophyceae, *Chlorococcum humicola* , quelques *Oedogonium* et *Vaucheria*.

Les formes du sol sont habituellement plus petites que les formes aquatiques, la plupart sont cosmopolites exp: *Hantzschia amphixus*, des espèces de *Nostoc*, *Chlamydomonas*, *Stichococcus*, *Zygonium* et *Hormidium*.

Les algues jouent un rôle important dans de nombreux domaines [Figure. 12] elles sont utilisées en agriculture comme engrais biologique pour la fertilisation des sols pauvres, en particulier les sols sahariens squelettiques dont la structure est amoindrie par l'abondance des ions sodium dans l'eau d'irrigation, ce qui engendre des conditions asphyxiantes très défavorables ; ainsi l'apport d'algues riches en azote à ce type de sol, peut corriger l'insuffisance en matière organiques. Par ailleurs, ces mêmes algues représentent une source potentielle de protéines alimentaires non négligeable (50 à 60 % du poids sec) pour l'homme et l'animal qu'il soit terrestre ou aquatique (S. Chader et A. Touzi, 2001).

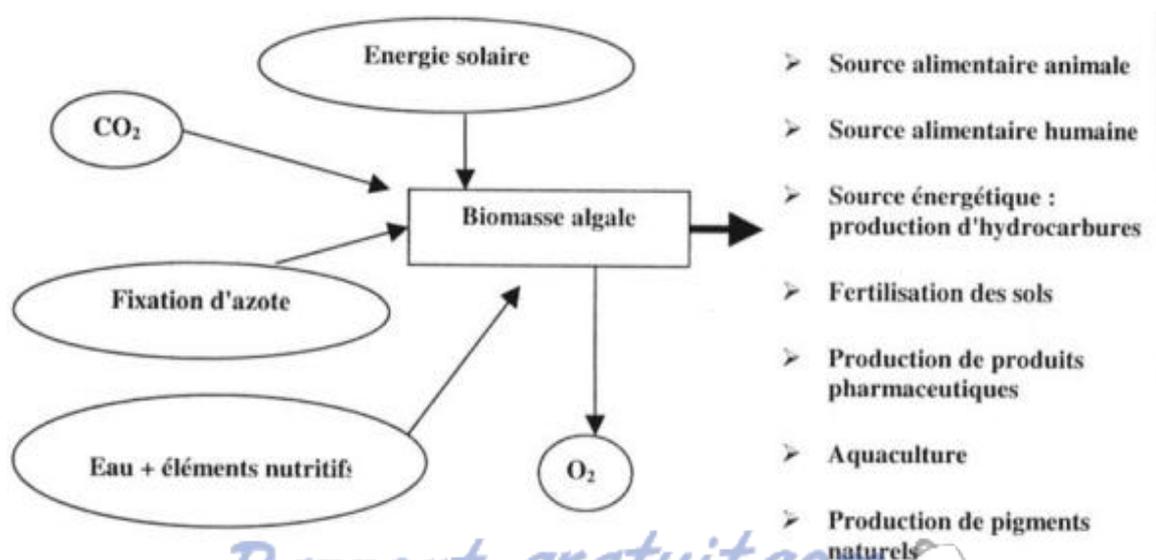


Figure. 12: Les différents rôles des algues d'après S. Chader et A. Touzi, 2001.

3.2.7. *Les protozoaires*

Les genres de protozoaires du sol sont les même que ceux des environnements aquatiques. On estime $1.0 \cdot 10^9$ qui sont exclusivement trouvés dans le sol. Les espèces les plus communes sont: *Heteromita globosa*, *Colpoda cucullus* et *Hartmanella hyalina*. Ce sont des consommateurs de bactéries, de levures et de champignons, leurs populations exigent l'existence d'un haut degré d'humidité. Ils s'enkystent par sécheresse, ils jouent un rôle important dans la composition et les activités microbiologique du sol on prend l'exemple de la décomposition de la matière organique (Maier *et al.*, 2000)

3.2.8. *La faune du sol*

En plus des microorganismes, le sol héberge une population d'invertébrés et les organes souterrains des végétaux, dont les activités nutritionnelles régissent le fonctionnement de la microflore décomposeur et régulent les flux d'énergie et de nutriments (Bardgett et Griffiths, 1997). Les invertébrés qui composent la faune du sol peuvent être différencié selon leur taille en 2 groupes (Swift *et al.*, 1979).

-La microfaune dont la taille est comprise entre $200 \mu m$ et 1 cm , elle regroupe essentiellement les nématodes et les protozoaires .Ils ont un impact très important sur les microorganismes du sol et sur la minéralisation des nutriments (Ekschmitt *et al.*, 1999; Ferris *et al.*, 1998; Griffiths, 1994; Griffiths *et al.*,1992) ,cette fonction est expliqué comme suit ;Les nutriments immobilisés dans la biomasse microbienne ne sont pas bloqués de manière définitive. Les cellules microbiennes peuvent en effet mourir et être lysées pour diverses raisons, et notamment lorsqu'elles sont tuées par des virus bacteriophages ou mangées par des organismes microbivores du sol. De nombreuses espèces de protozoaires et de nématodes, mais aussi de collemboles se nourrissent en effet de bactéries et/ou de champignons et maintiennent ainsi une pression sur les populations de microorganismes. Or cette microbivorie conduit à une minéralisation de nutriments et à une possibilité de prélèvement de ces nutriments par les plantes.

-La macrofaune qui regroupe les organismes dont la taille est supérieure au centimètre. Dans les sols tropicaux, la macrofaune est dominée essentiellement par les termites et les vers de terres (Lavelle *et al.*, 1990). Ils sont qualifiés comme ingénieurs en raison de leurs impacts sur les caractéristiques physiques du sol (Jones *et al.*, 1994).

3.2.9. *Les organes souterrains des végétaux*

Le sol est aussi colonisé par les organes souterrains des végétaux, principalement par les racines. La présence de ces organes entraîne de multiples conséquences sur les autres communautés vivantes mais aussi sur les caractéristiques physico-chimiques des sols. Au cours de leur croissance, les racines exercent une forte pression sur les particules minérales entraînant leur réorganisation (Foster, 1988). Conjointement, elles exsudent des composées organiques qui favorisent la formation d'agrégats. Les exsudats et les débris racinaires sont la source de 30 à 40% des entrées organiques dans la grande majorité des écosystèmes terrestres.

Ces entrées favorisent dans la rhizosphère activité microbienne très active (Sorensen, 1997; Bottner et Billes, 1987; Coleman *et al.*, 1978b) et une grande diversité de microorganismes (Bottner et Billes, 1987) et beaucoup d'invertébrés comme les nématodes et les protozoaires (Griffiths *et al.*, 1999).

La production de matériels mucilagineux et l'exsudation composés carbonés solubles (sucres, acides aminés, acides organiques etc ...) jouent un rôle important dans la colonisation racinaire et le maintien de la croissance microbienne dans la rhizosphère (Sorensen, 1997). La quantité et la composition des exsudats varient selon les espèces de plantes (Lavelle et Spain, 2001; ülsson et Alstrom, 2000; Sorensen, 1997). Ce qui entraîne des taux de prolifération microbienne différents (Graystone *et al.*, 1996). Ces exsudations peuvent influencer indirectement l'activité des prédateurs des microorganismes rhizosphériques.

3.3. Facteurs influençant la structure des communautés microbiennes du sol

Beaucoup de paramètres biotiques et abiotiques interviennent pour modéliser les communautés microbiennes des sols (Hassink, 1993, Borneman *et al.*, 1996, Borneman et Triplett, 1997). La dynamique microbienne est aussi très importante et les perturbations du sol ont de profondes répercussions sur la structure des communautés. Un certain nombre d'études ont toutefois permis d'identifier les facteurs présentant une influence marquée sur la structure des communautés microbiennes (Tarlera *et al.*, 2008).

3.3.1. Facteurs abiotiques

Au cours du temps, le sol subit des changements, qui augmentent la complexité globale de l'environnement sol (Nunan, 2001, Zhou *et al.*, 2002). Tarlera *et al.*, 2008 ont montré que le développement de l'écosystème sol favorisait le développement de communautés microbiennes.

Les changements d'utilisation des terres, particulièrement la conversion des forêts en pâturage ou en champs cultivés, est un événement fréquent et un facteur affectant la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes terrestres (Sala *et al.*, 2000). Les effets de l'utilisation des terres sur l'altération des propriétés physiques et chimiques des sols ont été beaucoup étudiés. En effet, des changements d'utilisation des terres peuvent avoir des impacts significatifs et de long terme sur le carbone du sol, le contenu en nutriments, la texture du sol et le pH (Murty, 2002).

La variabilité des facteurs édaphiques à travers différentes utilisations des terres peut avoir un effet significatif sur la structure des communautés microbiennes (Lauber, 2008).

Les communautés sont dominées par 5 groupes majeurs *Acidobacteria*, *Actinobacteria*, *Proteobacteria*, *Bacteroidetes* et *Firmicutes* (Janssen, 2006). L'effet d'une perturbation sur les communautés bactériennes dépend de sa durée et de sa spécificité. Après une perturbation transitoire, le système peut retrouver son état, tandis qu'une perturbation permanente résulte en un nouvel état altéré (Rykiel,

1985). Les perturbations avec un mode spécifique d'action altèrent seulement quelques groupes d'organismes (*ex* : le groupe des *Proteobacteria* réagit de manière sensible au changement des niveaux de carbone dans le sol (Asuming-Brempong, 2008) tandis que celles qui agissent non spécifiquement affectent un grand nombre de bactéries (Muller *et al.*, 2002).

Les communautés microbiennes sont variables et dépendent de nombreux facteurs (Noguez, 2005). Plusieurs études suggèrent même que les caractéristiques des sols (Girvan *et al.*, 2003 ; Singh, 2006), qui conditionnent la distribution spatiale (Nunan *et al.*, 2005 , Ritz, 2004), sont les facteurs les plus importants dans le modelage de la communauté microbienne.

a. Influence du travail du sol

Les études menées ont montré un apport des plantes entraînant une importante augmentation de biomasse microbienne dans le sol ayant subi le moins de perturbations dues au travail du sol accumulé dans le temps (Lundquist *et al.*, 1999 ; Spedding *et al.*, 2004 ; White & Rice, 2009).

Par ailleurs, Nicolardot *et al.* (2007) ont montré que le sol a une influence sur la diversité des populations microbiennes.

Ces résultats montrent l'importance d'intégrer les variations pédoclimatiques du terrain pour valider les études du travail du sol sur la population microbienne et portants aussi sur leur dynamique.

b. Influence de l'azote disponible

Les amendements azotés sont courants en agriculture pour participer à la fertilisation du sol, c'est-à-dire au développement des plantes.

En effet, plusieurs travaux ont testé différentes concentrations d'azote disponible dans le sol (Recous *et al.*, 1995 ; Henriksen *et al.*, 1999). Ils ont montré que plus la teneur en azote disponible dans le sol est importante, plus la biomasse microbienne et l'activité enzymatique associée le sont aussi.

En effet, lors de la décomposition de résidus de culture, les microorganismes puisent l'azote dont ils ont besoin soit dans le résidu lui-même, soit dans le sol. Les résidus avec des C/N bas, c'est à dire des taux d'azote élevés, permettent facilement leur dégradation par les micro-organismes grâce à leur disponibilité en azote, contrairement aux résidus végétaux avec des C/N plus haut où l'azote du sol est la source pour les microorganismes.

L'azote est donc un facteur important contrôlant la décomposition de MO (Mary *et al.*, 1996) et il est nécessaire de le prendre en compte dans les études de décomposition.

c. Influence de la température

Une forte corrélation positive entre la respiration du sol et la température a été mise en évidence et quantifiée dans certains travaux. Quant à la décomposition du carbone organique de plantes, elle serait aussi plus importante à des plus hautes températures (Kätterer *et al.*, 1998 ; Knorr *et al.*, 2005).

A travers l'analyse de la bibliographie, on se rend compte que les études, portant sur l'impact des changements de température sur les communautés microbiennes a été très peu pris en compte. Au niveau de plantes réintroduites au sol, Rui *et al.* (2009) ont montré un effet important de différentes températures (15, 30 et 45°C) sur les dynamiques microbiennes.

d. Influence du pH et de l'humidité des sols

Comme décrit en chapitre II, le sol est une matrice complexe dont les propriétés varient entre les différents types de sol. Le pH fait partie des paramètres du sol qui influencent sur la population microbienne. Une telle influence s'explique soit par des modifications physiologiques directes des populations microbiennes, soit par des modifications de diversité des communautés et donc de leur fonctionnalité. En effet, les récents travaux menés sur la caractérisation de la biodiversité microbienne tellurique sur des grandes échelles spatiales montrent que le pH est le

filtre environnemental majeur de cette biodiversité (Fierer et Jackson, 2006 ; Dequiedt *et al.*, 2009).

Par exemple le pH influence fortement la composition des *Acidobacteria* et des *Actinobacteria*. Le pH est l'un des forts prédicateurs de la composition des communautés microbiennes et de la diversité, mais suivant le type de sol d'autres facteurs peuvent agir sur la structure des communautés comme la disponibilité des nutriments, la solubilité des métaux (Muller *et al.*, 2002), le contenu en carbone (Asuming-Brempong, 2008) et en azote (Fierer *et al.*, 2007), l'humidité des sols, la salinité (Rajendhran et Gunasekaran, 2008), les variations climatiques (Lauber, 2009).

L'humidité est aussi une propriété du sol qui influence sur la population microbienne, en conditions naturelles, ces paramètres de l'environnement sont très variables. En conditions contrôlées, (c'est-à-dire en expérience en microcosmes de sol), ces paramètres sont stables et gérés au cours de l'expérimentation et ne reflètent donc pas forcément les conditions que l'on peut retrouver au champ. En effet, les saisons, le climat et autres perturbations extérieures (pratiques agricoles...) influent les conditions retrouvées dans le sol et donc sur la dynamique des populations microbiennes. Il est important de vérifier que les expérimentations en laboratoire reflètent alors la réalité au champ, tout comme il est primordial de continuer les travaux intégrant des systèmes pédologiques variés afin d'augmenter la généricité des résultats obtenus.

3.3.2. *Facteurs biotiques*

Pour comprendre les changements de structure des communautés microbiennes il faut prendre en compte différents paramètres. Il a été démontré que les plantes peuvent avoir un impact identique ou même supérieur à celui des facteurs abiotiques, tel que le climat, dans le contrôle des fonctions des écosystèmes terrestres mais aussi au niveau de la structure des communautés microbiennes du sol (Verville, 1998).

La présence de plantes résulte en une augmentation significative de l'humidité du sol, de la biomasse et de la respiration microbienne (Singh, 2009). La présence de

plantes joue sur la croissance des communautés microbiennes des sols et influe aussi sur les propriétés abiotiques du sol. La présence de plantes provoque des changements profonds au sein de la communauté microbienne du sol. Il a été observé que beaucoup de plantes sélectionnent des groupes de micro-organismes spécifiques via l'exudation de composés dans la rhizosphère, qui représente une association positive où les plantes fournissent le carbone pour la croissance microbienne et les microorganismes en retour fournissent des éléments majeurs tels que l'azote et le phosphore, ainsi qu'une protection contre les attaques des pathogènes et parasites (Singh *et al.*, 2004).

Des changements significatifs des structures des communautés microbiennes dans le sol ont été montrés lors de changements du couvert végétal. Ces changements induits par la végétation ont été observés aussi bien au niveau des groupes universels bactériens (Grayston, 1998, Nusslein et Tiedje, 1999, Tiedje, 1999) qu'au niveau des groupes fonctionnels (Singh *et al.*, 2007).

Bien que les communautés bactériennes et fongiques aient été largement étudiées indépendamment l'une de l'autre dans de nombreux habitats, quelques études ont examiné simultanément ces deux groupes de microorganismes (Costa *et al.*, 2006, Singh, 2007), sans toutefois tenter de comprendre les interactions entre ces deux communautés qui demeurent très difficiles à prendre en compte, bactéries et champignons vivant en étroite relation dans le sol.

Les interactions champignons bactéries sont très certainement de tous types, positive négative ou neutre. Singh *et al.* (2009) ont observé une forte corrélation entre les communautés bactériennes et fongiques indépendamment des facteurs abiotiques du sol (humidité, C et N) à l'échelle du champ (Singh, 2009). Des résultats précédents avaient déjà montré qu'un champignon *Glomus mossae* (Murty, 2002) avait un impact direct sur la structure de la communauté bactérienne au niveau des racines de plantes (Artursson *et al.*, 2005). Singh *et al.* (2008) avaient montré aussi que la communauté fongique influence la structure de la communauté bactérienne au niveau du rhizoplan des graminées.

Il existe une diversité d'interactions dans le sol (symbiose, parasitismes, compétition, prédation). Ces relations entre les microorganismes et aussi avec les organismes eucaryotes comme les nématodes, les plantes et les animaux et avec les composants abiotiques de l'environnement constituent la base de l'écologie microbienne dans le sol (Trévors et Van Elsas, 1997), elles constituent les moteurs des différents processus qui se déroulent dans le sol.

3.4. Interactions entre populations microbiennes

Un microorganisme isolé existe rarement dans les conditions naturelles. Ainsi quand une cellule microbienne est isolée en laboratoire, l'individu se multiplie normalement pour former un groupe ou clone, ou bien des individus identiques, on parle dans ce cas de population (Atlas et Bartha, 1993). Typiquement, beaucoup de populations de caractères différents coexistent dans les environnements naturels. Les populations microbiennes qui vivent dans un même habitat interagissent entre eux pour former une communauté microbienne, structurée, et où chaque population contribue à son maintien. Des interactions apparaissent entre individus à l'intérieur d'une population microbienne, entre diverses populations à l'intérieur de la communauté (Atlas et Bartha, 1993).

Les microorganismes en particulier les bactéries sont fréquemment impliquées dans une multitude d'interactions non génétiques avec d'autres microorganismes, notamment au niveau de la rhizosphère. Ces interactions sont souvent nutritionnelles. Un microorganisme dépend d'un autre microorganisme pour la dégradation de produits ou de substrats spécifiques, ou différents microorganismes sont en compétition pour le même substrat (Trévors, et Van Elsas, 1997). Dans d'autres cas, un microorganisme peut exercer un effet nuisible sur les autres microorganismes, par exemple par la production d'antibiotiques ou de composés toxiques.

Les interactions entre populations microbiennes peuvent être reconnues comme des interactions négatives (compétition, amensalisme), positives (commensalisme, synergique et mutualisme), ou positives pour l'un et négatives

pour l'autre population (parasitisme ou prédation). De nombreux exemples montrent l'existence de tous ces types d'interactions entre population microbienne dans les sols. L'inhibition des champignons pathogènes *Gaeumannomyces graminis* des racines du blé par *Pseudomonas fluorescens*, due à la production in situ d'antibiotique du type phénazine (Thomashow *et al.*, 1990), est un exemple d'interaction amensale entre microorganismes.

3.5. Interactions entre les microorganismes et les plantes

3.5.1. Interactions non symbiotiques

L'interface entre le sol et les racines est un habitat très dynamique. Dans la masse de sol environnante, la croissance et la prolifération des microorganismes sont limitées par un déficit de carbone et d'énergie. Par contre, la libération continue de nutriments organiques dans la rhizosphère stimule l'activité et la multiplication des microorganismes (Atlas et Bartha, 1993 ; Olsson et Alstrom, 2000), des densités de l'ordre de 10^9 /g de sol y est détectée (Tate, 1995).

Le développement de la communauté rhizosphérique a une variété d'impact direct ou indirect sur la production de biomasse de la plante (Tate, 1995). Beaucoup de bactéries qui colonisent la rhizosphère produisent des composés organiques qui permettent le développement du système racinaire des plantes. Elles sont responsables du recyclage et de la solubilisation des éléments minéraux (azote, phosphore, calcium); de la synthèse des vitamines, des acides aminés, des auxines lesquels stimulent la croissance des plantes (Focht et Martin, 1979; Klein *et al.*, 1988 Tate, 1995; Lavelle et Spain, 2001) ou bien d'autres substances qui peuvent inhiber les organismes pathogènes des plantes (Glick, 1995).

Les effets indirects résultent de l'effet de la communauté microbienne rhizosphérique sur la structure du sol. En effet, les microorganismes produisent des polysaccharides qui cimentent les particules minérales du sol à l'intérieur des agrégats. L'amélioration de la structure du sol, par l'augmentation de l'agrégation, aboutit à l'amélioration l'aération du sol, à l'infiltration de l'eau, et à la pénétration des racines (Tate, 1995).

L'azote est un élément important aussi bien pour la croissance des plantes que celle des microorganismes. Et il existe une compétition entre les microorganismes et les racines des plantes pour cet élément surtout dans les sols pauvres où il constitue un facteur limitant. Ces derniers immobilisent l'azote, le rendant indisponible pour les plantes.

Certains microorganismes en particulier les bactéries et les champignons peuvent envahir les tissus des racines, où elles peuvent provoquer de nombreuses maladies (Sorensen, 1997). Ces maladies apparaissent chez les plantes sous forme de nécrose, de pourritures, de troubles vasculaires, de tumeurs et ou de lésions.

3.5.2. *Interactions symbiotiques*

En plus des interactions avec les microorganismes dans la rhizosphère, les racines des plantes établissent des relations symbiotiques spécifiques avec certains microorganismes du sol. Deux types d'associations ont fait l'objet d'un grand nombre d'étude, il s'agit des associations mycorhiziennes et des symbioses fixatrices d'azote.

a. Les symbioses mycorhiziennes

Les mycorhizes sont des associations bénéfiques entre les racines des végétaux et les filaments mycéliens des champignons supérieurs. Cette association améliore la nutrition minérale (principalement phosphore) de la plante, alors qu'elle fournit au champignon hétérotrophe des assimilats photosynthétiques qu'ils ne peuvent pas obtenir dans le sol. Il existe 3 types de mycorhizes, définies selon des critères morphologiques et cytologiques: les ectomycorhizes, les endomycorhizes et les ectendomycorhizes.

-Chez les ectomycorhizes, le champignon (un ascomycète ou basidiomycète) forme une gaine d'hyphe externe dense ou manchon sur les racines fines latérales de leurs plantes hôtes.

L'hyphe ne pénètre pas dans les cellules de la plante, mais il se développe vers l'intérieur entre les cellules de l'épiderme et du cortex externe pour former le réseau

de Hartig (Smith et Read, 1997). La symbiose ectomycorhizienne concerne 5% des plantes vasculaires.

-Chez les endomycorhizes à vésicules et à arbuscules, les hyphes formées se développent à l'intérieur des racines et pénètrent dans les cellules de la paroi pour former des arbuscules microscopiques qui augmentent la surface de contact avec la plante hôte (Smith et Read, 1997). Les champignons MYA vivent en symbiose avec plus de 90% des plantes terrestres..

On retrouve cette symbiose dans tous les types de culture: les formations à graminées, les légumineuses, les cultures en serre et en pleins champs (riz, patate, arachides, mil, maïs, tomate...). Dans le sol, cette symbiose universelle constitue le passage obligé des nutriments qui vont dans la plante infestée. Elle régule sa nutrition hydrominérale, sa croissance, son développement et sa résistance à certaines maladies (Diop, 1996).

Les effets positifs des champignons MYA sur la plante hôte sont attribués à l'intense exploration du sol par les hyphes fongiques pour prélever les éléments minéraux; un centimètre de racines peut être enveloppé par plus d'un mètre de filaments mycéliens reliés aux arbuscules (Diop, 1996).

Les plantes colonisées par les champignons MYA, ont une bonne régulation de leur alimentation en eau, car elles maintiennent une continuité hydrique au niveau de l'interface sol-racine, ce qui leur confère une résistance au stress hydrique (Hardie et Leyton, 1981; Gianinazzi-Pearson et Diem, 1982). Les mécanismes impliqués dans l'alimentation hydrique des plantes mycorhizées demeurent mal connus malgré certaines corrélations nutritionnelles et physiologiques (Diop, 1996). Les effets des champignons MYA sont plus nets dans la physiologie des plantes que dans leur nutrition.

L'absorption du phosphore est facilitée par les hyphes mycéliens des champignons MYA. Cette absorption est encore améliorée par les mycorhizes par production de sidéripores (Azcon *et al.*, 1976; Tarafdar et Marschner, 1995).

Des interactions positives de champignons MYA avec le genre *Rhizobium* ont été notées dans l'amélioration de fixation de l'azote et la nodulation des plantes légumineuses (Barea *et al.*, 1992; Diop, 1995). La fixation d'azote est un processus à forte dépense énergétique qui nécessite des quantités suffisantes de phosphores et par conséquent une bonne mycorhization (Diop, 1996).

-Les ectendomycorhizes sont caractérisés par la présence d'une gamme fongique externe souvent réduite et par un bon développement du filet de Hartig en hyphes interne, celle-ci pénétrant à l'intérieur de la plante hôte (Smith et Read, 1997).

b. Les Symbioses fixatrices d'azote

Deux groupes de bactéries ont été identifiés comme fixatrices d'azote en association avec les plantes supérieures. Il s'agit des Rhizobiums qui s'associent généralement avec les plantes légumineuses et d'autres espèces aussi (des papilionacées, des mimosacées, césalpinacées) et des Frankias, bactéries filamenteuses sporulantes associées à des plantes dites actinorhiziennes comme les Casuarinacées.

Ce sont des associations spécifiques, puisqu'elles impliquent un système de reconnaissance mutuelle entre les deux partenaires. La plante exsude dans le milieu des flavonoïdes qui activent les gènes de la nodulation des bactéries, provoquant la synthèse d'une molécule signal. Cette dernière déclenche chez la plante des processus qui permettent la pénétration des bactéries dans la racine et la formation de nodules (Ganry et Dommergues, 1995). Les Rhizobiums qui s'installent dans les cellules se différencient en bactéroïdes, et synthétisent la nitrogénase, l'enzyme qui catalyse la fixation de l'azote de l'air. Dans le cas des symbioses actinorhiziennes, les hyphes de *Frankia* qui pénètrent dans les cellules végétales, se différencient en vésicules, siège de la de la synthèse de la nitrogénase (Normand *et al.*, 2000, Huss-Dannel, 1997).

Les symbioses fixatrices de l'azote sont extrêmement importantes dans le maintien de la fertilité de sol, elles sont utilisées dans les pratiques agricoles pour augmenter les rendements des cultures (Atlas et Bartha, 1993). L'importance de la

symbiose actinorhizienne est bien illustrée par les essais de stabilisation des dunes littorales au Nord de Dakar avec des plants de *Casuarina equisetifolia* (Filao) en symbiose avec *Frankia*.

3.6. Rôle de la communauté microbienne dans le sol

L'énorme diversité taxonomique et génétique des microorganismes du sol se traduit par une implication forte dans de nombreuses fonctions environnementales du sol.

Certains microorganismes participent à la santé et à la croissance des plantes, dont les plus étudiées sont les symbioses rhizobiennes et mycorhiziennes. La composante microbienne participe aussi activement aux cycles biogéochimiques du soufre, du phosphore, du fer et de l'azote. Au niveau de ce dernier, l'implication forte dans la fixation de l'azote atmosphérique, l'ammonification, les processus de nitrification et de dénitrification n'est plus à démontrer. Sans oublier leurs rôles essentiels dans le cycle du carbone, les microorganismes du sol, hétérotrophes pour la plupart, font partis des acteurs principaux contrôlant la décomposition de la matière organique. De par leur plasticité métabolique.

Toutefois, la diversité microbienne peut aussi se traduire par des effets néfastes et la présence de certains microorganismes qui sont pathogènes pour les plantes (*Plasmopara viticola*, *Fusarium...*) et l'homme (*Pseudomonas aeruginosa*, *Listeria monocytogenes...*).

Au niveau du sol, la distribution des microorganismes est hétérogène et conditionnée par l'organisation du sol (texture, structure, composition, ...) (Ranjard et Richaume, 2001). La distribution des microorganismes dans le sol est aussi fortement dépendante des ressources nutritives et de leur distribution spatio-temporelle. Par conséquent, la présence de niche trophique particulière va structurer fortement la distribution des microorganismes dans le sol (Ranjard et Richaume, 2001). Notre étude générale se focalisant sur la niche rhizosphère, cette dernière représente une « oasis nutritive » pour les microorganismes dans un environnement

et engendre ainsi la formation d'abondance microbienne et d'activités biologiques (Nicolardot *et al.*, 2007).

Les microorganismes du sol sont des acteurs majeurs des grandes fonctions assurées par le sol, en particulier la fourniture d'éléments minéraux pour les cultures *via* la minéralisation de la matière organique (Hill *et al.*, 2000). L'étude des paramètres microbiens et de leurs variations au sein d'une parcelle agricole revêt dès lors une importance primordiale pour la gestion de la fertilité du sol.

Les communautés microbiennes du sol jouent donc un rôle essentiel dans la dynamique de celui-ci et l'intérêt qui leur est porté ne cesse de croître. Il est cependant toujours difficile d'affirmer avec exactitude combien d'espèces microbiennes (bactéries et champignons confondus) se retrouvent dans le sol. Certaines études estiment qu'il y aurait environ 4×10^3 à 10^4 espèces / g de sol alors que d'autres avancent des chiffres de $< 1 \times 10^9$ uniquement de bactéries / g de sol appartenant à 10 000 espèces (Borneman *et al.*, 1996; Schloter *et al.*, 2003). En résumé, les microorganismes jouent un rôle primordial dans le concept de fertilité des sols en milieu agricole. Les facteurs influençant leur croissance et les variations de leur communauté sont nombreux à agir en même temps sur le sol et leurs effets combinés sont difficiles à prédire. Il devient de plus en plus clair qu'en manipulant la diversité microbienne d'un sol, il serait possible d'améliorer sa fertilité. Par contre, plusieurs mécanismes impliqués dans des tels changements sont relativement inconnus surtout à cause d'un manque d'informations sur la véritable composition des sols agricoles.

4. Approches de modélisation mathématique

Comprendre le fonctionnement d'un écosystème est un enjeu majeur pour la gestion des ressources et de l'environnement. Cependant ce but reste difficile à atteindre vue la complexité des systèmes naturels. Dans les sols où de très nombreux processus de toutes natures interagissent avec des organismes vivants, plusieurs questions intéressantes peuvent être posées à propos des écosystèmes. Il s'agit de facteurs qui influencent la stabilité d'un écosystème, les facteurs contrôlant la variabilité des abondances de différentes composantes de l'écosystème et notamment

sur sa structure, l'impact de l'hétérogénéité spatiale et les interactions entre populations et leur rôle à mener ou pas la coexistence des espèces dans un écosystème.

Pour répondre à ces questions, différentes approches méthodologiques existent. On peut citer l'observation directe du milieu, l'expérimentation *in vitro* (un test en dehors de l'écosystème) et *in situ* (examiner un phénomène exactement à l'endroit où il se déroule) et la modélisation mathématique. Mon travail consiste à l'élaboration et l'étude de l'évolution de la population microbienne en fonction de la nature des sols et des saisons. Cette étude est essentiellement expérimentale, elle est suivie par une tentative de modélisation de comportement des sols étudiés.

Il y a plusieurs approches possibles dans la modélisation mathématique des phénomènes et des systèmes naturels. L'approche la plus classique est celle qui conduit à ce que l'on appelle aujourd'hui des modèles minimaux dans les quels, on cherche à mettre l'accent sur un petit nombre de faits ou propriétés que l'on considère à la fois essentiels et suffisants. Très souvent, un modèle minimal sera de nature phénoménologique : les fonctions introduites dans les équations du modèle ne sont pas déduites de principes mais sont choisies pour leur ressemblance avec le phénomène réel modélisé.

A l'autre extrême, on peut citer les modèles centrés sur l'individu. Ces modèles cherchent à décrire les processus en partant de l'individu et en introduisant des paramètres biologiques, comportementaux propres à chaque individu. Ainsi, ils décrivent les variations des populations comme résultant des variations des individus. Ces modèles sont la plupart du temps si compliqués qu'une étude analytique est impossible et que seule une implémentation numérique peut leur être appliquée. Les connaissances actuelles sur les populations font que tout modèle comporte nécessairement un mélange de lois observées et quantifiées expérimentalement et de termes phénoménologiques. Ainsi par exemple les relations inter-individuelles sont souvent méconnues et ne peuvent être décrites que du point de vue phénoménologique.

Les modèles peuvent être à buts explicatifs ou prédictifs. Une première étape

dans la modélisation est la définition des objectifs de l'étude. Ces objectifs vont déterminer non seulement la portée du modèle mais aussi le type de modèle à utiliser et le type de résultats qui seront recherchés. La construction même du modèle d'un système complexe consiste à identifier les composants "simples" du système et à décrire les interactions entre ces composants et les variables externes du système et entre les composants eux mêmes. Les modèles qui vont être considérés et étudiés dans ce travail sont prédictifs ; ils servent à tester différents scénarios et progressent dans la confrontation avec les données expérimentales.

Plusieurs études de modélisation mathématique de population microbienne du sol ont été proposées et analysées dans la littérature.

Le modèle exponentiel de Malthus (1798) et de Zamora et Zaritzky en 1985, Le modèle en trois phases linéaires (Buchanan, 1968), (Buchanan *et al.*, 1997). Le modèle Logistique de Verhulst (1838).

Kono, en 1968, a proposé un modèle plus simple (repris par Rosso *et al.* en 1995) : le modèle logistique avec délai de rupture.

Modèle de Gompertz (1825), Gibson *et al.*, 1987 ont proposé l'utilisation des modèles logistiques et de Gompertz après Zwietering *et al.* (1990) ont proposé une simplification de ces deux modèles en faisant apparaître les paramètres classiques, Néanmoins, il présente un certain nombre d'inconvénients mentionnés par divers auteurs (Dalgaard, 1995 ; Membre *et al.*, 1999 ; Van Gerwen et Zwietering, 1998 ; Whiting et Cygnarowicz-Provost, 1992).

Baranyi *et al.* (1993) ont proposé un modèle combinant la fonction de freinage logistique et une cinétique du passage des cellules de la phase de latence à la phase de croissance exponentielle il convient mieux à l'ajustement de cinétiques de croissance microbienne que le modèle de Gompertz modifié (Baranyi et Roberts, 1994 ; Membre *et al.*, 1999 ; Van Gerwen et Zwietering, 1998).

Le modèle de Monod qui représente la base en matière de modélisation de la croissance microbienne. Les modèles densité-dépendants En 1989 par Arditi et

Ginzburg .Le modèle de Luedeking et Piret combiné avec le modèle logistique (Weis et Ollis, 1980).

Burhan *et al.*, ont proposé un modèle mathématique, basé sur des données expérimentales et approprié à la description et à la prévision du processus de la synthèse microbienne de CGTase par les cellules bactériennes immobilisées.

Une approche similaire a également été retenue lors des premiers travaux de modélisation de l'effet killer chez les levures (Ravaz, 1992), Modèle de Brown et Rothery (1993), Dens *et al.* (1999) ont proposé un nouveau modèle en combinant le modèle de Lotka Volterra et le modèle de dynamique de croissance de Baranyi.

4.1. Les modèles biologiques

Il s'agit des modèles dans lesquels des populations microbiennes interviennent en tant que variables d'état. L'utilisation de tels modèles pour l'étude de phénomènes du sol placés sous contrôle microbien, c'est le cas des transformations de l'azote (Mc Laren, 1971; Van veen, 1977; Corman, 1982), ou de la décomposition de matériel organique (Parnas, 1976; Smith, 1979).

Des études évaluant avec précision des populations bactériennes doivent maintenant être conduites pour mieux définir les attributs écologiques et pour modéliser la dynamique des populations dans les environnements complexes et hétérogènes. Les modèles mathématiques en écologie constituent des outils de représentation, de compréhension du fonctionnement de systèmes naturels et/ou de prédiction de leur évolution. Comme notre objectif de la modélisation est une meilleure compréhension du système et de tester des hypothèses relatives à sa dynamique, on s'intéresse à des modèles phénoménologiques basés sur la connaissance et des hypothèses réalistes qui peuvent être faites sur le phénomène étudié que l'on souhaite modéliser.

De plus un modèle permet d'aller au bout des conséquences logiques de ses hypothèses initiales, et doit être « validé » par la confrontation aux résultats

d'expériences réalisables car « seule l'expérience est capable de nous aider à nous faire une idée sur la vérité ou la fausseté des énoncés portant sur des faits ».

Dans cette thèse nous proposons et étudions la modélisation qui consiste à décrire l'évolution de la population microbienne en fonction du temps dans des conditions environnementales particulières.

Cette étude bibliographique présentait un état des lieux de la réponse des communautés microbiennes du sol. D'un point de vue général, nous pouvons dire que, malgré de nombreuses études l'implication des microorganismes du sol en termes de diversité, de dynamique de communauté et de fonctionnalité reste faible et incomplète.

Plus précisément, il en résulte une méconnaissance des facteurs édaphiques et environnementaux qui peuvent influencer la composante microbienne du sol.

Dans ce contexte, il nous est paru important de réaliser des études sur la dynamique de la composante microbienne du sol, au cours des saisons, tout en tenant compte de ces différents facteurs,

L'importance de prendre en compte l'approche au terrain (i.e. en conditions naturelles intégrant la variabilité pédo-climatique) permet de valider les résultats obtenus en laboratoire. De plus, cette partie bibliographique soulignait améliorer nos connaissances sur cette niche écologique, ce que nous avons essayé de prendre en compte au mieux dans la suite de nos travaux.

Matériels et Méthodes

Chapitre III : Matériels et méthodes

1. Description de la zone expérimentale (présentation du site d'étude)

1.1. Situation géographique de la sablière de Terga

Située à l'embouchure de l'oued EL Malah à environ 7 Km du petit village de Terga (ex : Turgot) Située dans la wilaya de Ain T'émouchent [Figure.13].

De forme globalement triangulaire, le site de la dune est limité au Nord par l'oued El Malah et le CW26, à l'Ouest par le CW20 la séparant de la plage aérienne du même nom et au SE par un plateau. (D'après le rapport final de l'étude d'impact sur l'environnement, Janvier 2000).

1.2. Morphologie du site de Terga

À l'embouchement de l'Oued Terga, une crique avec une plage sableuse s'allonge sur environ un (1) Kilomètre, SSE-NNE, encadrée par deux promontoires, l'un au Nord falaise de 20 m environ, l'autre au Sud s'élevant à plus de 30 m.

Cette plage sableuse se prolonge vers l'intérieur par une arrière plage, plus au moins végétalisée, plus loin vers l'intérieur, donc à l'est du CW20, la topographie s'élève rapidement jusqu'au sommet d'une grande masse sableuse, à 70 m environ d'altitude. C'est donc cette masse sableuse qu'est installée la carrière de sable de Terga. (D'après le rapport final de l'étude d'impact sur l'environnement, Janvier 2000).

- La forêt native : prélèvement de sol rhizosphérique de trois plantes légumineuses différentes, *Lotus criticus*, *Ononis natrix*, *Retama monosperma* (3 composite).
- Le sol revégétalisé par l'homme : prélèvement de sol rhizosphérique de trois plantes légumineuses différentes, *Lotus criticus*, *Ononus natrix*, *Retama monosperma*, *Acacia saligna* (4 composite).

Pour chaque site les cinq premiers centimètres de la couche superficielle du sol sont écartés. A l'aide d'une spatule stérile 100-150 g de sol sont recueillis dans un flacon stérile à partir de la couche sous-jacente (rhizoplan) 10 cm de profondeur et un diamètre de 30 cm et transporté le plus rapidement possible au laboratoire à 4 °C (Pochon et Tardieux, 1962).

L'échantillon est séché à l'air libre et à une température ambiante pendant une semaine, broyé et tamisé à travers un tamis (diamètre de 2mm). Cela servira à l'isolement des actinomycètes (Saadoun et Gharaibeh, 2003) et l'obtention d'une fraction de terre fine afin d'effectuer une série d'analyses de caractérisation physico-chimiques.

Les analyses sont effectuées :

- Pour la période hivernale en janvier.
- Pour la période estivale en juin.
- Pour la période de printemps en avril.
- Pour la période de l'automne en novembre.



Sol nu ou dégradé



Sol revégétalisé par l'homme



La forêt native

Figure. 14 : Les trois parcelles d'échantillonnage du site de Terga (Ain Témouchent).



Retama monosperma



Ononis natrix



Lotus creticus



Acacia saligna

Figure. 15 : Les différentes légumineuses choisies pour l'échantillonnage au site de Terga (Ain Témouchent).

3. Analyses physico-chimiques

Les analyses physico-chimiques sont réalisées au laboratoire d'INRA à Sidi bel-abbes.

3.1. Analyses physiques

3.1.1. Analyse granulométrique (Rouiller et al., 1994)

L'analyse granulométrique du sol ou encore appelée analyse mécanique, ou analyse physique consiste à classer les éléments du sol d'après leur grosseur et à déterminer le pourcentage de chaque fraction (sable, limon, argile).

L'analyse granulométrique a pour but de définir la texture d'un sol, c'est à dire le pourcentage de ces divers constituants et par là d'expliquer les propriétés physiques de ce sol : son comportement vis à vis de l'eau, de l'air et des racines et d'évaluer sa stabilité structurale c'est-à-dire la solidité de l'état de la structure du sol et sa résistance aux agents de dégradation.

On utilise pour cette analyse de la terre fine obtenue par tamisage au tamis à mailles 2mm, on élimine la matière organique par un oxydant énergique (H_2O_2), la durée d'exposition dépend de la teneur en matière organique (24h à 48h). Les particules minérales sont ensuite dispersées à l'aide d'un dispersant alcalin (hexametaphosphate de sodium).

Les particules grossières de diamètre supérieur à 50 mm sont séparées par tamisage, les particules moyennes et fines sont obtenues par la mesure de la vitesse de sédimentation.

D'après le triangle des textures qui permet de classer les sols d'après leur composition granulométrique on définit la texture de notre sol.

3.1.2. L'humidité (Soltner, 1974)

L'échantillon de sol est pesé une première fois (P1), puis le sol est séché à l'étuve à une température de 160°C pendant 24h, par la suite il est pesé une deuxième fois (P2).

L'humidité est calculée comme suite:

$$H\% = (P1-P2) \times 100 / P2$$

P1 : le poids du sol humide.

P2 : le poids du sol séché.

3.1.3. Mesure du pH (Callot-Dupuis, 1980)

Au 20g de terre fine (séchée à l'air) y sont ajoutés 50ml d'eau distillée (pour mesurer le pHeau). Le contenu est agité pendant quelques minutes, puis laissé à reposer 2h. Le pH est ensuite mesuré à l'aide d'un pH-mètre après une brève agitation.

$$H\% = (P1-P2) \times 100 / P2$$

3.2. Analyses chimiques

Sur l'homogénat des trois échantillons prélevés (à 10 cm de profondeur), on a effectué la mesure de la salinité, le dosage du calcaire total et actif, la matière organique dans le sol.

3.2.1. Mesure de la conductivité électrique (Aubert, 1978)

Le principe consiste à déterminer la conductivité électrique (C. E.) de l'eau pour déterminer la salinité de l'extrait du sol. Elle est effectuée en mélangeant 1/5 du sol avec 4/5 d'eau distillée.

Après une agitation de quelque minute la solution est chauffée à une température **T** (25°C), une première lecture est réalisée à cette température (**CT**), puis chauffer à une température **T'** (35°C) une deuxième lecture est réalisée avec le conductivimètre (**CT'**).

Le coefficient de température **β** est calculé comme suite :

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

Le conductivimètre est réglé à la valeur β et la mesure de la C.E. est effectuée ; cette dernière s'exprime en milli Siemens (mS).

On évaluera le degré de la salinité du sol en se référant aux normes internationales.

Tableau. 4 : Les normes de salinité du sol

Salinité (ECe : mS/CM)	Salinité du sol	Réponse des plantes
0 à 2	Non salé	Pas d'impact sur la croissance des plantes
2 à 4	Légèrement salé	La croissance des plantes sensibles peut être réduite
4 à 8	Moyennement salé	La croissance de plusieurs plantes est réduite
8 à 16	salé	Bonne croissance des plantes tolérantes au sel
>16	Très salé	Bonne croissance des plantes très tolérantes au sel

1S/m = 104 μ S/cm = 10 mS/cm = 103mS/m (Normalisations françaises, afnor, 1986)

3.2.2. Dosage du calcaire total (Callot-Dupuis, 1980)

Le calcaire n'est pas un constituant toujours présent dans le sol. Par contre pratiquement tous les sols contiennent du calcium si peu soit-il, cet élément se trouvant en particulier fixé sur l'argile sous forme d'ion calcique ou en solution sous forme de sels solubles de calcium.

Le calcaire ou carbonate de calcium, CaCO_3 , est un sel insoluble. Mais l'eau chargée de gaz carbonique peut le dissoudre lentement le transformant en un sel

soluble, le bicarbonate de calcium. C'est ainsi que peu à peu le calcaire disparaît d'un sol donné. Mais la solution du sol et l'argile gardent très longtemps du calcium provenant de la dissolution du calcaire.

On utilise la propriété du carbonate de calcium qui se décompose sous l'action d'un acide (HCl) en eau et gaz carbonique, ce dernier est recueilli dans un tube gradué en ml.

$$\text{CaCO}_3\% = (\text{p} \times \text{V}) \times 100 / (\text{P} \times \text{v})$$

p : poids du CaCO₃ pure utilisé pour l'étalonnage.

V: volume du gaz carbonique dégagé par l'échantillon du sol.

P : poids de l'échantillon du sol.

v : volume de gaz carbonique dégagé par le CaCO₃.

$$\beta = (\text{CT}' - \text{CT}) \times 100 / (\text{T}' - \text{T}) \times \text{CT}$$

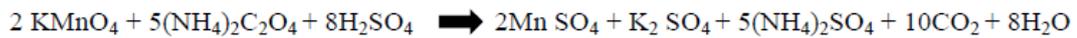
$$\text{CaCO}_3\% = (\text{p} \times \text{V}) \times 100 / (\text{P} \times \text{v})$$

3.2.3. Dosage du calcaire actif (Drouineau, 1942)

Dans le sol, une partie plus ou moins importante de calcaire total se trouve à l'état de fines particules actives pour les végétaux, cette fraction est facilement solubilisée par les eaux riches en gaz carbonique.

Pour le dosage du calcaire actif, on utilise la propriété du calcium se combinant aux oxalates d'ammonium pour donner de l'oxalate de calcium insoluble.

L'excès de solution d'oxalate d'ammonium est ensuite dosé par une solution de permanganate de potassium en milieu sulfurique.



La teneur en calcaire actif exprimée en % est obtenue à partir de la formule suivante:

$$\text{Calcaire actif \%} = (\text{N}-\text{n}) \times 1.25$$

N-n: correspond à la quantité d'oxalate de calcium précipité, donc à la quantité d'oxalate d'ammonium qui a réagi avec le calcaire actif.

N: nombre de ml KMnO_4 utilisés pour titrer la solution d'oxalate d'ammonium.

n: nombre de ml KMnO_4 utilisés pour titrer l'extrait du sol

3.2.4. Carbone total et matière organique (Méthode Anne, 1945)

La teneur en matière organique totale du sol s'obtient généralement en dosant la teneur en carbone. On estime que le rapport matière organique / carbone est à peu près constant et égal à $\text{MO/C} = 1.72$.

Le carbone de la matière organique est oxydé par un mélange de bichromate de potassium et d'acide sulfurique (H_2SO_4). On admet que l'oxygène consommé est proportionnel au carbone que l'on veut doser.

L'excès de bichromate inutilisé dans la réaction est dosé par le sel de mohr.

4. Isolement de la population microbienne

Les techniques classiques de microbiologie par étalement d'un échantillon issu de l'environnement sur ou dans un milieu de culture ont été utilisées pour favoriser la croissance cellulaire et permettre ainsi la multiplication clonale des différentes microorganismes. Quand on a appliqué avec un milieu de culture solidifié cette approche a permis de dénombrer les colonies résultant de cette multiplication clonale

et ainsi estimer le nombre initial de microorganismes « cultivables » présentes dans l'échantillon.

A partir d'une gramme de sol, la culture sur un milieu gélosé peut révéler la présence de 10^8 cellules. Une grande diversité de biotopes ont ainsi été étudiés mais la véritable révolution a eu lieu en 1980, où le dénombrement des micro-organismes a pu être fait *in situ*, Ces techniques, indépendantes de la mise en culture, ont révélé l'existence d'une diversité jusque-là insoupçonnée et ont véritablement bouleversé notre vision du monde bactérien. Par exemple, une gramme de sol peut contenir plus de 10^9 cellules (Torsvik *et al.*, 1990). On a ainsi pu établir que 99% des bactéries de l'environnement ne sont pas cultivables dans les conditions du laboratoire. Depuis lors, le sol est considéré comme un réservoir de diversité bactérienne avec une impressionnante étendue de processus biochimiques et moléculaires susceptibles d'être mis en œuvre. La méthode qu'on a utilisé au laboratoire c'est la méthode de suspensions-dilutions.

Chaque prélèvement est pesé puis broyé au mortier stérile et dilué dans un volume d'eau physiologique (10ml pour 1g de sol). Cette suspension est homogénéisée sur un agitateur magnétique à la vitesse maximale pendant 5 minutes. Pour chaque suspension une série de dilutions décimales (de 10^{-1} à 10^{-5}) est effectuée (Boughachiche *et al.*, 2005).

Cette suspension est définie comme la solution mère, 1 ml de chaque dilution de sol ou la solution mère est étalée sur un milieu nutritif (étalement en masse) répartis à raison de 30 ml par boîte de Petri.

Ceci est réalisé en 3 répétitions. Le milieu utilisé permet le développement de toute la flore microbienne. Les incubations sont faites dans une étuve 28°C . Les comptages sont effectués, après deux jours d'incubation.

5. Analyses statistiques et modélisation mathématiques des données

Afin de comparer le nombre de population microbienne et les analyses physico-chimiques pendant les quatre saisons une analyse de variance (ANOVA), test de

corrélation et analyses factorielles ont été effectuées grâce à XLSTAT (Addinsoft, XLSTAT Version 2007.6).

A partir des données statistiques une série de régression a permis d'identifier des modèles mathématiques sous formes de structure polynomiale, les résultats sont présentés dans le chapitre suivant.

Pour chaque saison une fonction mathématique a été élaborée afin de construire un modèle final représenté comme suit :

Selon la fonction globale :

$$Y = A x^2 + B x + C$$

Où : A, B, C paramètres du modèle.

x : caractéristique du sol.

Une première analyse des données montre que ce modèle doit être décomposé en deux sous-modèles au vu de la non linéarité des caractéristiques des sols :

$$\text{Le modèle supérieur : } \begin{cases} Y_{\max} = A^{1+2+3} x^2 + B^{1+2+3} x + C^{1+2+3} & (1) \\ Y_{\max} = a^4 x^2 + b^4 x + c^4 & (1') \end{cases}$$

$$\text{Le modèle inférieur : } \begin{cases} Y_{\min} = A^{1+2+4} x^2 + B^{1+2+4} x + C^{1+2+4} & (2) \\ Y_{\min} = a^3 x^2 + b^3 x + c^3 & (2') \end{cases}$$

Le but d'identifier les paramètres A, B et C est de définir une série de régression qui est effectuée à partir des données récapitulées dans le tableau suivant :

Tableau. 5 : Récapitulatif du nombre de population microbienne en fonction des types de sol et de pH.

		Sol1	Sol2	Sol3	Sol4	Sol5	Sol6	Sol7	Sol8
S1	P1	1130	1150	2240	2280	1720	2510	850	1940
S2	P2	2110	1270	1100	500	2293	1510	980	1890
S3	P3	1450	1440	2520	1480	2560	2130	1520	2920
S4	P4	1300	920	1710	1040	2190	741	1230	270
pH		9.00	9.00	9.09	8.95	8.94	8.92	8.81	8.87

S1 : saison de printemps. P1 : population microbienne pour la saison de printemps.

S2 : saison d'été. P2 : population microbienne pour la saison d'été.

S3 : saison d'automne. P3 : population microbienne pour la saison d'automne.

S4 : saison d'hiver. P4 : population microbienne pour la saison d'hiver.

Sol1 : Sol nu ou dégradé de la carrière de Terga Ain-Témouchent.

Sol2 : Sol rhizosphérique de *Lotus creticus* du sol de la forêt native de la carrière de Terga Ain-Témouchent.

Sol3 : Sol rhizosphérique de *Retama monosperma* du sol de la forêt native de la carrière de Terga Ain-Témouchent.

Sol4 : Sol rhizosphérique d'*Ononis natrix* du sol de la forêt native de la carrière de Terga Ain-Témouchent.

Sol5 : Sol rhizosphérique de *Lotus creticus* du sol revégétalisé par l'homme de la carrière de Terga Ain-Témouchent.

Sol6 : Sol rhizosphérique de *Retama monosperma* du sol revégétalisé par l'homme de la carrière de Terga Ain-Témouchent.

Sol7 : Sol rhizosphérique d'*Ononis natrix* du sol revégétalisé par l'homme de la carrière de Terga Ain-Témouchent.

Sol8 : Sol rhizosphérique d'*Acacia saligna* du sol revégétalisé par l'homme de la carrière de Terga Ain-Témouchent.

Résultats et discussion

Chapitre IV : Résultats et discussion

1. Résultats des analyses physico- chimiques

Le tableau 6 présente l'ensemble des résultats physico-chimiques obtenus au laboratoire d'INRA (Institut National de Recherche Agronomique) de Sidi bel-abbes. Les données montrent que les sols des trois sites ne présentent pas de différence significative entre eux, ils sont tous de structure sablonneuse, caractérisée par un pH Alcalin (8.81 à 9.09), (Brady et Weil, 2002).

Les résultats du pH du sol 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 du pH dans le sol revégétalisé par l'homme est 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). En effet 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 les 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, de même, une activité sulfo-oxydative sous l'action des bactéries et des champignons peut baisser le pH du milieu (Davet, 996). 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). 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, soufre et le phosphore (USDA, 1998). En effet, il existe très peu de réactions chimiques et microbiologiques dans les sols qui ne soient pas sensibles au pH (Brady et Weil, 2002).

Les résultats de la conductivité électrique sont très faibles dans tous les sites (0.3 à 0.5 ms/cm²). Malgré que le pH est alcalin les sites sont peu salés, on peut discuter la faible teneur de salinité par l'effet de lessivage, la salinité peut baisser et sera remplacée par l'alcalinisation, on peut avoir des sols peu salés, mais souvent sodiques ou alcalins (Job *et al.*, 1977), pareille pour la matière organique qui ne dépasse pas le 1%, cela est dûe à la dégradation du couvert végétal dans le sol nu, la forêt native et le sol rhisosphérique de *Retama monosperma* et *Acacia saligna* du sol revégétalisé par l'homme où la matière organique est inférieure à 0.5%, selon les normes de Hill Laboratoires, 2014 les teneurs de matière organique sont très faibles. Selon (Pousset, 2002) les sols sableux qui ont une teneur très faible en matière organique sont très fragile et peu productive. 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 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 la stabilité structurale des sols, de la rétention d'eau, de la capacité d'échange cationique ainsi que la stimulation de la croissance racinaire (Drouet, 2011).

Les sols de la région de Terga présentent une quantité très faible en carbone (inférieure à 0.5%) pour tous les types de sols, le calcaire total montre une teneur très importante par rapport au calcaire actif, d'après (Pousset, 2002) un sol riche en calcaire total peut être très pauvre en calcaire actif. Le calcaire actif 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'absorption du sol des quantités implorantes d'argiles (Pousset, 2002, Vasant *et al.*, 2009).

A partir de ces résultats on déduit que le sol de Terga est un sol minéral où la matière organique est faible et le pH est alcalin.

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 et conservation des sols (Bollag et Leyval, 1998).

Tableau. 6 : Résultats des analyses physico-chimiques du sol de Terga.

Echantillons du sol	CE (ms/cm)	pH	Calcaire total (%)	Calcaire actif (%)	Carbone (%)	MO(%)
Sol nu	0,03	9,00	13,2	4	0,26	0,52
Sol Rhizosphérique de <i>Lotus creticus</i> (Foret native)	0,04	9,00	12,8	1,75	0,24	0,48
Sol Rhizosphérique de <i>Retama monosperma</i> (Foret native)	0,04	9,09	20,4	2	0,18	0,36
Sol Rhizosphérique de <i>l'Ononis natrix</i> (Foret native)	0,04	8,95	19,8	1,25	0,27	0,54
Sol Rhizosphérique de <i>Lotus creticus</i> (Sol revégétalisé)	0,05	8,94	14,8	1,87	0,33	0,66
Sol Rhizosphérique de <i>Retama monosperma</i> (Sol revégétalisé)	0,05	8,92	15,2	5,62	0,24	0,24
Sol Rhizosphérique de <i>Ononis natrix</i> (Sol revégétalisé)	0,04	8,81	16,4	1,87	0,43	0,86
Sol Rhizosphérique de <i>Acacia saligna</i> (Sol revégétalisé)	0,05	8,87	18	3,12	0,15	0,30

2. L'évaluation de la flore microbienne

Les sols sableux sont généralement pauvres en éléments nutritifs et en eau. Malgré les conditions défavorables, les sols sableux peuvent abriter une microflore bactérienne et fongique riche et variée. Les analyses microbiologiques ont porté sur la détermination de la flore microbienne totale qui est déterminée par la technique du nombre le plus probable (MPN) (Alexander, 1982).

Les figures 16 (a, b, c et d) sont les représentations de la flore microbienne de tous les échantillons par saison, il ressort que dans toutes les saisons la population microbienne est importante et beaucoup plus faible dans la saison d'hiver (750 jusqu'à 2200 UFC/ml).

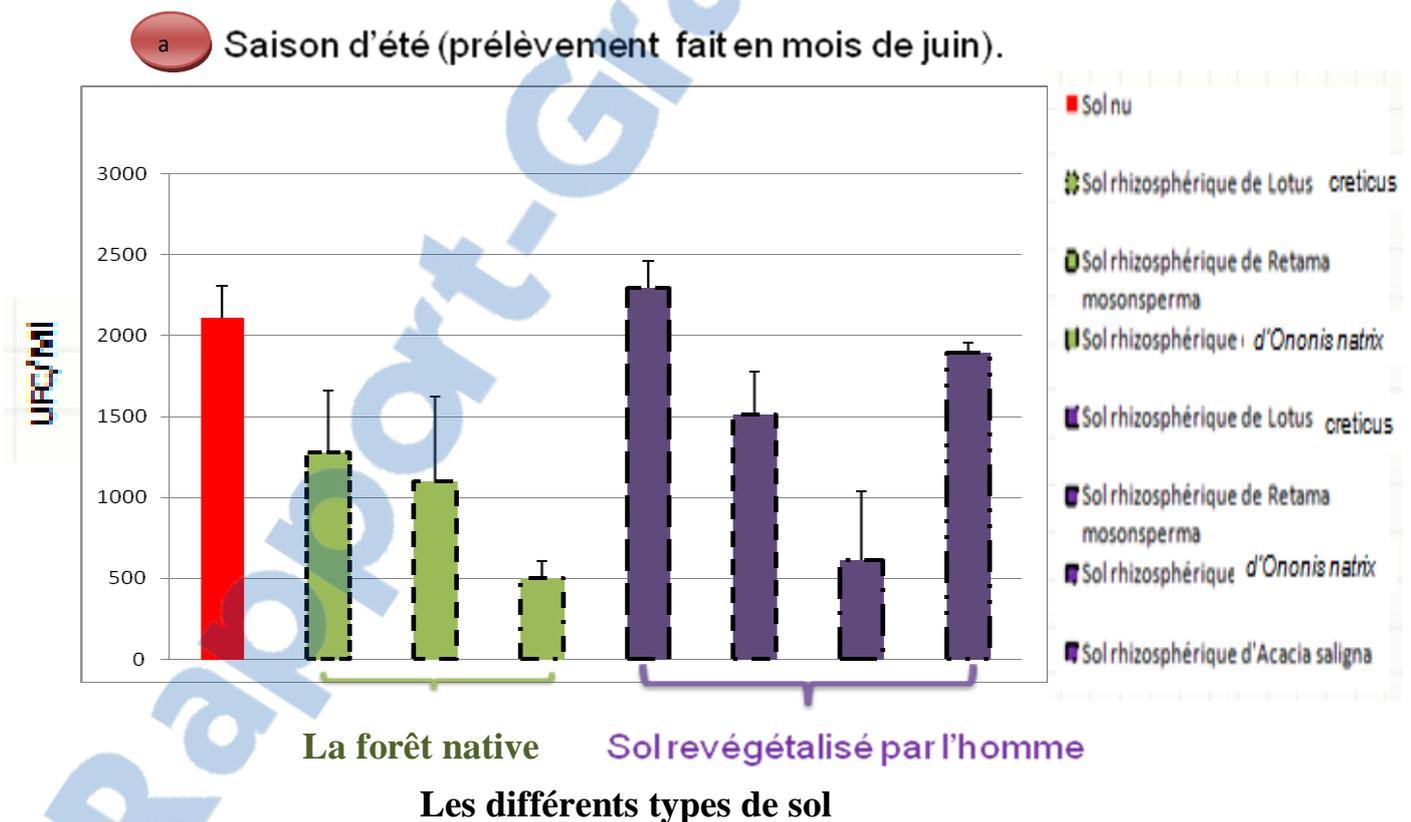


Figure. 16a : La flore microbienne totale des différents échantillons de sol durant la saison d'été.

A la saison d'été la flore microbienne est importante dans le sol nu (2200 UFC/ml) et pour certaines plantes dans le sol revegetalisé par l'homme tel que le sol rhizosphérique de *Lotus creticus* (2400 UFC/ml) et *Acacia saligna* (1900 UFC/ml). On remarque une diminution de la flore microbienne dans tous les types de plantes du sol de la forêt native (500 jusqu'à 1300 UFC/ml) et même pour le sol rhizosphérique de *Ononis natrix* du sol revegetalisé par l'homme (600 UFC/ml).

b Saison de printemps (Prélèvement fait en mois d'Avril).

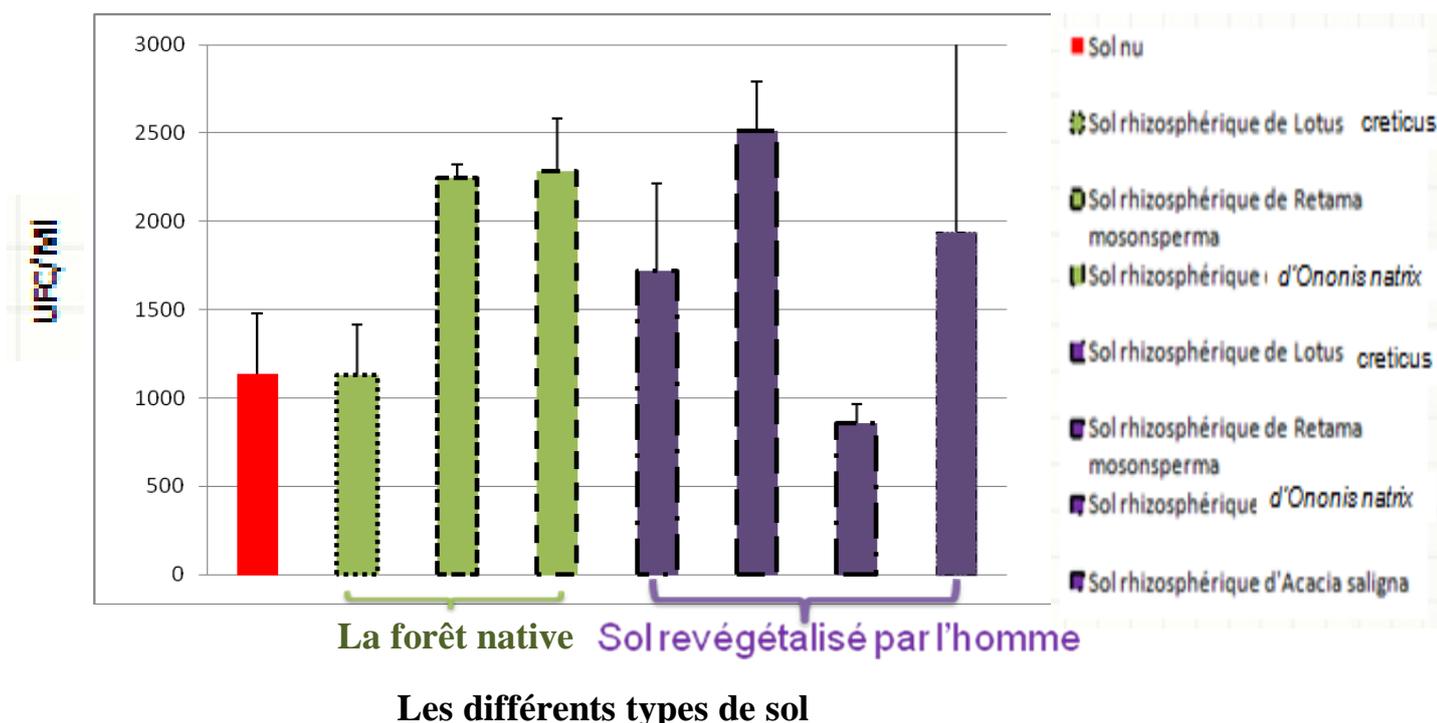


Figure. 16b : La flore microbienne totale des différents échantillons de sol durant la saison de printemps.

A la saison de printemps et d'automne la population microbienne est importante dans les deux types de sol ; le sol de la forêt native et le sol revegetalisé par l'homme. Le sol rhizosphérique de sol revegetalisé par l'homme atteint un nombre important de 2500 UFC/ml pour le sol de *Retama monosperma* et 2900 UFC/ml pour le sol d'*Acacia saligna*.



Saison d'automne (prélèvement fait en mois novembre)

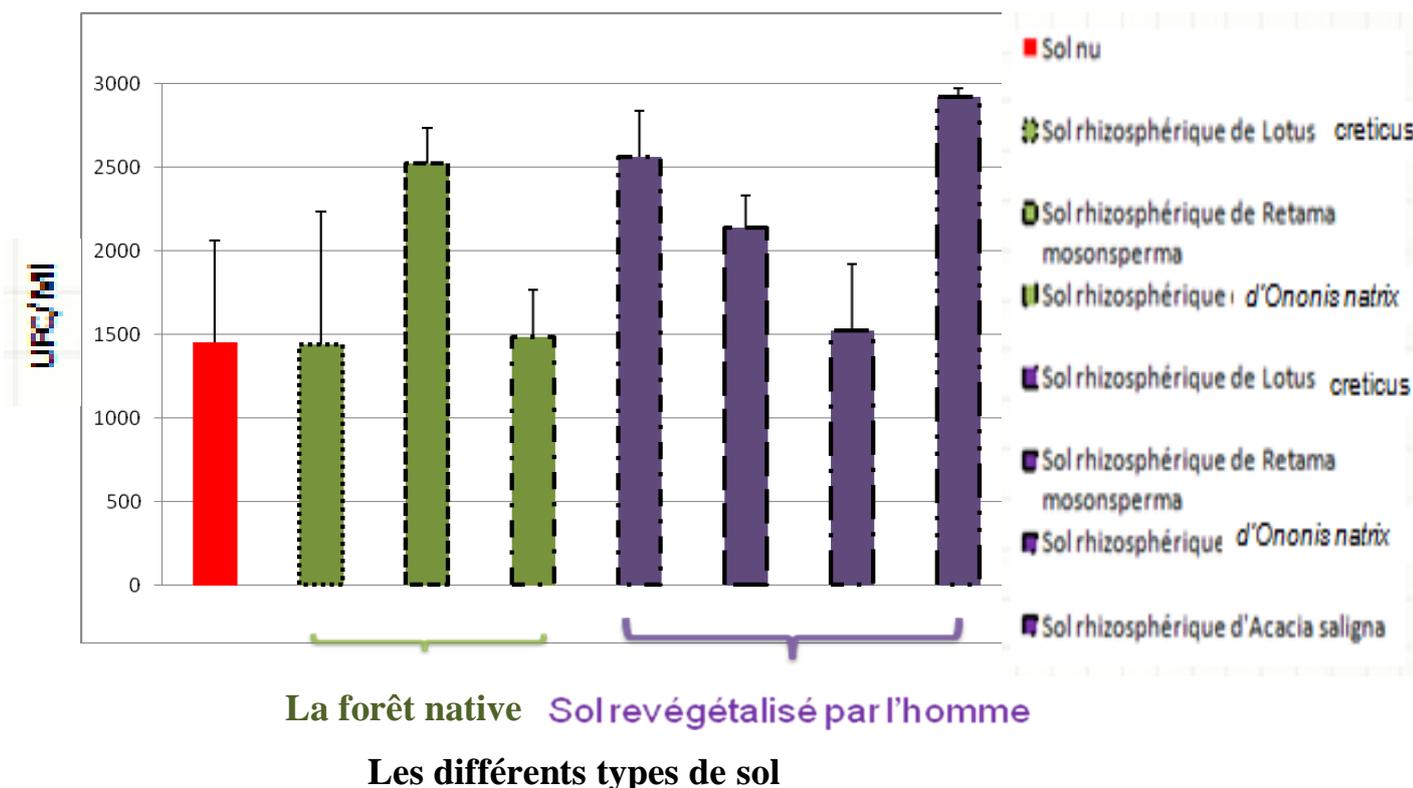


Figure. 16c : La flore microbienne totale des différents échantillons de sol durant la saison d'automne.

Et pour la saison d'hiver la population microbienne est toujours flagrante dans le sol revégétalisé par l'homme (le sol rhisosphérique de *Lotus creticus* à un nombre de 2300 UFC/ml) et diminue dans le sol de la forêt native pour (*Lotus creticus* à un nombre de 900 UFC/ml et *Ononis natrix* à un nombre de 1100 UFC/ml) et *Retama monosperma* (750 UFC/ml) pour le sol revégétalisé par l'homme.

d Saison d'hiver (prélèvement fait en mois de janvier)

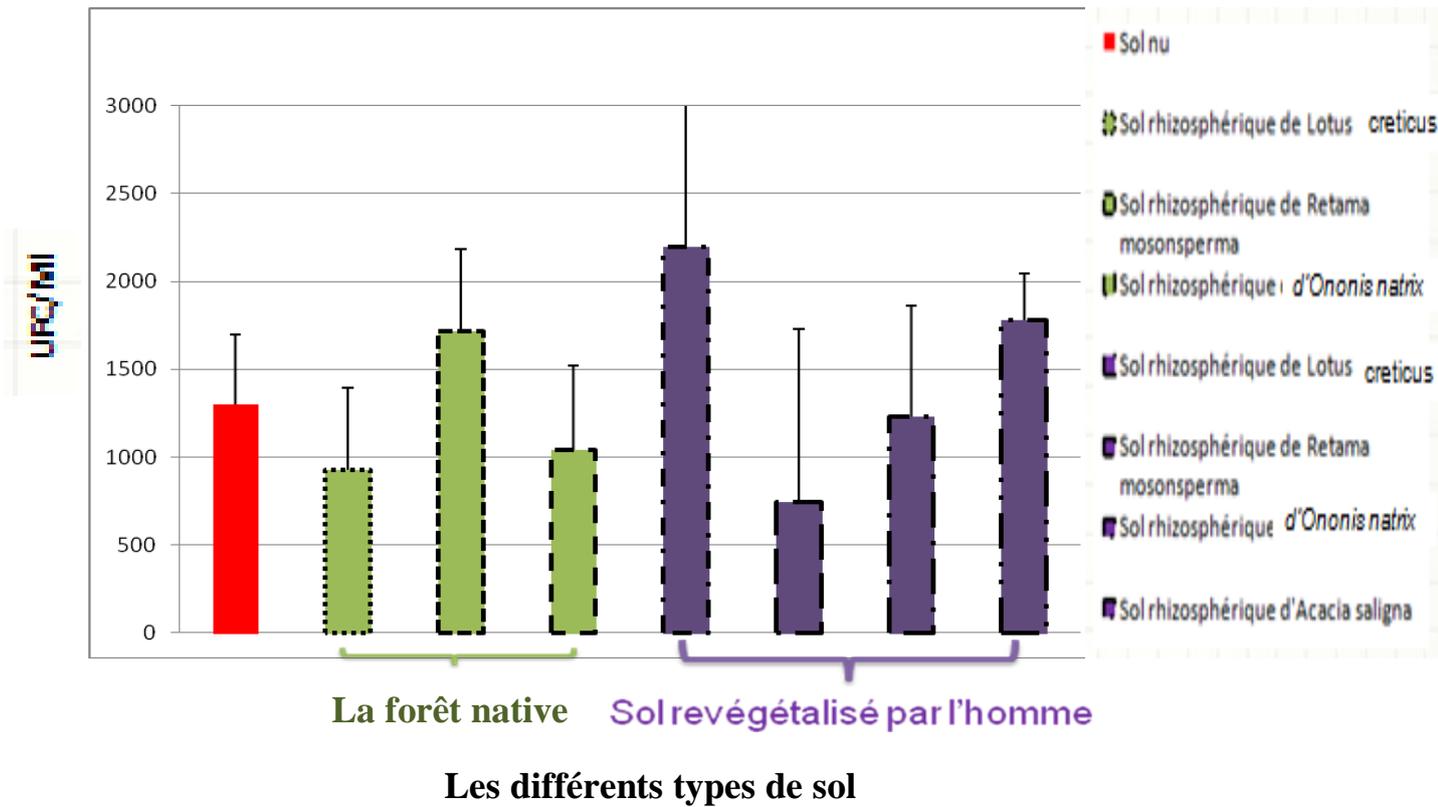


Figure. 16d : La flore microbienne totale des différents échantillons de sol durant la saison d'hiver.

Les résultats obtenus en figure 17 montrent que la flore microbienne a révélé des variations intéressantes et inexplicables dans le sol nu et à différentes saisons, en automne les populations microbiennes sont à un niveau très bas (1450 UFC/ml) par rapport au nombre observé en été qui est à 2200 UFC/ml et au printemps.

En état naturel, les populations microbiennes en hiver sont à un niveau moyen au moins égal à celui observé en été, puis elles diminuent brutalement au printemps et se maintiennent à un niveau très bas en été.

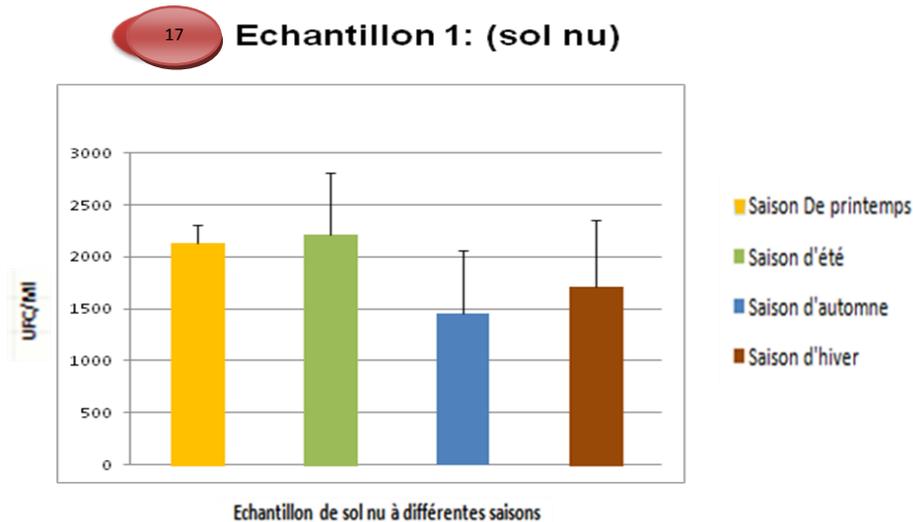


Figure .17 : La flore totale du sol nu à différentes saisons.

Ce qui est normal c'est que les bactéries se multiplient activement en hiver pour atteindre à nouveau ou dépassé l'effectif trouvé dans le sol nu (J.Olivier *et al.*,1998).

Le sol est constamment soumis à plusieurs perturbations susceptibles d'influencer l'ensemble de sa dynamique. L'effet saisonnier sur la communauté microbienne du sol a donc souvent été rapporté dans la littérature (Dunfield et Germida 2003; Hamel *et al.*, 2006a; Houlden *et al.*, 2008)

Ces perturbations sont particulièrement marquées dans un milieu méditerranéen qui est caractérisé par un régime de pluie particulier avec des fortes précipitations concentrées sur quelques mois de l'année et la période estivale est marquée par la sécheresse et de fortes chaleurs (Brunel *et al.*,2007). De ces résultats on peut en déduire que l'effet de température joue un rôle très important dans la détermination de la flore microbienne dans le sol nu.

L'effet de la température a déjà été examiné sur certain travaux ou l'augmentation de la flore microbienne est plus importante à des plus hautes températures (Kätterer *et al.*, 1998 ; Knorr *et al.*, 2005).

Rui *et al.* (2009) ont montré un effet important de différentes températures (15, 30 et 45°C) sur les dynamiques de la population microbienne.

Les populations microbiennes présentes dans le sol doivent s'adapter aux conditions froides. Outre une diminution globale des activités métaboliques, on peut s'attendre à constater une diminution de la respiration, une hausse de la mortalité microbienne, des modifications des voies métaboliques utilisées par les populations restantes (passant du mode aérobie au mode anaérobie) et une augmentation relative des populations mieux adaptées à ces conditions.

De manière générale, Standing et Killham (2007) ont indiqué que la température du sol est un élément clé de la distribution et du niveau d'activité microbienne du sol. Certains processus biologiques sont particulièrement sensibles à des baisses de température.

Wertz *et al.*, 2013 ont réalisé des incubations de sol à -4, -1, 2 et 5 °C et ils ont montré que les températures des sols plus froides diminuaient l'évolution de la population microbienne.

Cela indique que le passage de la température du sol au-dessus ou au-dessous de 0° coïncide avec d'importants changements au sein des populations microbiennes. Selon les conditions, des variations typiques de températures du climat causeraient la mort de microorganismes et la libération, immédiate ou reportée, de leur contenu cellulaire dans le sol. Muller *et al.*, 2002 ont précisé que ceci aurait pour effet de remettre en circulation des éléments nutritifs sous leurs formes minérales.

Les résultats de Hermann et Witter, 2002 rejoignent aussi l'hypothèse de Muller *et al.*, 2002, car ils ont montré que 65% du carbone était d'origine microbienne. Dans la même idée, Chantigny *et al.*, 2014 ont indiqué que le déclin de l'azote organique du sol au cours de la saison hivernale pouvait être en partie attribuable à une minéralisation de la biomasse microbienne.

Les données portant sur les effets des conditions climatiques sur les champignons du sol sont rares. Schimt *et al.*, 2011 les ont étudiés dans un sol forestier et les résultats démontraient que les champignons étaient plus sensibles aux températures froides du sol que les bactéries.

Bien que le taux de l'activité puisse être ralenti par les températures froides, plusieurs études ont démontré que les activités microbiennes se déroulaient dans des sols soumis à des conditions climatiques. Ainsi, des phénomènes de minéralisation et

de nitrification ont été observés dans les sols lourds jusqu'à -6 °C (Clark *et al.*, 2009) et dans des sols plus légers jusqu'à -2 °C (Wertz *et al.*, 2013). Cela indique que l'azote organique du sol peut être utilisé par des microorganismes au cours de l'hiver et enrichir du même coup le sol en NO₃⁻, forme minérale plus à risque d'être perdue par lessivage (Chantigny, 2007) ou par dénitrification et lorsque la température du sol demeure sous 0 °C (Pelster *et al.*, 2013 ; Wertz *et al.*, 2013)

Les travaux de Clark *et al.*, 2009 ont d'autre part montré que les microorganismes pouvaient évoluer et dans un sol à des températures basses ce qui est montré dans les résultats ci-dessus.

Par ailleurs, des chercheurs avaient émis l'hypothèse que la température pouvait avoir un effet inhibiteur sur les enzymes qui participent aux activités biologiques des microorganismes, mais il n'y a à ce jour aucune évidence scientifique que ce soit le cas (Dörch *et al.*, 2012 ; Risk *et al.*, 2013).

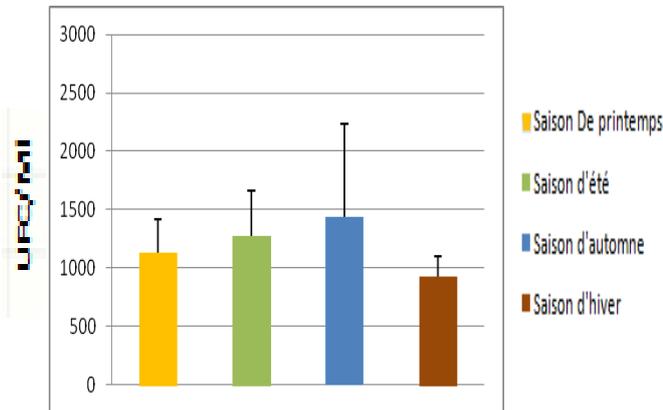
On conclut que la température du sol semble donc très influente sur le processus biologique qui se déroule dans les sols d'hiver et l'évolution des microorganismes.

La figure 18 est les représentations de chaque échantillon pendant les quatre saisons du sol rhizosphérique de la forêt native.

On remarque que la population microbienne de *Ononis natrix* et *Retama monosperma* en automne et printemps est très importante et chute progressivement à la saison d'été par rapport au sol de *Lotus creticus* où la population microbienne est presque équivalente pour toutes les saisons.

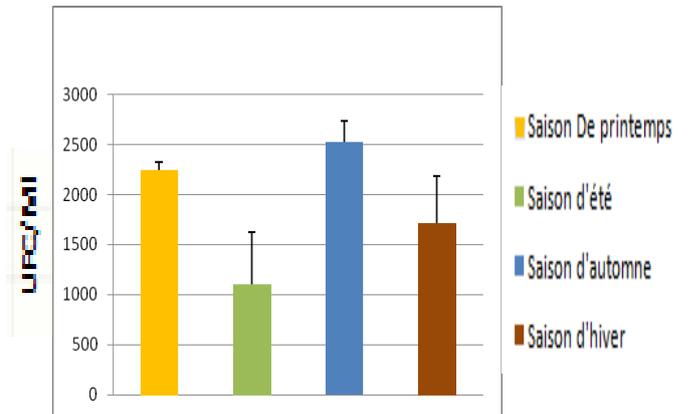
18 Echantillon2: (sol de la foret native)

Lotus creticus



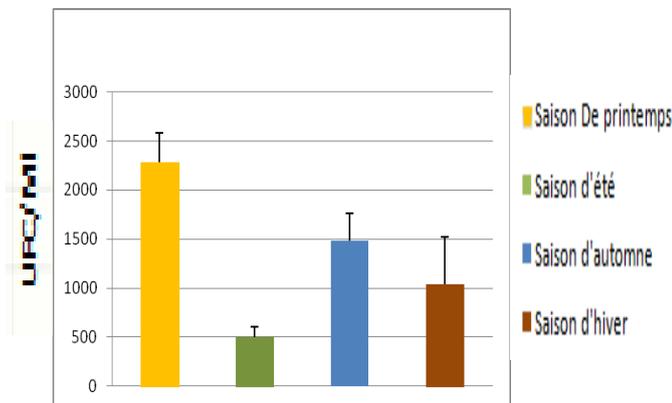
Sol rhizosphérique de *Lotus creticus* à différentes saisons

Retama monosperma



Sol rhizosphérique de *Retama monosperma* à différentes saisons

Ononis natrix



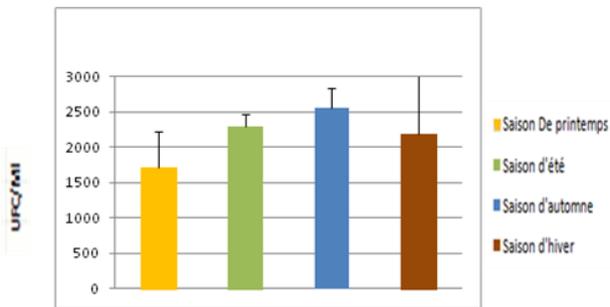
Sol rhizosphérique de *Ononis natrix* à différentes saisons

Figure .18: La flore totale du sol rhizosphérique de la forêt native à différentes saisons.

Et pour les représentations du sol revégétalisé par l'homme qui sont montrés dans la figure 19 on voit toujours une augmentation de la population microbienne pour le *Lotus creticus*, *Ononis natrix* et *Acacia saligna* durant la saison d'automne qui est très importante en revanche pour *Retama monosperma* où la saison de printemps marque le plus de population.

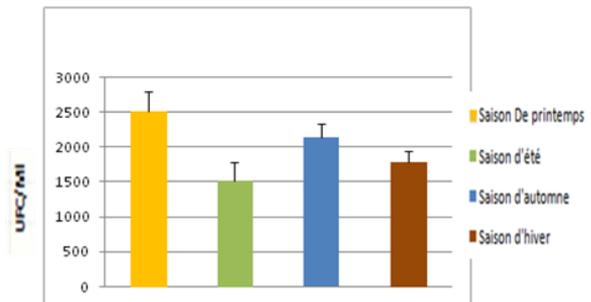
Echantillon 3: (sol revégétalisé par l'homme)

Lotus creticus



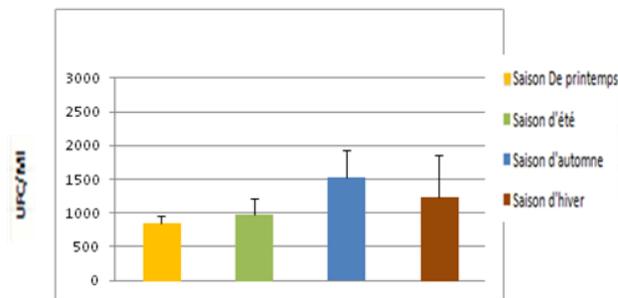
Sol rhizosphérique de *Lotus creticus* à différentes saisons

Retama monosperma



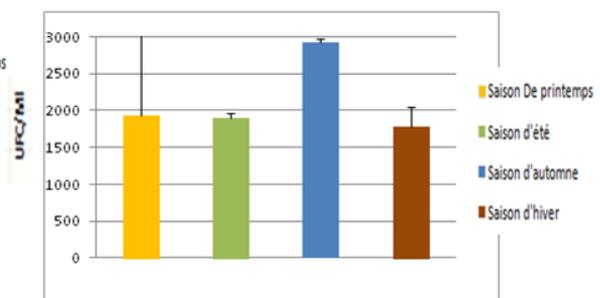
Sol rhizosphérique de *Retama monosperma* à différentes saisons

Ononis natrix



Sol rhizosphérique de *Ononis natrix* à différentes saisons

Acacia saligna



Sol rhizosphérique d'*Acacia saligna* à différentes saisons

Figure .19 : La flore totale du sol rhizosphérique du sol revégétalisé par l'homme à différentes saisons.

D'après ces résultats, il ressort que la plante influe sur la population microbienne du sol. En ce qui concerne la flore bactérienne, CAMPBELL (1985) signale pour le rapport R/S (nombre de germes (nombre de germes dans la rhizosphère / nombre dans le sol nu) une grande variation due à la nature de la plante et des microorganismes isolés dans la rhizosphère / nombre dans le sol nu) une grande variation due à la nature de la plante et des microorganismes isolés.

Les auteurs s'accordent à dire que la plante entraîne une augmentation de la biomasse microbienne dans les sols (Cookson *et al.*, 2008 ; Fang *et al.*, 2007).

Quelques études ont commencé à s'intéresser à la dynamique des communautés microbiennes et ont mis en évidence des successions de populations bactériennes et fongiques (Bastian *et al.*, 2009 ; Baumann *et al.*, 2009 ; Bernard *et al.*, 2007 ; Poll *et al.*, 2010).

La présence de la plante provoque des changements profonds au sein de la communauté bactérienne du sol (Singh *et al.*, 2004).

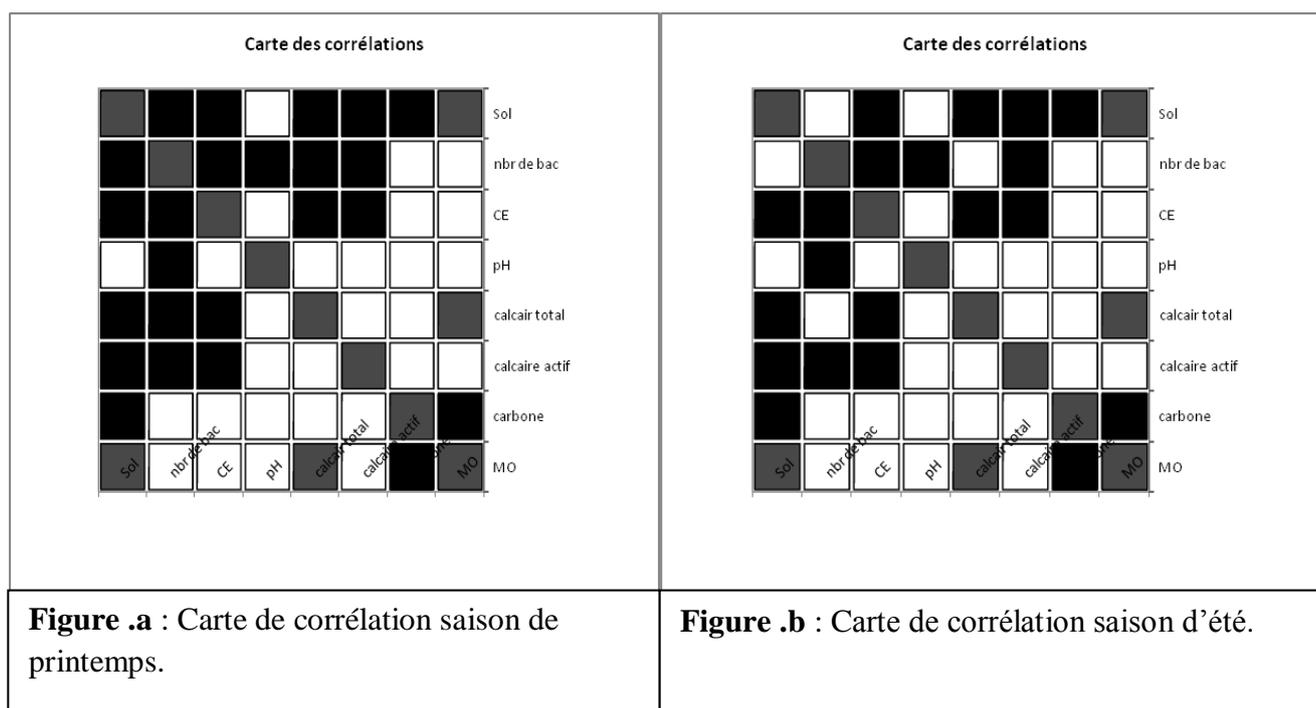
Il est également possible que l'effet observé chez les communautés microbiennes soit attribuable aux changements dans le métabolisme de la plante cultivée. Plusieurs études ont démontré l'effet des exsudats libérés par les racines des plantes sur certains changements dans les communautés microbiennes du sol (Bais *et al.*, 2006; Baudoin *et al.*, 2003).

Ces exsudats représentent une importante source de C pour les microorganismes et sont l'état de santé et le stade de croissance de la plante qui évoluent évidemment au cours de la saison de culture (Balsler *et al.*, 2005; Singh et Pandey 2003).

3. Résultats d'analyses statistiques

A partir de l'analyse de la variance, nous voyons que l'effet de la saison de printemps et d'hiver n'est pas significativement différent ($Pr > F$ plus grand que 0,001), par contre pour la saison d'automne et d'été, il ya une différence significative ($Pr > F$ plus petit que 0,001).

Les cartes de corrélations figure 20 (a, b, c et d) montrent qu'il y a une corrélation avec les paramètres physico-chimiques et les populations microbiennes.



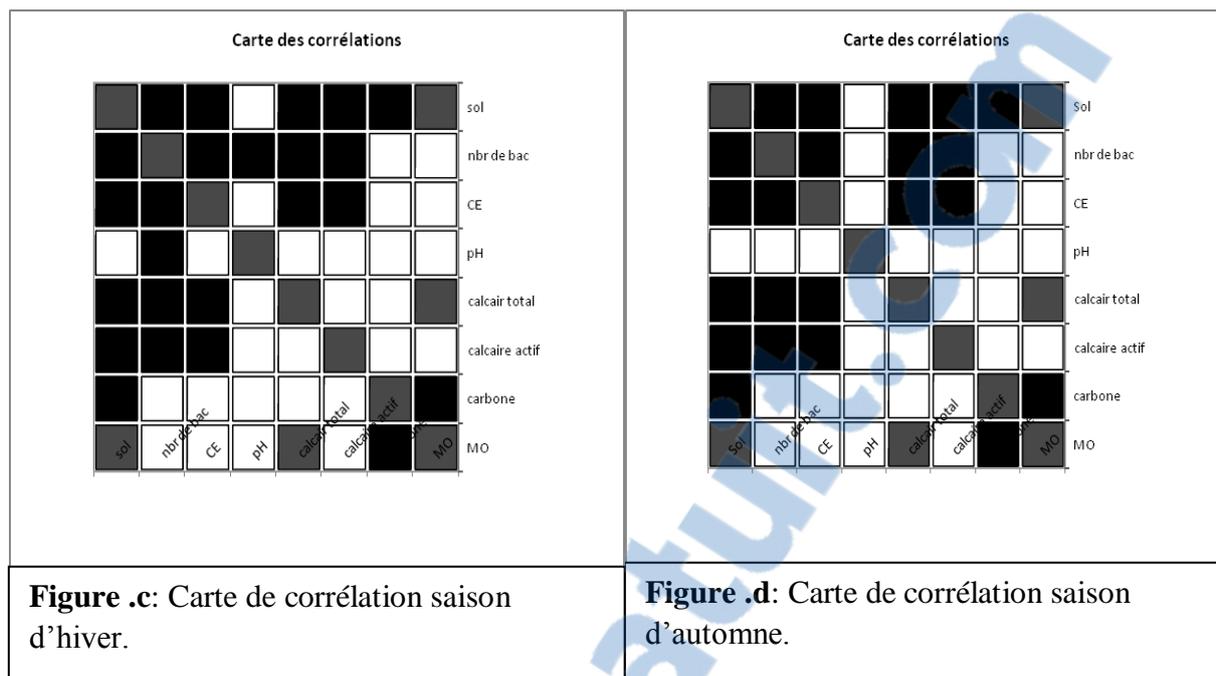


Figure .c: Carte de corrélation saison d’hiver.

Figure .d: Carte de corrélation saison d’automne.

Figure. 20 : Cartes de corrélations (a, b, c et d) à différentes saisons.

Les cartes de corrélation utilisées sont de couleur noir et blanche pour identifier respectivement les corrélations positives et négatives. La diagonale est affichée en gris, la couleur grise représente une grande corrélation, le noir représente une corrélation moyenne et la couleur blanche est la représentation d’une corrélation faible.

Dans toutes les saisons nous avons remarqués une très grande corrélation qui est égale à 100% entre le sol, le calcaire total et la matière organique, le sol est moyennement corrélé avec le carbone, la conductivité électrique, le calcaire actif et le nombre de bactérie et il est faiblement corrélé avec le pH pour la saison de printemps, l’automne tandis que pour la saison d’été on remarque que il est faiblement corrélé, non seulement avec le pH mais aussi avec le nombre de bactérie.

A partir des analyses factorielles on obtient un résumé graphique (cartes) qui sont montrées dans les figures 21 (e, f, g et h) associant les paramètres physico-chimiques et les populations microbiennes.

On remarque que dans toutes les saisons, les paramètres physico-chimiques et le nombre de bactérie corrèlent entre eux sauf pour la saison d'automne où le pH ne corrèle pas avec les autres paramètres.

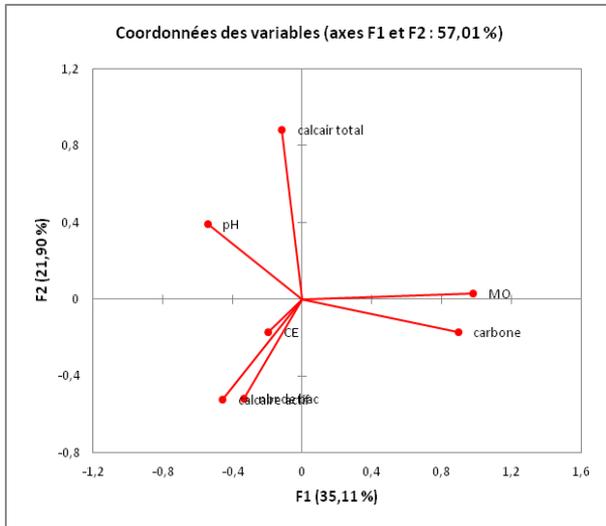


Figure .e : Carte d'analyse factorielle saison d'été.

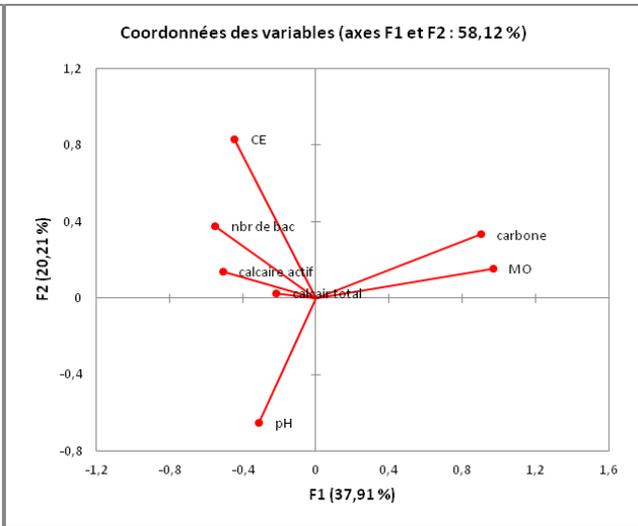


Figure .f : Carte d'analyse factorielle saison d'automne.

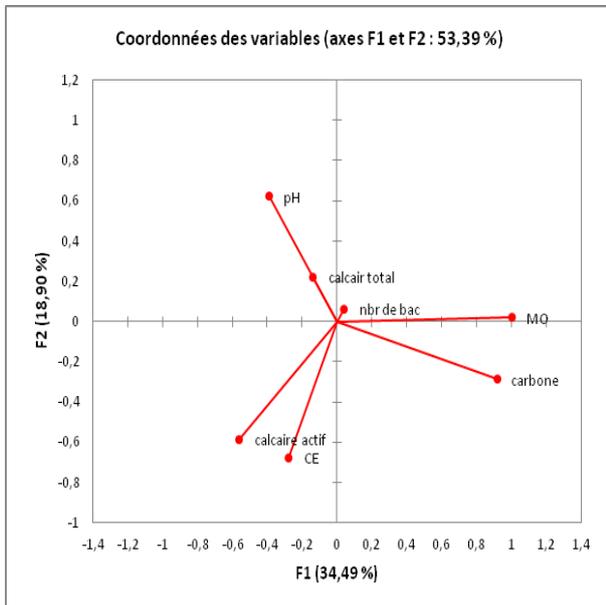


Figure .g : Carte d'analyse factorielle saison d'hiver.

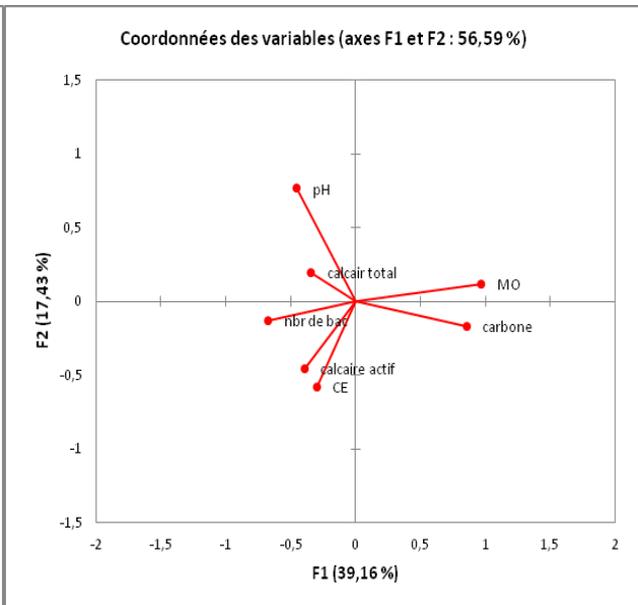


Figure .h : Carte d'analyse factorielle saison de printemps.

Figure. 21 : Cartes d'analyses factorielles (a, b, c et d) à différentes saisons.

4. Approche de modélisation mathématique de population microbienne du sol

La modélisation doit tenir compte de tous les paramètres entre les microorganismes. La première étape de la modélisation consiste à décrire l'évolution de la population microbienne en fonction du temps (saisons) dans des conditions environnementales particulières [Figure.22].

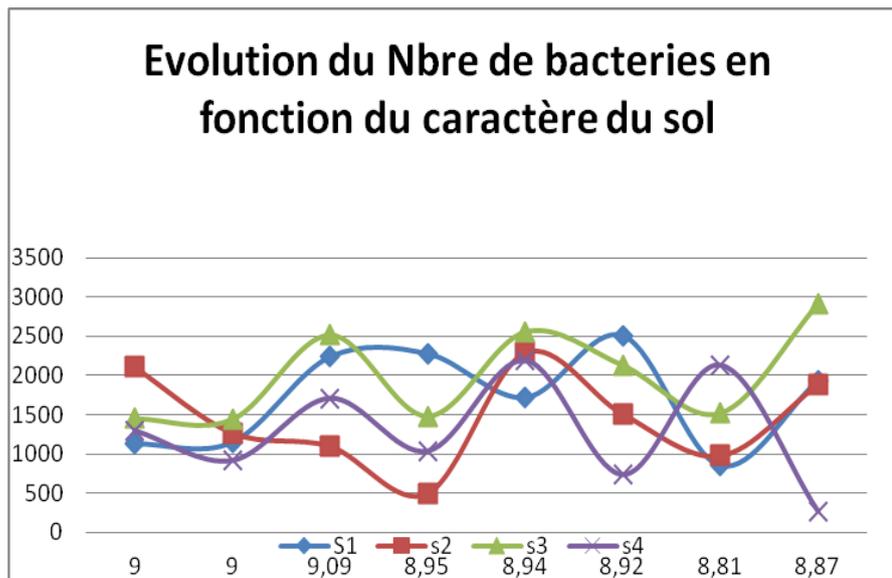


Figure .22 : Représentation de la flore microbienne en relation avec les caractères édaphiques du sol (le pH) pendant les quatre saisons.

On a choisit d'interpréter cette figure comme un modèle globale puisque toutes les modèles se ressemblent quelque sois le caractère physico-chimique du sol.

La figure montre la représentation de la flore microbienne en relation avec les caractères édaphiques du sol (le pH) pendant les quatre saisons. La première remarque qu'on peut sortir de ce modèle est que la population microbienne évolue en zigzag car la nature des sols n'est pas la même, on voit l'influence de saison et de nature de sol sur la population microbienne.

La population microbienne la plus faible est pendant la saison printemps et la plus grande est pendant la saison d'automne mais pour chaque saison on remarque que pour certains sols la flore microbienne est importante et pour d'autres elle est

faible, donc ni la saison ni les caractères édaphiques de sol n'influent sur la population microbienne.

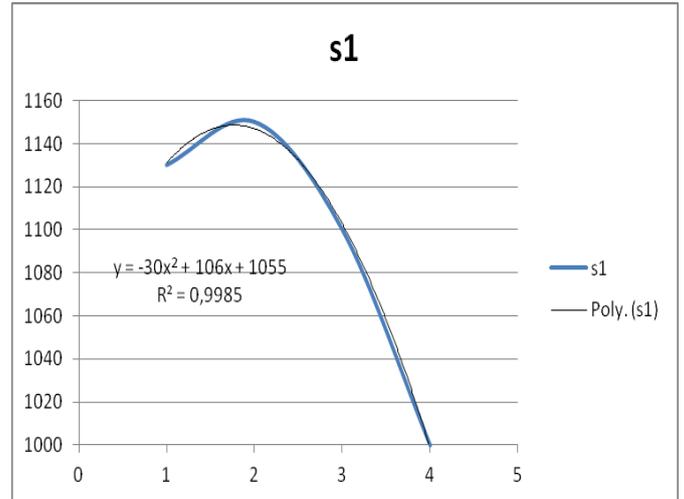
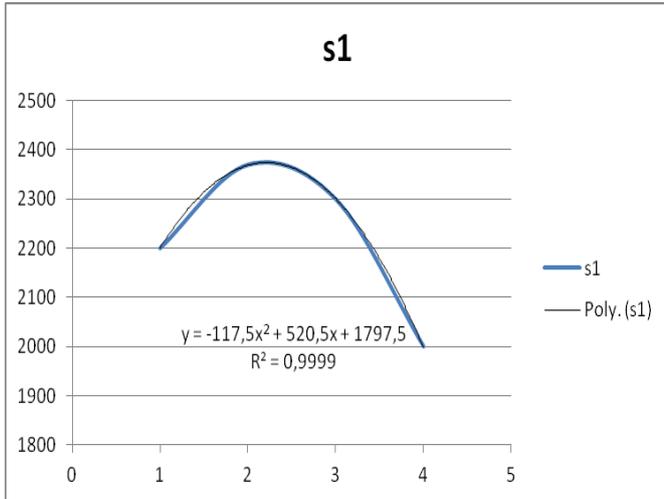
De ce graphe ressort la question suivante :

Quelle est la relation entre les types de sols qui ont un grand nombre de flore microbienne et les sols qui ont aussi une faible masse microbienne ?

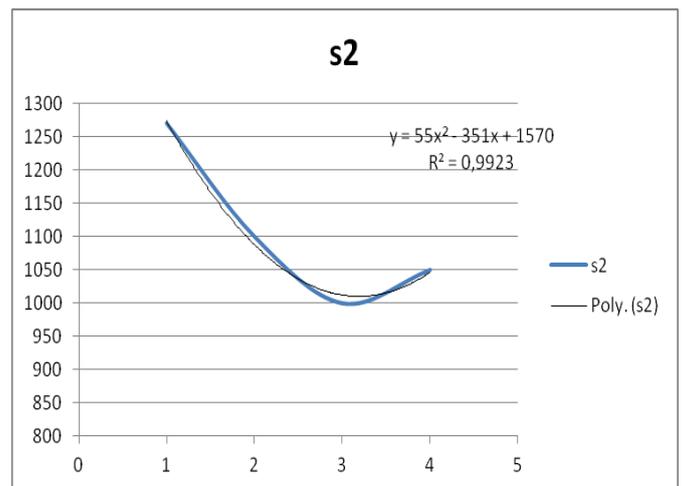
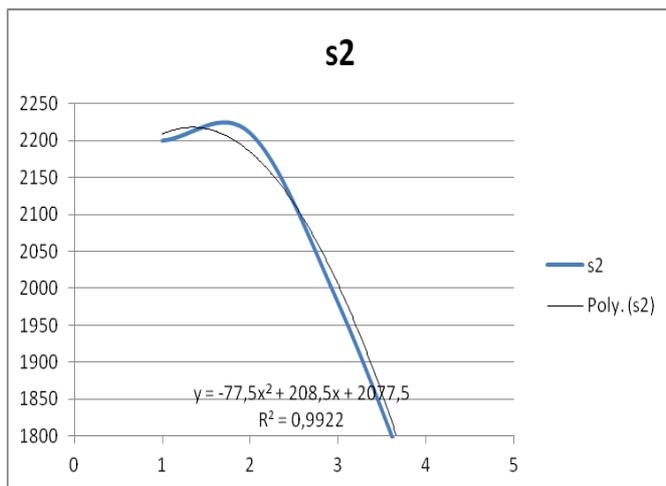
A partir de cette question on peut déterminer deux types de modèles pour chaque saison un modèle supérieur et un autre inférieur.

Les modèles supérieurs (où la population microbienne est au nombre maximum) et inférieurs (où le nombre de population microbienne est au minimum) de chaque saison sont présentés dans la page suivante.

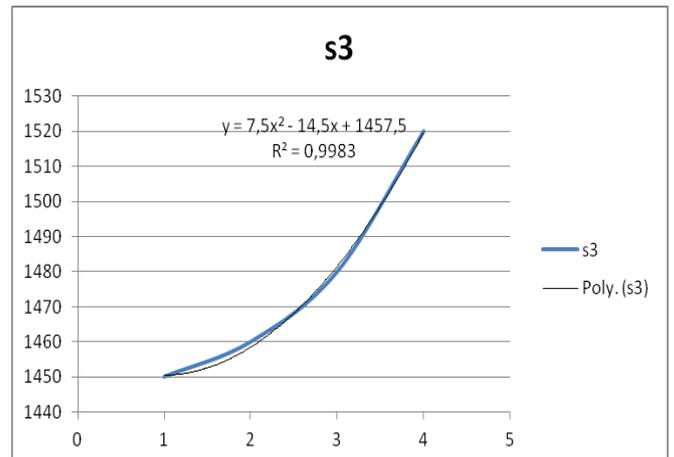
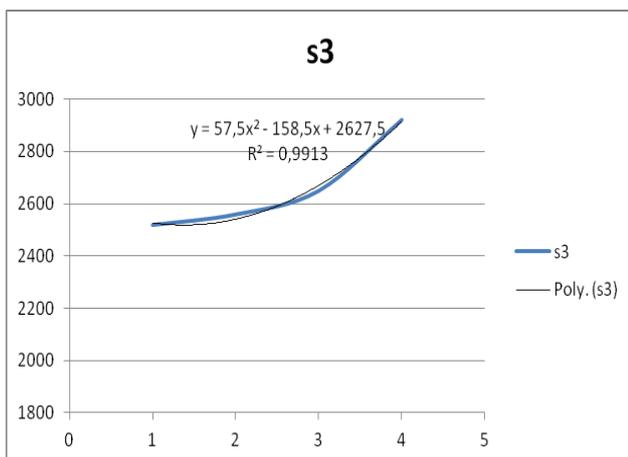
Saison de printemps :



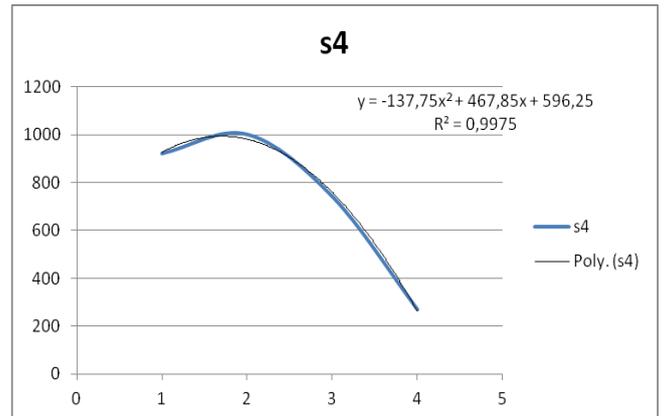
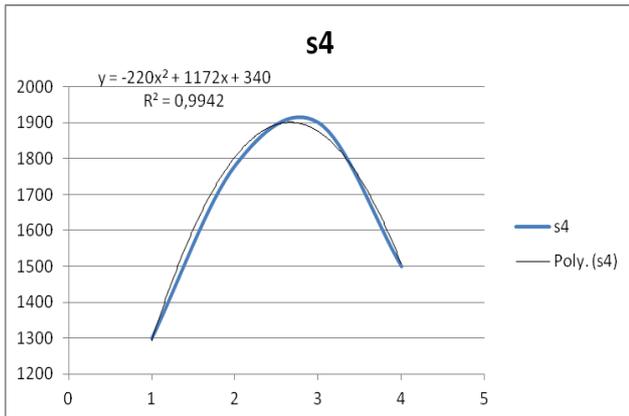
Saison d'été :



Saison d'automne :



Saison d'hiver :



Les **figures .23** des quatre saisons montrent l'évolution de populations microbiennes selon deux niveaux l'un supérieur correspondant au nombre le plus important de la population microbienne et l'autre inférieur correspondant au nombre inférieur de population.

Pour chaque saison une fonction mathématique a été élaborée afin de construire un modèle final représenté comme suit :

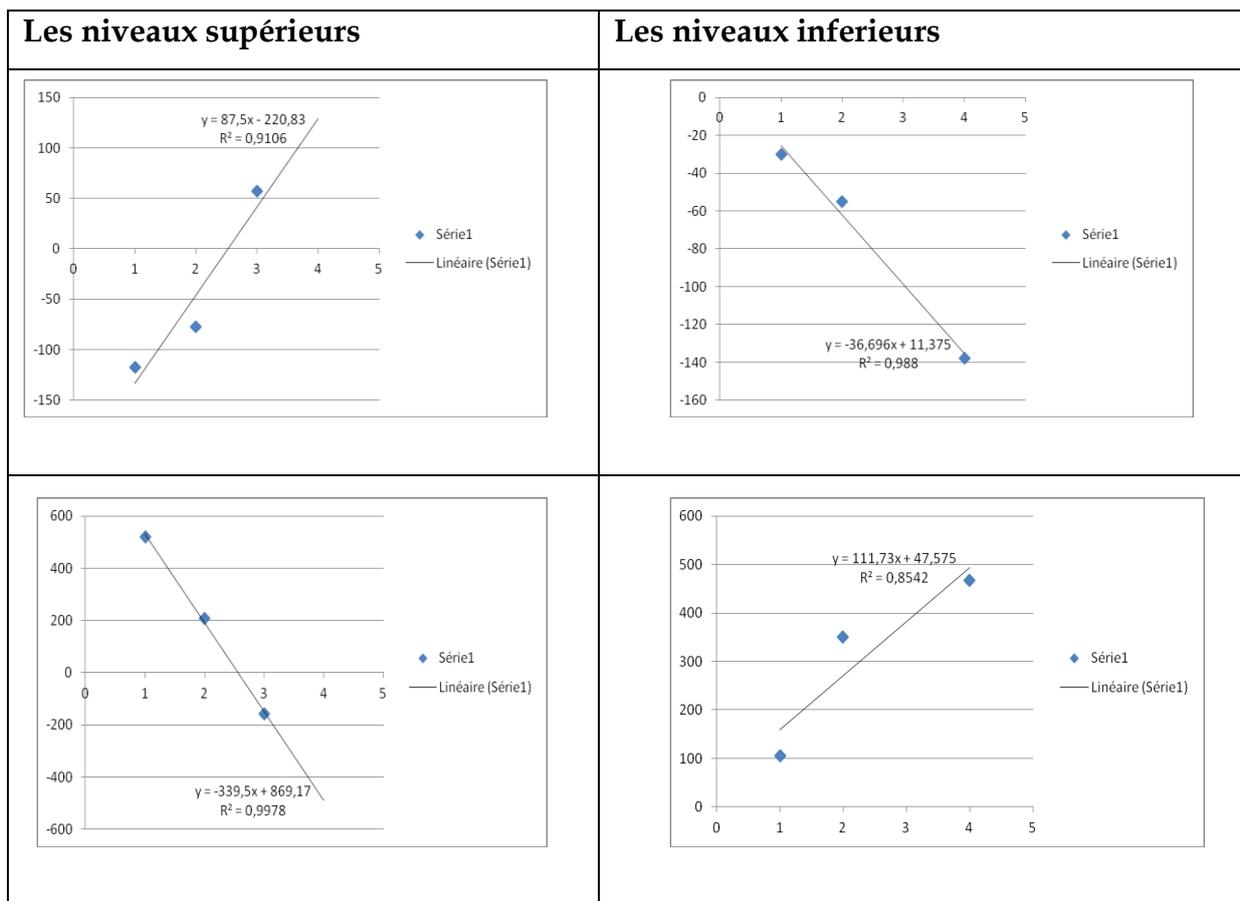
Le modèle supérieur :

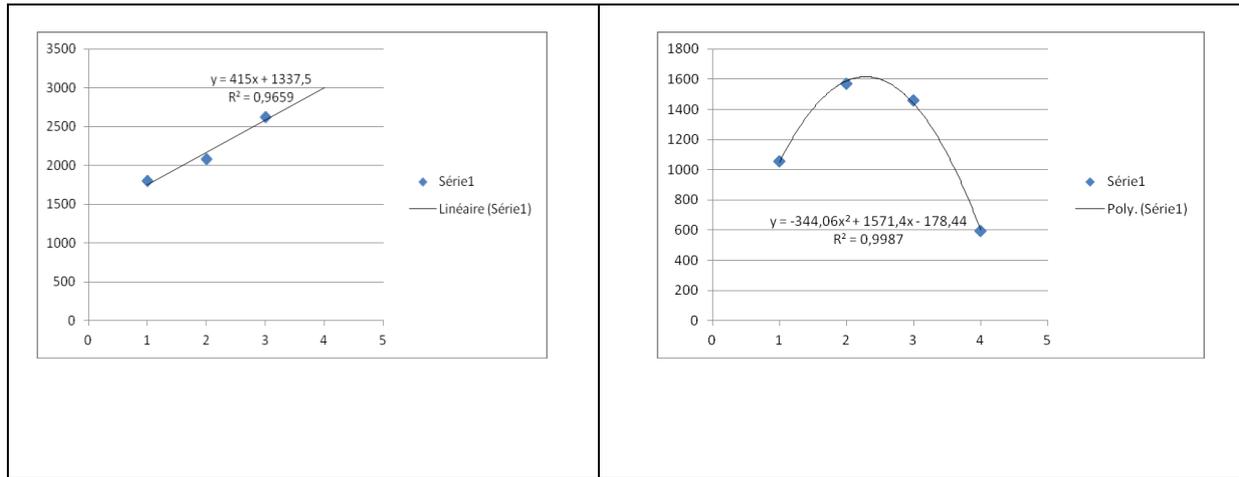
$$\left\{ \begin{array}{l} Y^{1+2+3}_{\max} = (87.5y - 220.83) x^2 + (-339.5 y + 869.17) x + \\ \quad \quad \quad (415y + 1337.5) \quad \quad \quad (1.1) \\ Y^{1+2+3}_{\max} = 87.5 x^2 y - 220.83 x^2 - 339.5 xy + 869.17 x + 415y \\ \quad \quad \quad + 1337.5 \quad \quad \quad (1.1) \\ Y^4_{\max} = -220x^2 + 1172 x + 340 \quad \quad \quad (1'1) \end{array} \right.$$

Le modèle inférieur :

$$\begin{cases}
 Y^{1+2+4}_{\min} = (-36.696 y + 11.375) x^2 + (111.73 y + 45.575) x + (-344.06 y^2 + 1571 y - 178.44) & (2.1) \\
 Y^{1+2+4}_{\min} = -36.696 x^2 y + 11.375 x^2 + 111.73 xy + 45.575 x - 344.06 y^2 + 1571 y - 178.44 & (2.1) \\
 Y^3_{\min} = 7.5 x^2 - 14.5 x + 1439.22 & (2'1)
 \end{cases}$$

Ces deux modèles mathématiques seront traduits en forme linéaire comme suit :





A partir de ces modèles on remarque que les saisons 3 et 4 (automne et hiver) n'obéissent pas au même modèle d'évolution des microorganismes pour les deux classes de niveaux.

Afin d'expliquer ces résultats il s'avère essentiel d'approfondir nos connaissances sur les phénomènes biologiques dans le sol en hiver et en automne.

L'activité biologique du sol est inhibée par les conditions hivernales (Allaire et Dagesse 2010 ; Chantigny 2013). Cependant les observations scientifiques récentes démontrent que les phénomènes biologiques se déroulent dans le sol en hiver et qu'ils pourraient favoriser des pertes d'éléments nutritifs et diminuaient significativement l'efficacité de la fertilisation et affecter la qualité de l'environnement (Allaire et Dagesse 2010, Chantigny 2007, Chantigny 2013, Risk *et al.*, 2013, Ziadi 2007). La compréhension de ces phénomènes et des facteurs qui les modulent demeure superficielle autant chez les scientifiques que chez les agriculteurs et cela limite la précision des prédictions agronomiques servant à la fois la réalisation des plans de fertilisation et à la protection de l'environnement.

Les risques de pertes des éléments nutritifs sont dû aux conditions météorologiques en hiver (Mangnan, 2006 ; QAQ, 2011).

Des données scientifiques semblent démontrer que certains groupes de microorganismes du sol seraient relativement bien adaptés aux conditions pédologiques ; ce serait notamment le cas au sein des populations microbiennes dénitrifiantes confirmant leur activité hivernale par l'émission de N_2O (Allaire et Dagesse 2010 ; Katayanagi et Hatano, 2012 ; Kim *et al.*, 2012 ; Tatti *et al.*, 2014). De ce

fait, il est légitime de penser que l'activité microbiologique des sols pourrait être à l'origine de mécanismes entraînant des pertes ou des modifications des éléments nutritifs des sols au cours de l'hiver et leurs efficacité est très variable (QAQ, 2011).

A la fin d'automne sonne la mort des cultures annuelles dont les parties souterraines et aériennes, les tissus végétaux qui meurent seront décomposés de manière à remettre en circulation dans le sol les éléments nutritifs sous leur forme minérale.

Durant la période automnale, le contenu en eau du sol varie avec les précipitations et la qualité du drainage des champs. Le contenu en eau demeure en moyenne relativement faible (comparativement au printemps par exemple) et le milieu permet les échanges gazeux et la présence d'oxygène. Ainsi, les microorganismes nitrifiants poursuivent leurs activités de nitrification, lesquelles produisent du N_2O comme composé intermédiaire et peuvent laisser des quantités minimales de ce gaz s'échapper du système sous formes de pertes gazeuses, mais leurs activités contribuent surtout à l'accumulation de NO_3^- dans le sol, ingrédient nécessaire pour la production de N_2O par la voie principale de la dénitrification (Risk *et al.*, 2013)

Au fur à mesure que l'automne avance et que les conditions hivernales s'installent, la température du sol va progressivement diminuer. Cela influence sur le nombre de processus physiques et chimiques du sol, comme la vitesse de diffusion, la solubilité des solutés présents, la vitesse des réactions dans le sol et dans les microorganismes eux-mêmes ainsi que la formation de glace dans le sol et en surface. Une baisse de la température a inévitablement un impact sur les populations de microorganismes du sol et leur milieu. Mais cet impact peut varier considérablement selon les différentes conditions ambiantes possibles d'un milieu donné.

Il a longtemps été cru que les processus biologiques du sol ralentissaient au point d'être négligeables durant la période hivernale et ne reprenaient qu'une fois le printemps venu (Allaire et Dagesse, 2010 ; chantigny, 2007). Or, il est bien connu qu'une population microbienne ne peut s'adapter spontanément à un changement majeur au sein de son environnement. Cependant, du côté de la flore microbienne une exposition répétée aux conditions climatiques hivernales lui a permis de s'y

adapter et d'y maintenir des activités durant la saison froide (Chantigny, 2007). Les populations microbiennes se sont probablement acclimatées progressivement à ces conditions ce qui induit au nombre obtenu dans les résultats ci-dessus.

Conclusion et Perspectives

Rapport-Gratuit.com

Conclusion et perspectives

Les objectifs de la thèse étaient en première partie d'évaluer et étudier le comportement de la communauté microbienne face à d'éventuelles perturbations. L'étude menée dans la carrière de Terga (Ain Témouchent) au nord ouest algérien a mis en évidence l'existence d'une activité biologique des sols de la sablière.

Malgré la pauvreté des sols en éléments nutritifs, particulièrement en matière organique qui caractérise la plupart des sols du climat semi aride et le pH qui reste toujours alcalin, les densités enregistrées pour la microflore totale témoignent d'une activité microbiologique non négligeable et très importante durant les quatre saisons observées.

Lors de cette étude, il a été démontré que la communauté microbienne du sol était grandement influencée par l'évolution de la saison au sein des trois sites étudiés.

Les analyses microbiologiques des sols ont décelé une différence entre ces trois sites. Dans le sol nu la flore microbienne est très importante (2200 UFC/ml), dans la forêt native elle varie entre 500 et 2600 UFC/ml et dans le sol revégétalisé par l'homme elle atteint le plus grand nombre 2900 UFC/ml. Tous les résultats obtenus pour les sites étudiés montrent qu'ils sont riches en micro-organismes. Ces derniers jouent un rôle primordial dans le concept de fertilité et le maintien des sols. Les facteurs influençant sur la croissance des microorganismes et les variations de leur communauté sont nombreux à agir en même temps sur le sol. .

De plus, l'évolution de la saison s'est également avérée avoir une grande influence sur la structure des communautés des microorganismes de même que sur les niveaux des différentes variables du sol qui ont été mesurées, le plus grand nombre de la flore microbienne est remarqué dans la saison d'automne et le printemps.

Des variations saisonnières significatives, mais différentes d'un site à un autre, par exemple, en automne et en printemps le nombre de la flore microbienne

est plus important que dans les deux autres saisons, la densité végétale pourrait aussi avoir une influence sur la répartition et la richesse des sols en microorganismes, la grande population microbienne pour la forêt native est dans le sol rhisosphérique de *Retama monosperma* et *Ononis natrix* pour la saison de printemps.

La flore microbienne dans le sol revégétalisé par l'homme est différente pour chaque plante, elle est très importante dans le sol rhisosphérique de *Retama monosperma* dans la saison de printemps et *Acacia saligna* dans la saison d'automne.

La région de Terga constitue donc, un milieu écologique vivant. Ces sites, n'ont pas été influencés par les apports extérieurs. Malgré les conditions défavorables à la végétation dans les deux sites étudiés (sol revégétalisé par l'homme et la forêt native), la présence d'une végétation, relativement importante au niveau des deux sites, reposerait probablement sur l'apport bénéfique de la microflore. Cependant, cette étude nous ne permet pas d'estimer l'efficacité de ces micro-organismes sur la croissance des plantes hôtes et vis versa.

Les analyses statistiques comme les cartes de corrélations, montrent que dans toutes les saisons il y'a une grande corrélation entre les caractères édaphiques et le sol sauf pour le pH et la flore microbienne, du même pour les analyses factorielle où le la flore microbienne corrèle avec les paramètres physico-chimiques durant toutes les saisons sauf pour la saison d'automne.

D'après les résultats de la première partie et dans un but de revégétalisation de la carrière de Terga, la deuxième partie de ce travail été effectuée par une étude de modélisation. Les modèles de régressions linéaires ont montré que l'évolution de la population microbienne dans la saison d'hiver et l'automne n'obéissent pas autres modèles. Le nombre de microorganismes du sol trouvés durant la saison d'hiver est dû à l'adaptation aux conditions pédologiques de certains groupes.

D'après les résultats obtenus, il ressort que la biomasse microbienne est très grande avec un niveau supérieur pendant la saison d'automne.

Dans le cas d'une dégradation avancée de la carrière de Terga, nous espérons avoir contribué à apporter des éléments nouveaux par rapport aux différents travaux

effectués précédemment dans le domaine de notre étude et la modélisation biologique.

Puisque les sols à restaurer comme la carrière de Terga ont souvent des propriétés physiques et chimiques anormales, seules les plantes adaptées à ces contraintes peuvent les coloniser. Il serait souhaitable donc de poursuivre ce travail en multipliant le nombre de sites et d'échantillons pour avoir plus des résultats et d'intégrer de nouveaux aspects que nous n'avons pas pu aborder jusqu'à présent.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- AgriInfo.in. (2011).** Soil Textural Classes. Introduction to soil science-My Agriculture Information bank.
- Alain K., Querellou J. (2009)** Cultivating the uncultured: limits, advances and future challenges. *Extremophiles*, 13: 583-594.
- Alexander M. (1977).** Introduction to soil microbiology, second edn. *United States of America: John Wiley & Sons, Inc.*
- Alexander M. (1982).** Most probable number method for microbial populations. In: Page AI., Muller RH., Keeney DR. Methods of soil analysis (Part 2). Chemical and microbiol properties (2nd ed.). *Madison, Wisconsin: ASA-SSSA*. 815-820.
- Ahearen G.G., Roth F.J & Meyers S.P. (1973).** *Antonie van Leeuwenhoek*. 36, 503-508.
- Allare S., Dagesse D. (2010).** Measurement and Processes in Frozen Soils: Preface. *Canadien Journal of Soil Science*, vol. 90, n°3. [Http://pubs.aic.ca/doi/abs/10.4141/CJSS10501](http://pubs.aic.ca/doi/abs/10.4141/CJSS10501) (page consultée 3mars 2014).
- Amann R.I., Ludwig W., Schleifer K.H. (1995)** Phylogenetic identification and in situ detection of individual microbial cells without cultivation. *Microbiological Review*, 59: 143-169.
- Ambouta J.M.K., Valentin C., Laverdiere M.R. (1996).** « Jachères et croutes d'érosion au Sahel » *Sécheresse*, vol. VII n°4 : 269-275
- Anderson R.V., Elliott E.T., McClellan L.F, Coleman D.C., Cole C.V. & Hunt H.W. (1978).** Trophic interactions in Soil as they affect energy and nutrient dynamics. III. Biotic interactions of bacteria, amoebae, and nematodes. *Microbial Ecology* 4,361-371.
- Anne P. (1945).** Le dosage rapide du carbone organique dans les sols. *Ann. Agron.* Avril, Mai, Juin, 1945, 5 ème année, no 2, 161-172.
- Artursson V., Finlay R.D & Jansson J.K. (2005).** Combined bromodeoxyuridine immunocapture and terminal-restriction fragment length polymorphism analysis highlights differences in the active soil bacterial metagenome due to *Glomus mosseae* inoculation or plant species. *Environ Microbiol.* 7: 1952-1966.
- Arpin P. (1980).** Les éléments prédateurs de la faune du sol. In: Pesson P. (ed.) *Actualités d'écologie forestière: Sol, flore et faune*. Gauthier-Villars, Paris.

- Asuming-Brempong S., Gantner S., Adiku S.G.K., Archer G., Edusei V., Tiedje J.M. (2008).** Changes in the biodiversity of microbial populations in tropical soils under different fallow treatments. *Soil Biol Biochem.* 40: 2811-2818.
- Atlas R.M., & Bartha R. (1993).** Fundamentals and Applications. Third edition. édition The Benjamin / Cummings Publising Company, Inc. edn. Redwood City. *Microbial Ecology*.Canada. 563.
- Aubert G. (1978).** Méthode d'analyse des sols, 191.
- Azcon R., Barea J.M & Hayman D.S. (1976).** Utilisation of rock phosphate in alkaline soils by plants inoculated with myccorrhizal fungi and P solubilizing bacteria. *Soil Biology and Biochemistry* 8,135-138.
- Bais H.P., Weir T.L., Perry L.G., Gilroy S.and Vivanco J.M. (2006).** "The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms." Annual Review in *Plant Biology* 57: 233-266.
- Baize D. (2000).** Guide des analyses en pédologie (2 édition revue et augmentée). Paris, INRA.
- Bakken L.R. (1985).** *Appl. Environ. Microbiol.* 49, 1482-1487.
- Bakken L.R. (1997).** Culturable and nonculturable bacteria in soil. In: Van Elsas J. D, Trevors J. T. & Wellington E. M. H. (eds) *Modem soil microbiology*. Marcel Dekker, INC. New York. 4761.
- Balser T.C., Treseder K.K. and Ekenler M. (2005).** "Using lipid analysis and hyphal length to quantify AM and saprotrophic fungal abundance along a soil chronosequence." *Soil Biology & Biochemistry* 37: 601-604
- Balvanera P., Pfisterer A.B., Buchmann N., He J.S., Nakashizuka T., Raffaelli D., Schmid B. (2006).** Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. *Ecology Letters*, 9: 1146-1156.
- Baranyi J., Roberts T. & McClure P. (1993).** « A non-autonomous differential equation to model bacterial growth ». *Food Microbiol.* 10,43-59.
- Baranyi J. & Roberts T. (1994).** « A dynamic approach to predicting microbial growth in food ». *Int. J. Food Microbiol.* 23,277-294.

- Bardgett R.D. & Griffiths B.S. (1997).** Ecology and Biology of soil Protozoa, Nematodes, and Microarthropods. In: Van Elsas J. D, Trevors J. T. & Wellington E. M. H. (eds) *Modern soil microbiology*. Marcel Dekker, INC. New York. 129-163.
- Barea L.M., Azcon R. & Azcon-Anguilar C. (1992).** Vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi innitrogen fixing system. In Varma A., Norris J R, Read D J (eds) *Methods in Microbiology. Experimems wih Mycorrhiza*. New York, USA: Academie Press. 391-415.
- Buchanan R.L., Whiting R.C., Damert W.C. (1997).** When is simple good enough: a comparison of the Gompertz, Baranyi, and threephase linear models for fitting bacterial growth curves. *Food Microbiol.* 14, 313-326.
- Baudoin E., Benizri E. and Guckert A. (2003).** "Impact of artificial root exudates on the bacterial community structure in bulk soil and maize rhizosphere." *Soil Biology & Biochemistry* 35: 1183-1192.
- Baumann K., Marschner P., Smernik R.J., Baldock J.A. (2009).** Residue chemistry and microbial community structure during decomposition of eucalypt, wheat and vetch residues. *Soil Biology & Biochemistry*, 41: 1966-1975.
- Bastian F., Bouziri L., Nicolardot B., Ranjard L. (2009).** Impact of wheat straw decomposition on successional patterns of soil microbial community structure. *Soil Biology & Biochemistry*, 41: 262-275.
- Baver L.D. (1961).** Soil Physics. *John Wiley and Sons, New York*.
- Beare M.H., Coleman D.C., Crossley Jr D.A., Hendrix P.F., Odum E.P. (1995).** A hierarchical approach to evaluating the significance of soil biodiversity to biogeochemical cycling. *Plant and Soil*, 170: 5-22.
- Bernard L., Mougél C., Maron P.A., Nowak V., Lévêque J., Henault C., Haichar F., Berge O., Marol C., Balesdent J., Gibiat F., Lemenceau P., Ranjard L. (2007).** Dynamics and identification of soil microbial populations actively assimilating carbon from ¹³C labelled wheat residue as estimate by DNA- and RNA-SIP techniques. *Environmental Microbiology*, 9: 752-764.
- Berthelin L. & Toutain F. (1979).** Biologie des sols. In Duchafour P. & Souchier B (eds) *Pédologie. 2. Constituants et propriétés du sol*. Masson, Paris. 121-160.
- Bloem J., Lebbink G., Zwart K.B., Bouwman L.A., Burges S., Devos J.A. & De Ruiter P.C. (1994).** Dynamics of microorganisms, microbivores and nitrogen

mineralization in whinterwheat fields under conventional and integrated management. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 51,129-143.

Brady N.C. (1990). The nature and properties of soils. 10th edition. 621 pp. *Macmillan Publishing Co.*, New York, NY.

Brady N.C., Weil R.R. (2002). The Nature and properties of soils. 13th ed. Upper Saddle River, Nj, USA : *Pearson Education Inc.*, 960.

Brown G.G., Barois I., Lavelle P. (2000). Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity in the drilosphere and the role of interactions with other edaphic functional domains. *European Journal of Soil Biology*, 36: 177-198.

Bruand A. (2009). Qu'est ce que le sol ? In : *Le sol*, Dossier. INRA, 12-17.

Brunel N., Bahglia D. & hansel D. (2007). Temporal deonelation of collective oscillations in neural networks with local inhibition and long-range excitation. *Phys. Rev lett.* 99,238106 doi : 10, 1103/*phys Rev lett* 99,238106.

Bollag J.M et Leyval C. (1998). Interactions entre les minéraux des sols, les composésorganiques et les microorganismes : Interactions constituants minéraux-constituants organiques- microorganismes du sol sur le cycle et la biodisponibilité des éléments. Montpellier, 16^{ème} congrès mondial de science du sol.

Bonin S. (2006). Cours pédologie. Connaissance des sols -Introduction à la pédologie.

Borneman J., Skroch P.W., O'Sullivan K.M, et al. (1996). Molecular microbial diversity of an agricultural soil in Wisconsin. *Appl Environ Microbiol.* 62: 1935-1943.

Borneman J. & Triplett E.W. (1997). Molecular microbial diversity in soils from eastern Amazonia: evidence for unusual microorganisms and microbial population shifts associated with deforestation. *Appl Environ Microbiol.* 63: 2647-2653.

Bottner P. & Billès G. (1987). La rhizosphère: site d'interactions biologiques. *Revue d'écologie et de biologie des sols* 24, 369-388.

Boughachiche F.S., Reghioua L., Oulmi H., Zirezer M., Kitouni A., Boudemagh et Boulahrouf. A (2005). Isolement d'actinomycètes productrices de substances antibactériennes à partir de la sebkha de Ain Mlila. *Scienc. Techno.* **23**: 5-10.

- Bouix M. et Leveau J.Y. (1991).** Les levures Ds : Bourgeois C.M., Leveau J.Y., Techniques d'analyse et de contrôle dans les industries agroalimentaires, édition 2 *Lavoisier-Tec & Doc*, Paris. 3 : 206-229.
- Burhan N., Sapundzhiev T. & Beschkov V. (2005).** «Mathematical modelling of cyclodextrin glucanotransferase production by batch cultivation ». *Biochemical Engineering Journal*. 24, 73-77.
- Bye P. (1999).** La truffe, la terre, la vie. Paris, édition INRA.
- Callo G., Dupuis M. (1980).** Le calcaire actif des sols et sa signification. *Dull. Afes*.17-26.
- Campbell R. (1985).** Plant microbiology, *ARNOLD ed.*, Londres 191.
- Carrier A. (2003).** Que passe-t-il dans le sol ? serriculture maraicher biologique Agriculture, pêcheries et alimentation, P02.
- Chader S, Touzi A. (2001).** Biomasse Algale : Source Energétique et Alimentaire. *Rev. Energ. Ren. : Production et Valorisation - Biomasse*, 47-50
- Chantigny M.H. (2007).** Mythes et réalités sur l'azote du sol et des fumiers. *In Agriréseau*.
www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/Chantigny_%20M_resume_PPT.pdf (Page consultée le 6 décembre 2013).
- Chantigny M.H. (2013).** Discussion au sujet des épandages automnaux et des processus pédologiques du sol en hiver. Communication orale. *Discussion entre Marie-Michelle Gamache et Martin Chantigny. Chercheur en biochimie du sol et elements nutritifs au Centre de recherché et de développement sur les sols et les grandes cultures*, 26 octobre 2013, Québec.
- Chantigny M.H., Angers D.A., Rochette P., Pomar C et Pelster D.E. (2014).** Evidencing overwinter lossof residuel organic and clay-fixed nitrogen from spring applied ¹⁵N- labeled pig sturry. *Canadian Journal of Soil Science*, Vol. 94, n° 1,. 1-8.
- Chenu C. (1993).** Clay or sand polysaccharide associations as models for the interface between micro-organisms and soil: water related properties and microstructure. *Geoderma*. 56.

- Christensen H. & Funck-Jensen D.(1989).** Growth rate of rhizosphere bacteria measured directly by the tritiated thymidine incorporation technique. *Soil Biology and Biochemistry* 21,113-117.
- Clark K., Chantigny M.H., Angers D.A, Rochette P et Parent L.E. (2009).** Nitrogen transformations in cold and frozen agricultural soils following amendments. *Soil Biology & Biochemistry*, vol. 42, n° 1, 348-356.
- Coleman D.C., Cole C.V., Hunt H.W. & A., K.D. (1978b).** Trophic interactions in Soils as they affect energy and nutrient dynamics. 1. Introduction. *Microbial Ecology* 4, 345-349.
- Coleman D.C., Whitman W.B. (2005).** Linking species richness, biodiversity and ecosystem function in soil systems. *Pedobiologia*, 49: 479-497.
- Cookson W.R., Murphy D.V., Roper M.M. (2008).** Characterizing the relationships between soil organic matter components and microbial function and composition along a tillage disturbance gradient. *Soil Biology & Biochemistry*, 40: 763-777.
- Corman A. (1982).** Modélisation mathématique du processus de nitrification dans le sol. Thèse de doctorat. Ing, Université Claude de Bernard Lyon 1.
- Costa R., Gotz M., Mrotzek N., Lottmann J., Berg G & Smalla K. (2006).** Effects of site and plant species on rhizosphere community structure as revealed by molecular analysis of microbial guilds. *FEMS Microbiol Ecol.* 56: 236-249.
- Costanza R., d'Arge R., et al. (1997).** « The value of the world's ecosystem services and natural capital. » *Nature* 387(6630) :253-260.
- Crawford D.L.J., Lynch M., Whipps J.M., Ousley M.A. (1993).** Isolation of actinomycetes antagonists of a fungal root pathogen. *App. Environ. Microbiol.* 59: 3899- 3905.
- Csatho P., Sisak I. et al. (2007).** « Agriculture as a source of phosphorus causing eutrophication in Central and Eastern Europe. » *Soil Use and Management* 23 :36-56.
- Davet P. (1996).** Vie microbienne du sol et production végétale. Paris, édition INRA.
- Dalgaard P. (1995).** Qualitative and quantitative characterization of spoilage bacteria from packed fish. *Int. J. Food Microbiol.* 26,305-317.

De Ruiter P.c., Van Veen, J.A., Moore J.c., Brussaard L. & Hunt H.W. (1993).

Calculation of nitrogen mineralization in soil food webs. *Plant and soil* 157,263-273.

Dequiedt S., Thioulouse J., Jolivet C., Saby N.P.A., Lelievre M., Maron P.A., Martin M.P., Chemidlin Prévost-Bouré N., Toutain B., Arrouays D., Lemanceau P., Ranjard L. (2009). Biogeographical patterns of soil bacterial communities. *Environmental Microbiology Reports*, 1 : 251-255.

Diaz S., Lavorel S., et al. (2007). « Land Change Science Special Feature :

Incorporating plant functional diversity effects in ecosystem service assessments. » *proceedings of the National Academy of Sciences* 104(52) : 20684-20689.

Diop T.A. (1995). Ecophysiologie des champignons mycorhiziens à vésicules à arbuscules associés à *Acacia albida* Del. dans les zones sahéliennes et soudano-guinéenne du Sénégal. *Thèse de doctorat, Université d'Angers, France*. 165.

Diop, T.A., (1996). Les mycorhizes à vésicules et à arbuscules. *Journal de la faculté des Sciences de Univerité de Dakar*, BI, 49-64.

Dörsch P., Braker G. et Bakken L.R. (2012). Community-specific pH response of denitrification: experiments with cells extracted from organic soils. *FEMS Microbiology Ecology*, vol, 79, n° 2, 530-541.

Drouet T.H. (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)

Drouineau G. (1942). Dosage rapide du calcaire actif des sols. Nouvelles données sur la répartition et la nature des fractions calcaires. *Annales Agron. (Nouvelle série)* 12: 44 1-450.

Dubey Y.P. (2011). Rhizobia- As ameliorant to soil reaction. *African Journal Of Microbiology Reseach*. 5(24), 4091-4096.

Duchaufour P. (1977). Pédogénèse et classification. *Paris: Masson S.A.*

Dunfield K.E. & Germida J.J. (2003). "Seasonal changes in the rhizosphere microbial communities associated with fieldgrown genetically modified canola (*Brassica napus*)." *Applied & Environmental Microbiology* 69: 7310-7318.

Ekschmitt K., Bakonyi G., Bongers M., Bongers T., Boström S., Dogan H., Harrison A., Kallimanis A., Nagy P., O'Donnell A.G., Sohlenius B., Stamou, G.P. & Wolters V. (1999). Effects of the nematofauna on microbial energy and matter transformation rates in European grassland soils. *Plant and soil* 212, 45-61.

Etude d'impact sur l'environnement (E.I.E) de la sablière de Terga-Wilaya de Ain Témouchent (2000).

Fang M., Motavalli P.P., Kremer R.J., Nelson K.A. (2007). Assessing changes in soil microbial communities and carbon mineralization in Bt and non-Bt corn residue-amended soils. *Applied Soil Ecology*, 37: 150-160.

Ferris H., Venette R.c., vanderMeulen H.R. & Lau S.S. (1998). Nitrogen mineralization by bacterial-feeding nematodes: verification and measurement. *Plant and Soil* 203, 159-171.

Fierer N., Jackson R.B. (2006). The diversity and biogeography of soil bacterial communities. *PNAS*, 103 : 626-631.

Fierer N., Bradford M.A & Jackson R.B. (2007). Toward an ecological classification of soil bacteria. *Ecology*. 88: 1354-1364.

Fierer N., Breitbart M., Nulton J., Salamon P., Lozupone C., Jones R., Robeson M., Edwards R.A., Felts B., Rayhawk S., Knight R., Rohwer F., Jackson R.B. (2007b). Metagenomic and small subunit rRNA analyses reveal the genetic diversity of bacteria, archaea, fungi and viruses in soil. *Applied and Environmental Microbiology*, 73: 7059-7066.

Focht D.D. & Martin J.P. (1979). Microbiological and Biochemical Aspects of Semi-arid agricultural soils. In: Hall A. E., Canne!! G. H. & Lawton H. W. *Agriculture in Semiarid Environment*. Springer-Verlag, Berlin. 119-147.

Foley J.A., DeFries R., et al. (2005). «Global consequences of land use. » *Science* 309 (5734) : 570-574.

Foster R.C. (1988). Microenvironments of soil microorganisms. *Biol. Ferti. of soils* 6, 189-203.

- Gaillard V., Chenu C., Recous S., Richard G. (1999).** Carbon, nitrogen and microbial gradients induced by plant residues decomposition in soil. *European Journal of Soil Science*, 50: 567-578.
- Ganry F. & Dommergues Y.R. (1995).** Arbres fixateurs d'azote: champ ouvert pour la recherche. *Agriculture et développement*, 37-55.
- 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
- Gérard F., Mayer K.U., Hodson M.J., & Ranger J. (2008).** Modelling the biogeochemical cycle of silicon in soils: application to a temperate forest ecosystem. *Geochim. Cosmochim. Acta* 72, 741-758.
- Ghodbani T., et al. (2008).** Extraction du sable dunaire a Terga plage, Algérie ouest impacts sur l'environnement, *conflits d'usagers et outils de gestion*.
- Gianinazzi-Pearson V. & Diem H.G. (1982).** EndomycolThizae in the tropics. In Dommergues D. & Diem, H. G. (eds) *Microbiology of Tropical Soils and Plant Productivity*. Junk, the Hague. 209-251.
- Giasson P et Jaouich A. (2008).** Les propriétés physiques du sol. première partie texture et structure. [http : www.banque-pdf.fr/fr_caracteristique-physique-du-sol.html](http://www.banque-pdf.fr/fr_caracteristique-physique-du-sol.html)
- Gibson A.M., Bratchell N., Roberts T.A. (1987).** The effect of sodium chloride and temperature on the rate and extent of growth of *Clostridium botulinum* type A in pasteurized pork slurry. *Journal. Appl. Bacteriol.* 62, 479-490.
- Gignoux J., House J., Hall D., Masse D., Nacro HB., Abbadie L. (2001).** Design and test of a generic cohort model of soil organic matter decomposition: the SOMKO model. *Global Ecology & Biogeography*, 10: 639-660
- Giller K.E., Beare M.H., Lavelle P.A., Izac N., & Swift M.J. (1997).** Agricultural intensification, soil biodiversity and agrosystem function. *Appl Soil Ecol* 6: 3-16.
- Girard M.C., Walter C., Rémy J.C., Berthelin J., Morel J.L. (2005).** Sols et environnement. « Collection Sciences de la Terre » Dunod, Imprimerie Chirat, 816.

Girvan M.S., Bullimore J., Pretty J.N., Osborn A.M & Ball AS. (2003). Soil type is the primary determinant of the composition of the total and active bacterial communities in arable soils. *Appl Environ Microbiol.* 69: 1800-1809.

Girvan M. S., Bullimore J., Ball A.S., Pretty J.N. & Osborn A.M. (2004). "Responses of active bacterial and fungal communities in soils under winter wheat to different fertilizer and pesticide regimens." *Applied & Environmental Microbiology* 70: 2692-2701.

Glibert P., Harrison J., et al. (2006). « Escalating Worldwide use of Urea - A Global Change Contributing to Coastal Eutrophication. » *Biogeochemistry* 77(3) :441-463.

Glick B.R., Karaturovic D.M. & Newell P.C. (1995). A novel procedure for rapid isolation of plant growth promoting Pseudomonads. *Canadian Journal of Microbiology*, 41: 533-536.

Gobat J.M., Aragno M., Matthey Willy. (1998). Le sol vivant. Collection —Gérer l'environnement » 14, *Presses Polytechniques et Universitaires Romandes*, 519.

Gobat J., Aragno M & Matthey W. (2003). Le sol vivant, second edn. *Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.*

Gompertz B. (1825). On the nature of the function expressive of the law of human mortality and on a new model of determining life contingencies. *Phil. Trans. R. Soc.* 115, 513–585.

Goodfellow M., & Williams S.T.(1983). Ecology of the actinomycetes. *Annu. Rev. Microbiol.* 37: 189-216.

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.

Graham P. & Allan D. (2002). Symbiotic Nitrogen Fixation : The Symbiosis between Legumes and Rhizobia. Course on line, departement of soil, water and climate : University of Minnesota.
http://www.soils.umn.edu/academics/classes/soil3612/Symbiotic_Nitrogen_Fixation/Environmental.htm

- Graystone S.J., Vaughan D. & Jones D. (1996).** Rhizosphere carbon flow in trees, in comparison with annual plants: the importance of root exudation and its impact on microbial activity and nutrient availability. *Applied Soil Ecology* 5,29-56.
- Grayston S.J., Wang S.Q., Campbell C.D., Edwards A.C. (1998).** Selective influence of plant species on microbial diversity in the rhizosphere. *Soil Biol Biochem.* 30: 369-378.
- Griffiths B.S., Welschen R., Van Arendonk, I.J.C.M. & Lambers H. (1992).** The effect of nitrate-nitrogen supply on bacteria and bacterial-feeding fauna in the rhizosphere of different grass species. *Oecologia* 91, 251-259.
- Griffiths B.S. (1994).** Microbial-feeding nematodes and protozoa in soil: their effects on microbial activity and nitrogen mineralisation in decomposition hotspots and the rhizosphere. *Plant and Soil* 164, 25-33.
- Hamel C., Hanson K., Selles F., Cruz A.F., Lemke R., McConkey B. and Zentner R. (2006a).** "Seasonal and long-term resource-related variations in soil microbial communities in wheat-based rotations of the Canadian prairie." *Soil Biology & Biochemistry* 38: 2104-2116.
- Hardie K. & Leyton L. (1981).** The influence of VA mycorrhiza on growth and water relations of red clover. 1. In phosphate deficient soil. *New Phytologist* 89,599-608.
- Hassink J., Bouvman L.A., Zwart K.B & Brussaard L. (1993).** Relationships between habitable pore space, soil biota and mineralization rates in grasslands soils. *Soil Biol Biochem.* 25: 47-55.
- Hassink I., Neutel A.M. & De Ruiter P.C. (1994).** C and N mineralisation in sandy and loamy grassland soils: the role of microbes and microfauna. *Soil biology and biochemistry* 26,1565-1571.
- Hawksworth D.L. & Mound. (1991).** Biodiversity databases: the crucial significance of collections. In Hawksworth D. L. (ed.) *The biodiversity of microorganisms and invertebrates: its role in sustainable agriculture.* CAB International. Wallington, UK. 17-29.
- Henriksen T.M., Breland T.A. (1999a).** Evaluation of criteria for describing crop residue degradability in a model of carbon and nitrogen turnover in soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 31:1135-1149.

- Henriksen T.M., Breland T.A. (1999b).** Nitrogen availability effects on carbon mineralization, fungal and bacterial growth, and enzyme activities during decomposition of wheat straw in soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 31: 1121-1134.
- Herrisse J.M. (2004).** Biologie du sol, les microorganismes au service de la santé des plantes. *Green magazine n°08*.
- Hill G.T., Mitkowski N.A., Aldrich-Wolfe L., Emele L.R., Jurkonie D.D., Ficke A., Maldonado-Ramirez S., Lynch S.T., Nelson E.B., (2000).** - Methods for assessing the composition and diversity of soil microbial communities. *Applied Soil Ecology*, 15, 25-36.
- Hill Laboratories. (2014).** *Soil tests and interpretation*. <http://www.hill-laboratories.com/file/filied/15530>
- Houlden A., Timms-Wilson T.M., Day M.J., and Bailey M.J. (2008).** "Influence of plant developmental stage on microbial community structure and activity in the rhizosphere of three field crops." *FEMS Microbiology Ecology*. 65: 193-201.
- Hooper D.U., Chapin F.S., et al. (2005).** « Effects of biodiversity on ecosystem functioning : A consensus of current knowledge. » *Ecological Monographs* 75(1) :3-35.
- Huss-Dannel, K. (1997).** Actinorhizal symbioses and their N₂ fixation. *New Phytologist* 136,375405.
- Janssen P.H. (2006).** Identifying the dominant soil bacterial taxa in libraries of 16S rRNA and 16S rRNA genes. *Appl Environ Microbiol*. 72: 1719-1728.
- Job JO., 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.
- Johnson J.M.F., Franzluebbbers A. J., et al. (2007).** « Agricultural opportunities to mitigate greenhouse gaz emissions. » *Environmental Pollution* 150(1) : 107-124.
- Jones C.G., Lawton J.H. & Shachak M. (1994).** Organisms as ecosystem engineers. *Oikos* 69, 373-386.

- Katayangi N. & Hatano R. (2012).** Soil Science and Plant Nutrition. *Soil Science and Plant Nutrition*, vol. 58, n° 2, p. 261-271.
- Kätterer T., Reichstein M., Andrés O., Lomander A. (1998).** Temperature dependence of organic matter decomposition: a critical review using literature data analyzed with different models. *Biology and Fertility of Soils*, 27: 258–262.
- Khan F. A. and Ansari A.A. (2005).** « Eutrophication : An ecological vision. » *Botanical Review* 71(4) : 449-482.
- Kieser T., Bibb M.J, Dutnner M.J., Chater K.F. & Hopwood D.A. (2000).** General introduction to actinomycete biologie in practical Streptomyces genetics. The John Innes Foundation, *Crowes, Norwich, England*. 1-21.
- Kim D.G., Vargas R., Bond-Lamberty B. & Turetsky M.R. (2012).** Effects of soil rewetting and thawing on soil gas fluxes: a review of current literature and suggestions for future research. *Biogeosciences*, vol. 9, 2459-2482.
- Klein D.A., Frederick A., Biondini M. & Trlica M.J. (1988).** Rhizosphere microorganism effects on soluble amino acids , sugars and organic acids in the root zone of *Agropyron cristatum*, *A. smithii* and *Bouteloua gracilis*. *Plant Soil* 110, 19-25.
- Knorr M., Frey S.D., Curtis P.S. (2005).** Nitrogen additions and litter decomposition: a metaanalysis. *Ecology*, 86: 3252-3257.
- Kreger -Van Rij N.J. (1984).** The yeast, a Taxonomic Study, *Elsevier Biomedical*.
- Lauber C.L., Strickland M.S, Bradford M.A., Fierer N. (2008).** The influence of soil properties on the structure of bacterial and fungal communities across land-use types *Soil Biology & Biochemistry* 40, 2407–2415.
- Kono T. (1968).** Kinetics of microbial cell growth. *Biotech. Bioeng.* 10, 105-131.
- Lauber C.L., Hamady M., Knight R. & Fierer N. (2009).** Soil pH as a predicator of soil bacterial community structure at the continental scale: a pyrosequencing-based assessment. *Appl Environ Microbiol*.
- Lavelle P. & Spain A.V. (2001).** Soil Ecology. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, *The Netherlands*. 654.
- Lens P.N.L., Kuenen J.G. (2001).** The biological sulfur cycle: Novel opportunities for environmental biotechnology. *Water Sci Technology* 44:57-66.

- Leung K.T., Errampalli D., Cassidy M., Lee H., Hall B., Trevors J.T., Okamura H. & Bach H.J. (1997).** A case study of bioremediation of polluted soil: biodegradation and toxicity of chlorophenols in soil. In: Van Eisas J. D, Trevors J. T & Wellington E. M. H. (eds) *Modern soil microbiology*. Marcel Dekker, INC. New York. 577-605
- Lundquist E., Jackson L.E., Scow K., Hsu C. (1999).** Changes in microbial biomass and community composition, and soil carbon and nitrogen pools after incorporation of rye into three California agricultural soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 31:221-236.
- Magnan J. (2006).** Épandage post-récolte des engrais organiques et risques environnementaux reliés aux pertes d'azote. In QAQ, Agroenvironnement. http://www.oaq.qc.ca/getmedia/e9943bc8-5621-4399-9612-b36ec2050554/2006_05_24_revenue_litterature.aspx (page consulté le 4 octobre 2013).
- Maier R.M., Pepper I.L. & Gerba C.P. (2000).** Environmental microbiology, Microorganisms in surface soils. In. Academic press. A Harcourt science and technology company. Canada. 79-82.
- Martiny J.B., Bohannan B.J., Brown J.H., et al. (2006).** Microbial biogeography: putting microorganisms on the map. *Nat Rev Microbiol.* 4: 102-112.
- Mary B., Recous S., Darwis D., Robin D. (1996).** Interactions between decomposition of plant residues and nitrogen cycling in soil. *Plant and Soil*, 181: 71-82.
- McGill W.B. (1996).** In Evaluation of Soil Organic Matter Models, eds Powlson, D.S., Smith, P., J.U. (Springer, Rothamsted), 111-132.
- Membre J. M., Ross T., McMeekin T. (1999).** Behavior of *Listeria monocytogenes* under combined chilling processes. *Lett. Appl. Microbiol.* 28, 216-220.
- Mincer T.L., Jensen P.R., Kauffman C.A. & Fenical W. (2002).** Widespread and persistent populations of a major new marine actinomycete taxon in ocean sediments. *App. Environ. Microbiol.* 68: 5005-5011.
- Monod J. (1941),** «Croissance des populations bactériennes en fonction de la concentration de l'aliment hydrocarboné », *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 212, 771-773.

- Moore J.C. & De Ruiter K.H. (1991).** Temporal and spatial heterogeneity of trophic interactions within below-ground food-web. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 34,371-391.
- Muller A.K., Westergaard K., Christensen S. & Sorensen S.J. (2002).** The diversity and function of soil microbial communities exposed to different disturbances. *Microb Ecol.* 44: 49-58.
- Müller C., Martin, Strevens R.J., Laughin R.J., Kammann C., Ottow J.C.G & Jager H.J. (2002).** Processes leading to N₂O emissions in grassland soil during freezing and thawing. *Soil Biology and Biochemistry.* Vol. 34, n° 9, 1325-1331.
- Murty D., Kirschbaum M.F.U., McMurtrie R.E & McGilvray A. (2002).** Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? *Global Change Biology.* 8: 105-123.
- Nannipieri P., Johnson R.L. & Paul E.A. (1978).** Criteria for measurement of microbial growth and activity in soil. *Soil Biology and Biochemistry* 10,223-229.
- Nicholas W.L. (1975).** *The biology of free-living nematodes*: Clarendon Press - Oxford.
- Nicolardot B., Bouziri L., Bastian F., Ranjard L. (2007).** A microcosm experiment to evaluate the influence of location and quality of plant residues on residue decomposition and genetic structure of soil microbial communities. *Soil Biology & Biochemistry*, 39: 1631-1644.
- Noguez A.M., Arita H.T., Escalante A.E., Forney L.J., Garcia-Oliva F. & Souza V. (2005).** Microbial macroecology: highly structured prokaryotic soil assemblages in a tropical deciduous forest. *Global Ecol. Biogeogr.* 14: 241-248.
- Normand P., Navaro I. & Domenach A.M. (2000).** La symbiose fixatrice d'azote Frankioplantes actinorhiziennes. *Bulletin de la Société Française de Microbiologie* 15,241-244.
- Nunan N., Ritz K., Crabb D., Harris K., Wu K.J., Crawford J.W. & Young I.M. (2001).** Quantification of the in situ distribution of soil bacteria by large scale imaging of thin sections of undisturbed soil. *FEMS Microbiol Ecol.* 37: 67-77.
- Nunan N., Daniell T.J, Singh B.K., Papert A., McNicol J.W & Prosser J.I. (2005).** Links between plant and rhizoplane bacterial communities in grassland soils, characterized using molecular techniques. *Appl Environ Microbiol.* 71: 6784-6792.

- Nusslein K. & Tiedje J.M. (1999).** Soil bacterial community shift correlated with change from forest to pasture vegetation in a tropical soil. *Appl Environ Microbiol.* 65: 3622-3626.
- Oades J.M. (1984).** Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant Soil.* 76: 319-337.
- Oades J.M. (1993).** The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma* 56, 377-400.
- Olivier J., Deslandes L., Theulieres F., Hirsh J., Feng D.X., et al. (2002).** Resistance to *Ralstonia solanacearum* in *Arabidopsis thaliana* is conferred by the recessive RRSI-R gene, a member of a novel family of resistance genes. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 99, 2404-2409.
- Pace N.R., Stahl D.A., Laune D.J. & Olsen G.J. (1985).** The analysis of natural microbial populations by ribosomal RNA sequences. *Advance in Microbial Ecology.* 9, 1-55.
- Olsson S. & Alstrom S. (2000).** Characterisation of bacteria in soils under barley monoculture and crop rotation. *Soil Biology & Biochemistry* 32,1443-1451.
- Parent M.E. & Velegol D. (2004).** E. coli adhesion to silica in the presence of humic acid. *Colloids Surf B Biointerfaces.* 39: 45-51.
- Parnas D. L. (1976).** The Development of Program. *IEEE Transactions on Software Engineering* SE-2, 1-9.
- Poll C., Brune T., Begerow D., Kandeler E. (2010).** Small-scale diversity and succession of fungi in the detritosphere of rye residues. *Microbial Ecology*, 59: 130-140.
- Pelster D.E., Chantigny M.H., Rochette P., Angers D.A., Laganière J., Zebarth B. et Goyer C. (2013).** Crop residue incorporation alters soil nitrous oxide emissions during freeze-thaw cycles. *Canadien Journal of Soil Science*, vol. 93, n° 4, 415-425.
- Phaff H.J. & Starmer W.T. (1987).** Yeast associated with Plants, Insects and Soil *In* : Rose A.H., Harrison J.S. (eds), *The yeast, V1, Biology of yeast.* 2nd edition Academic Press. London : 123- 174.
- Phillipot L., Renault P., Sierra J., Henault C., Clays-Josserand A., Chenu C., Chaussod R., Lensi R. (1996).** Dissimilatory nitrite-reductase provides a competitive

- advantage to *Pseudomonas* sp. RTC01 to colonise the centre of soil aggregates. *FEMS Microbiol Ecol.* 21: 175-185.
- Pochon J. et Tardieux P. (1962).** Techniques d'analyse en microbiologie du sol. Saint Mandé: *Edition de la tourtourelle*.
- Pousset J. (2002).** Guide engrais vert et fertilité des sols (2ème édition). Agrdécision, Groupe France Agricole (GFA).
- Rajendhran J. & Gunasekaran P. (2008).** Strategies for accessing soil metagenome for desired applications. *Biotechnol Adv.* 26: 576-590.
- Ranjard L, Richaume A. (2001).** Quantitative and qualitative microscale distribution of bacteria in soil. *Research in Microbiology*, 152: 707-716.
- Ranjard L., Dequiedt S., Jolivet C., Saby N.P.A., Thioulouse J., Harmand J., Loisel P., Rapaport A., Fall S., Simonet P., Joffre R., Chemidlin-Prévost Bouré N., Maron P-A., Mougel C., Martin M.P., Toutain B., Arrouays D., Lemanceau P. (2010).** Biogeography of soil microbial communities: a review and a description of the ongoing French national initiative. *Agronomy for Sustainable Environment*, 30: 359-365.
- Ramette A. & Tiedje J.M. (2007).** Biogeography: an emerging cornerstone for understanding prokaryotic diversity, ecology, and evolution. *Microb Ecol.* 53: 197-207.
- Recous S, Robin D, Darwis D, Mary B. (1995).** Soil inorganic N availability: effect on maize. *Soil Biology & Biochemistry*, 27: 1529-1538.
- Rengel Z. (2002).** Role of pH in availability of ions in soil. In: RengelnZ (ed) Handbook of plant growth. pH as a master variable in plant growth. *Marcel Dekker*, New York, 323-350.
- Rennenberg H., Dannenmann M., Gessler A., Kreuzwieser J., Simon J., Papen H. (2009).** Nitrogen balance in forest soils: nutritional limitation of plants under climate change stresses. *Plant Biology*, 11, 4-23.
- Richard G, Roger-Estrade J. (2009).** Le Sol. Dossier INRA. *Editions Quae*, 183.
- Risk N., Snider D. & wangner-Riddle C. (2013).** Mechanisms leading to enhanced soil nitrous oxide fluxes induced by freeze-thaw cycles. *Canadien Journal of Soil Science*, vol. 93, n° 4, 401-414.

- Ritz K., McNicol W., Nunan N., Grayston S., Millard P., Atkinson D., Gollotte A., Habeshaw D., Boag B., Clegg C.D., Griffiths B.S., Weatley R.E., Glover L.A., McCaig A.E. & Prosser J.I. (2004). Spatial structure in soil chemical and microbiological properties in an upland grassland. *FEMS Microbiol Ecol.* 49: 191-205.
- Robert M., Chenu C. (1992). Interactions between soil minerals and microorganisms, in Stotzky G., Bollag J.M. (Eds) *Soil Biochemistry* 307-404.
- Robinson R.A. & Sutherland W.J. (2002). Post-war changes in arable farming and biodiversity in Great Britain. *Journal of Applied Ecology*: 39,157-176.
- Roger P. et Garcia J.L. (2001). Introduction à la microbiologie du sol. Marseille : Université de Provence.
- Rosen, Carl J., Peter M., Bierman. Roger D., Eliason. (2008). Soil pH modification. Department of Soil, Water and Climate. *University of Minnesota*.
- Rosso L. (1995). Modélisation et Microbiologie Prévisionnelle. Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard - Lyon I, n° 95-197.
- Rouiller J., Souchier B., Bruckert S., Feller C., Toutain F. & Védry J.C. (1994). Méthodes d'analyses des sols.. In : M. Bonneau et B. Souchier, eds. *Pédologie*. 2. Constituants et propriétés du sol. Masson, Paris, France.619-652.
- Rousk, Johannes, Erland, Baath, Philip C., Brookes, Christian L., Lauber *et al.* (2010). Soil Bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil. *The ISME Journal*. 1-12.
- Rui J., Peng J., Lu Y. (2009). Succession of Bacterial Populations during Plant Residue Decomposition in Rice Field Soil. *Applied and Environmental Microbiology*, 75: 4879-4886.
- Rykiel E.J. (1985). Towards a definition of ecological disturbance. *Aus J Ecol.* 10: 361-365.
- Saadoun I. & Gharaibeh. (2003). The *Streptomyces flora* of Badia region of Jordan and its potential as a source of antibiotics active against antibiotic-resistant bacteria. *J. Arid Environ.*53: 365-371.
- Sala O.E., Chapin F.S., 3rd, Armesto J.J., *et al.* (2000). Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*. 287: 1770-1774.

- Schloter M., Dilly O. & Munch J.C. (2003).** "Indicators for evaluating soil quality." *Agriculture Ecosystems & Environment* 98: 255-262.
- Schimel D.S. (1995).** Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology*, 1, 77-91.
- Singh B. & Pandey R. (2003).** "Differences in root exudation among phosphorusstarved genotypes of maize and green gram and its relationship with phosphorus uptake " *Journal of Plant Nutrition* 26: 2391-2401.
- Singh B.K., Millard P., Whiteley A.S. & Murrell J.C. (2004).** Unravelling rhizosphere-microbial interactions: opportunities and limitations. *Trends Microbiol.* 12: 386-393.
- Singh B.K., Nazarie L., Munro S., Anderson I. & Campbell C.D. (2006).** Use of multiplexterminal restriction fragment lenght polymorphism for rapid and simultaneous analysis of different components of the soil microbial community. *Appl Environ Microbiol.* 72: 7278-7285.
- Singh B.K., Munro S., Potts J. & Millard P. (2007).** Influence of grass species and soil type on rhizosphere microbial community structure in grassland soils. *Appl. Soil Ecol.* 36: 147-155.
- Singh B.K., Elvitigala T., Bhattacharyya-Pakrasi M., Aurora R., Ghosh B., Pakrasi H.B. (2008).** Integration of carbon and nitrogen metabolism with energy production is crucial to light acclimation in the cyanobacterium *Synechocystis*. *Plant Physiol* 148: 467-478
- Singh B.K, Dawson L.A, McDonald C.A & Buckland S.M. (2009).** Impact of biotic and abiotic interaction on soil microbial communities and functions: A field study. *App. Soil Ecol.* 41: 239-248.
- Six J, Elliot E.T. & Paustian K. (1999).** Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. . *Soil Sci Soc Am J.* 63: 1350-1358.
- Smith M., et al., (1979).** Sequence of the gene for iso-1-cytochrome c in *Saccharomyces cerevisiae*. *Cell* 16(4):753-61.
- Smith S. E. & Read D.J. (1997).** *Mycorrhizal symbiosis*, Academic Press edn. San Diego.

- Spedding T.A., Hamel C., Mehuy G.R., Madramootoo C.A. (2004).** Soil microbial dynamics in maize-growing soil under different tillage and residue management systems. *Soil Biology & Biochemistry*, 36: 499-512.
- Steenwerth KL., 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.
- Stending D. & Killham K. (2007).** The soil environment. In: J.D Van Elsas, J.K Jarsson and J.T Trevors (eds). *Modern Soil Microbiology*. 2nd edn CRC Press. Boca Raton. FL. 1-22.
- Stroosnijder L. (1992).** Desertification in Sahelian Africa. *Courrier* 133, 36–39. ECC. Bruxelles, Belgium.
- Ambouta JMK., Valentin C., Laverdiere MR. (1996). Jachère et croûte d' érosion au Sahel. *Sécheresse* 7, 269–275
- Stroosnijder L. 1992.** Desertification in Sahelian Africa. ECC. Bruxelles, Belgium. *Courrier* 133, 36–39.
- Stolp H. (1988).** Organisms, habitats, activities: *Microbial Ecology*: Cambridge University Press. New York. 308 .
- Sorensen I. (1997).** The rhizosphere as a habitat for soil microorganisms. In: Van Elsas J.D, Trevors I.T. & Wellington E. M. H. (eds) *Modern soilmicrobiology*. Marcel Dekker, INC. New York. 21-45.
- Swift M.J., Heal O.W. & Anderson J.M. (1979).** Decomposition in terrestrial Ecosystems. Oxford: *Blackwell Scientific*.
- Swift M.J., Andréon O., Brussaard L., Briones M., Couteaux M.M., Ekschmitt K., Kjoller A., Loiseau P., Smith S. (1998).** Global change, soil biodiversity, and nitrogen cycling in terrestrial ecosystems: three case studies. *Global Change Biology*, 4: 729-743.
- Tarafdar J.C. & Marschner. (1995).** Dual inoculation with *Aspergillus fumigatus* and *Glomus mosseae* enhances biomass production and nutrient uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) supplied with organic phosphorus as Na-phytate. *Plant and Soil* 173,97-102.
- Tarlera S., Jangid K., Ivester A.H., Whitman W.B. & Williams M.A. (2008).** Microbial community succession and bacterial diversity in soils during 77,000 years of ecosystem development. *FEMS Microbiol Ecol*. 64: 129-140.

Tate R.L. (1995). *Soil microbiology*. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey. USA. 398.

Thomashow L.S., Weiler D.M., Bonsall R.F. & Pierson, L.S. (1990). Production of the antibiotic phenazine-1-carboxylic acid by fluorescent *Pseudomonas* species in the rhizosphere of wheat. *Applied and Environmental Microbiology* 56, 908-912.

Thorn G. (1997). The fungi in soil. In: Van Elsas J. D, Trevors J. T. & Wellington E. M. H. (eds) *Modern soil microbiology*. Marcel Dekker, INC. New York. 63-127.

Tilman D. (1999). « Global environmental impacts of agricultural expansion : The need for sustainable and efficient practices. » Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 96(11) : 5995-6000.

Tisdall J.M. & Oades J.M. (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J Soil Sci.* 33: 141-163

Trevors J.T. & Van Elsas J.D. (1997). Microbial Interactions in soil. In: Van Elsas J. D, Trevors J. T. & Wellington E. M. H. (eds) *Modern soil microbiology*. Marcel Dekker, INC. New York. 215-243.

Torsvik V., Salte K., Sorheim R. & Goksoyr J. (1990). Comparison of phenotypic diversity and DNA heterogeneity in a population of soil bacteria. *Appl Environ Microbiol.* 56: 776-781.

Torsvik V., Øvreås L. (2002). Microbial diversity and function in soil: from genes to ecosystems. *Current Opinion in Microbiology*, 5: 240-245.

Toop E., Vallaeys T. & Soula, G. (1997). Pesticides: Microbial degradation and effects on microorganisms. In: Van Elsas J. D, Trevors J. T. & Wellington E. M. H. (eds) *Modern soil microbiology*. Marcel Dekker, INC. New York. 547-575.

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>.

Van Elsas J.D. & Garbeva P. (2002). "Effects of agronomical measures on the microbial diversity of soils as related to the suppression of soil-borne plant pathogens." *Biodegradation* 13: 29-40.

- Van Uden N. & Fell J.W. (1968).** In « Advances in Microbiology » M.R. Droop & E.J.F Woods, eds. *Academic Press, London & New York*. Vol. I, 167-201.
- Van Veen G. & de Deer R.J. (1977).** *Phys.Chem.Solis*. 38,217.
- Van Gerwen S.J.C & Zweitering M.H. (1998).** Growth and inactivation models to be used in quantitative risk assessments, *J Food Prot*, 61, 1541-1549.
- Vasant G., Krichnamurthy V.N., Sudha G., Manik D. & Paranjape K. (2009).** The fertilizer encyclopedia. *New Jersey : John Wiley and Sons edition*.
- Verhulst P.F. (1838).** Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement. *Corr. Math. et Phys.* Publ. par A. Quetelet. T X, 113-121.
- Verville J.H., Hobbie S.E., Chapin F.S. & Hooper D.U. (1998).** Response of tundra Ch₄ and Co₂ flux to manipulation of temperature and vegetation. *Biogeochemistry*. 41: 215-235.
- Vitousek P.M., Mooney H. A., et al . (1997).** « Human domination of Earth's ecosystems. » *Science* 277(5325) :494-499.
- Walligora C. (2010).** Racines et sol : un monde de communications et d'équilibres. *Techniques culturelles simplifiées, n°57*.
- Weis R.M., Ollis D.F. (1980).** *Biotech. Bioeng.* 22, 246-250.
- Wertz A.E., Karen W. (2013).** Thyme to touch: Infants possess strategies that protect them from dangers posed by plants. *Cognition*. 130, 44-49
- White R.E. (2006).** Principles and practice of soil science. The soil as a natural resource. . *Fourth edn: Blackwell Publishing*.
- White P.M., Rice C.W. (2009).** Tillage effects on microbial and carbon dynamics during plant residue decomposition. *Science Society of America Journal*, 73: 138-145.
- Whiting, David, Andrian, Card & Cal, Wilson. (2011).** *Soil pH*. Colorado State University Extension.
- Whiting R.C., Cygnarowicz-Provost M. (1992).** A quantitative model for bacterial growth and decline. *Food Microbiol.* 9, 269-277.

Williams S.T. & Wellington E. (1982). Actinomycetes. *In* Methodes of soil analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties. Agronomy monograph n° :9 (*Second Edition*). Ed., A. L., ASA-SSSA. Madison.969-987.

Williamson Joey. (2012). *Changing the pH of Your Soil*. HGIC Horticulture Extension Agent, Clemson University.

Zamora M.C. & Zaritzky N.E. (1985). Modeling of Microbial Growth. *Journal of Food Science*. Issue 4, 1003–1006.

Zhou J, Xia B, Treves DS, et al. (2002). Spatial and resource factors influencing high microbial diversity in soil. *Appl Environ Microbiol*. 68: 326-334.

Zweitering M. H., Jondenburger I., Rombouts F. M., & Van 't R.K. (1990). Modeling of the Bacterial Growth Curve. *Applied and Environmental Microbiology*, 1875-1881

Annexes

Annexes

1. La traduction française de la légende anglaise de la figure 9 :

Fungi : les champignons.

Bacteria/ Actinomycees : les bactéries/ les actinomycètes.

Nitrogen : Azote.

Phosphorus : Phosphore.

Potassium : Potassium.

Sulfur : Soufre.

Iron/ Manganese/ Zinc/ Copper : Fer/ Manganèse/ Zinc/ Cuivre.

Molybdenum : Molybdène.

Boron : Bore.

2. La traduction française de la légende anglaise de la figure 10 :

Acidity : L'acidité.

Neutrality : La neutrality.

Alkalinity : L'alcalinité.

Extreme : Extrême.

Very strong : Très fort.

Strong : Fort.

Medium : moyen.

Slight : Mince.

Neutral : Neutre.

Mild : Doux.

Moderate : Modéré.

Extreme pH for acid peat and acid-sulfate soils : pH extrême de la tourbe et de l'acide-sulfate des sols.

Range in pH common for humid region minerals soils : Gamme de pH commun pour les régions humides des sols minéraux.

Range in pH common for acid region minerals soils : Gamme de pH commun pour les régions acides des sols minéraux.

Attained only by alkali mineral soils : Atteint seulement par les sols minéraux alcalins.

Extreme range in pH for most mineral soils : Gamme extrême de pH pour la plupart des sols minéraux.

3. La traduction française de la légende anglaise de la figure 11 :

Soil reaction : La réaction du sol.

Plant growth : La croissance des plantes.

alkaline soil : Sol alcalin.

Neutral soil : Sol neutre.

acide soil : Sol acide.

Too alkaline for most plants : Trop alcalin pour la plupart des plantes.

Iron availability becomes a problem on alkaline soils : La disponibilité du fer devient un problème sur les sols alcalins.

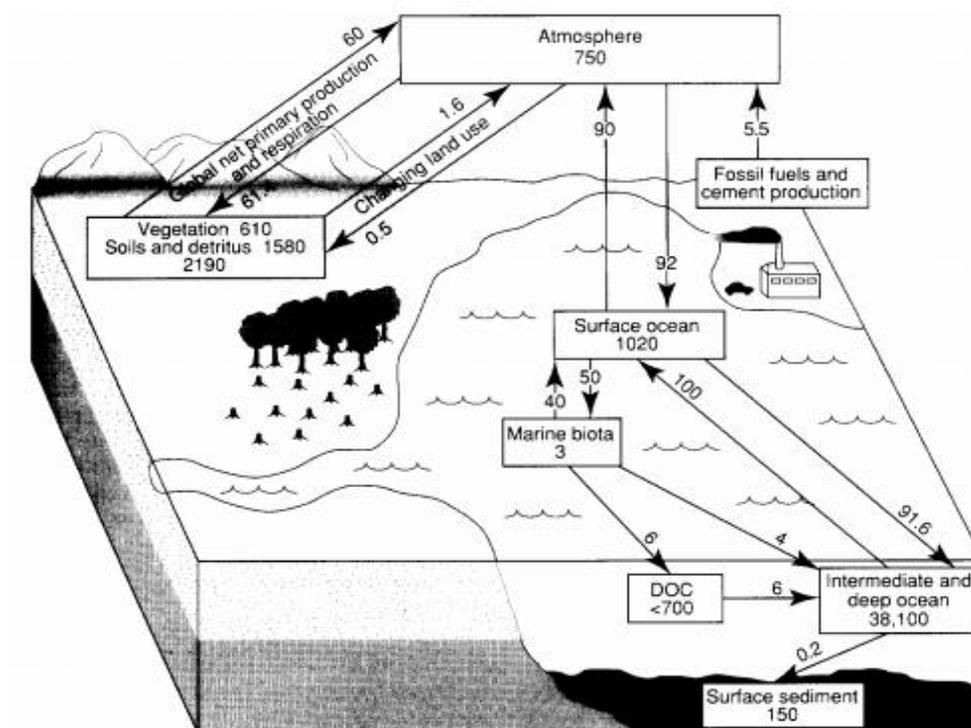
Near neutral : Proche de la neutralité.

Acceptable for most plants : Acceptable pour la plupart des plantes

Reduced soil microbial activity : L'activité microbienne du sol réduite.

Too acid for most plants : Trop acide pour la plupart des plantes.

Cycle de carbone :



Le cycle global du carbone (extrait de Schimel *et al.*, 1995).

Cycle de l'azote :

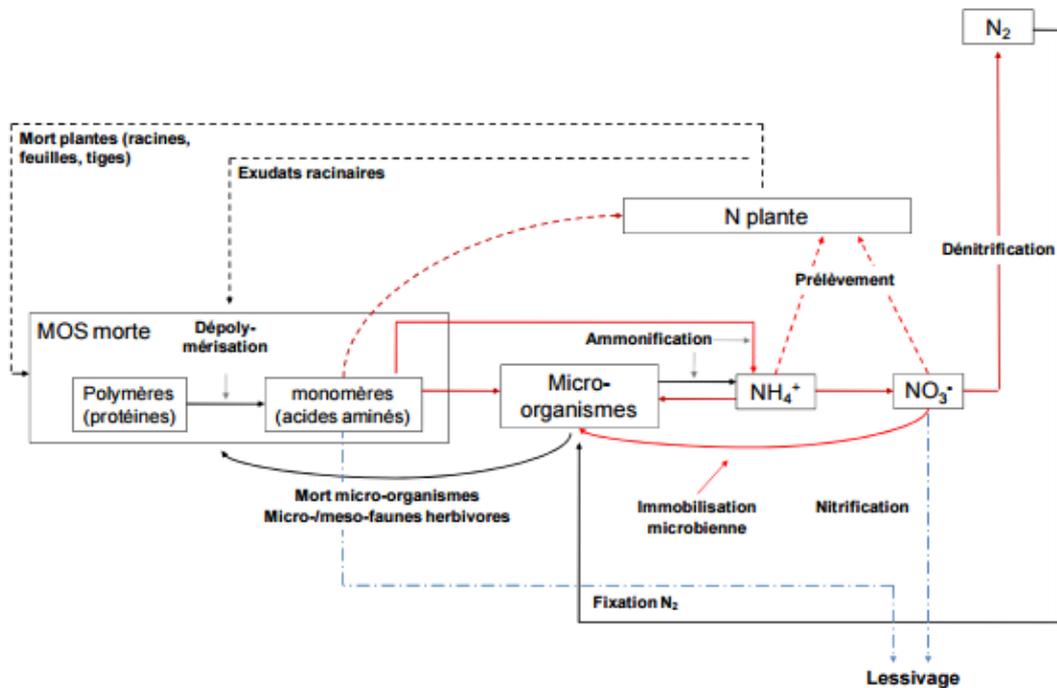
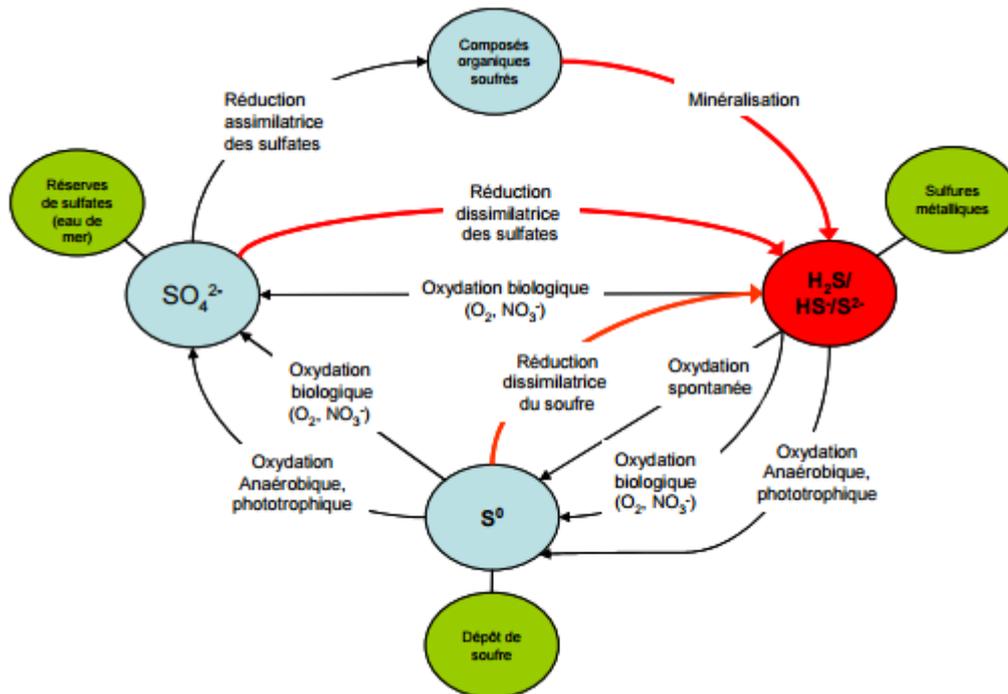


Schéma des processus majeurs du cycle de l'azote au sein de l'écosystème, incluant les voies de rétention interne: les processus pilotés par les plantes (flèches en pointillés), par les microorganismes (flèches pleines), les processus compétitifs entre plantes et micro-organismes (flèches rouges), et les transferts hydrologiques (flèches bleues). MOS : matière organique du sol (d'après Rennenberg *et al.*, 2009).

Cycle de soufre :



Le cycle du soufre et les voies de production de l'hydrogène sulfuré (Lens *et al.*, 2001 d'après Robertson *et al.*, 1992).

Publication scientifique

Evaluation and Modeling of Microbial Population Dynamics of Degraded Sandy Quarry for Their Rehabilitation and Revegetation

Hassiba Delal¹, Hassini Tsaki², Meriem Amina Bekki¹ & Abdelkader Bekki¹

¹ Laboratoire de Biotechnologie des Rhizobiums et Amélioration des Plantes, Department of Biotechnology, Faculty of Natural Sciences, University of Oran, Algeria

² Laboratoire d'Eco-pédologie, Department of Biology, Faculty of Science, University of Oran, Algeria

Correspondence: Hassiba Delal, Laboratoire de Biotechnologie des Rhizobiums et Amélioration des Plantes, Department of Biotechnology, Faculty of Natural Sciences, University of Oran, BP1524, EL Menaour, Oran, Algeria. Tel: 213-540-284-007. E-mail: dl-hassiba@hotmail.fr

Received: March 24, 2014 Accepted: May 21, 2014 Online Published: July 15, 2014

doi:10.5539/jas.v6n8p149

URL: <http://dx.doi.org/10.5539/jas.v6n8p149>

Abstract

Our study was conducted in the sandy quarry of Terga located at the mouth of Wadi EL Malah in the wilaya of Ain Témouchent (northwest coast of Algeria). This region has a major problem of soil degradation which often leads to the abandonment of large farmland areas and a form of progressive desertification of the environment.

To rehabilitate soils and landscapes degraded of this area, our research is proposed to identify and study the activity of microbial population by comparing the results to the soil environment characterization and found that the soil is very poor of nutrients, organic matter (less than 1%) in the presence of an alkaline (pH greater than 9). These adverse conditions hinder the development of microbial flora essential for growth and plant nutrition soil.

Keywords: soil, microbial population, rehabilitation, sandy quarry

1. Introduction

The soil is the interface between the lithosphere, atmosphere and hydrosphere (Alexander, 1977) and serves to support for a part of the biosphere (Gobat, 2003). It consists five major components : mineral fraction, organic matter, water, air, and living organisms (Alexander, 1977). Among them, microorganisms such as bacteria, fungi, protozoa and nematodes are a major part of the population and making their diversity crucial for the maintenance of soil health. They have an important role in the soil structure.

Microbial activity is regulated by various species and plant growth stages as well as the conditions related to soil health (Girvan et al., 2004; Schloter et al., 2003; Van Elsas & Garbeva, 2002). It is quite legitimate especially in organic farming, search to use biological measurements to understand the soil and manage them in an agronomic perspective. Some soils can be improved, others have low capacity improvement, others victims of irreversible processes are permanently weakened, such as soil Terga (Wilaya of Ain Témouchent in western Algeria) exposed to a possible exploitations.

Stabilization of this region depends on maintaining balance of his fragile ecosystem. However, in Alegria, the majority of littoral quarries increased destabilization due to the degradation of their sensitive vegetation trampling.

Degradation of soil is a major problem in agriculture and often leads to the abandonment of large farmland areas and a form of progressive desertification of the environment (Stroosnijder, 1992). Terga quarry is subject to degradation processes very extensive. This degradation results in a decrease biological activity of soil, which is maintained by the addition of organic matter and the presence of various living beings (animals, microorganisms, plant roots, etc.).

The biological activity remains an essential component of soil fertility. It intervenes in the case on the stock of assimilable mineral elements obtained by mineralization of the organic matter and soil structure.

To restore vegetation quarry of Terga, soil microbiological analysis are needed. They allow us to understand the distribution of microbial flora, after, and integrate computer and mathematical modeling for simulating the chemical elements dynamics in the soil precisely soil quarries and simplify biotic processes.

The aim of this work is to assess the microbial population dynamics during the development cycle and degradation to improve biological functions and functioning of the soil structure, for the rehabilitation and restoration by natural biological pathways gradients of degraded sites.

2. Materials and Methods

2.1 Study Area

Our study was performed on sandy quarry of Terga which is located at the mouth of Wadi El Malah about 7 Km from the small village of Terga (eg Turgot) located in the wilaya of Ain Temouchent.

The common of Terga which extends over an area of 65.07 km² (average bullet being at north latitude 35°25'07" North and Longitude West of 1°10'39" West). It extends over an area of 120 ha average altitude of this vast Neogene terrace, gently sloping towards the sea, between 400 m and 200 m (Figure 1).

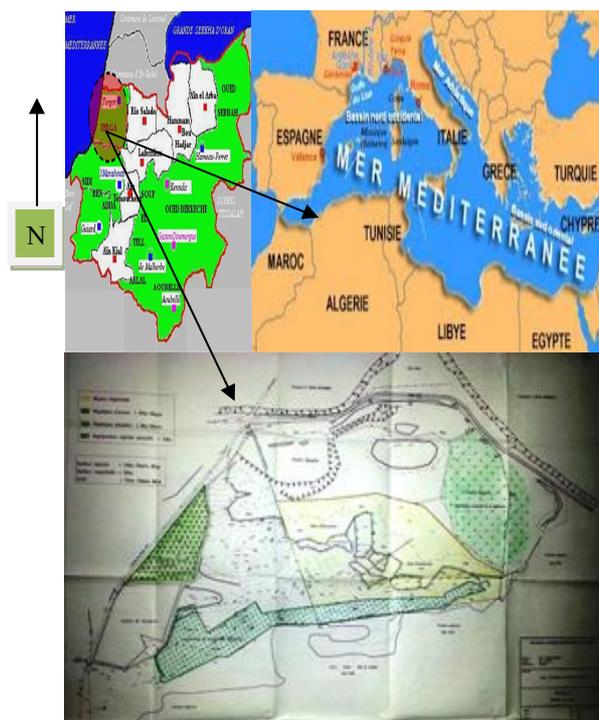


Figure 1. Map location of the field study of Terga (northwest Algeria), scale 1/2000

2.2 Soil Sampling

A series of samples was carried in the region of Terga and at different sites and seasons (2011/2012). The samples consist by a set of samples (composite) taken to an average depth of 10 cm at the rhizosphere. The analysis are carried in January for the winter and during the month of June for the summer and during the month of April for the spring and in November for the autumn season. Three sampling areas were defined:

Bare soil, the native forest and soil replanted by man.

Bare soil samples were taken and were combined into a single composite.

In the native forest soil samples were taken from the rhizosphere of three different legumes plants, *Lotus creticus*, *Ononis natrix*, *Retama monosperma*.

To each plant a composite was performed, in total three samples are taken in this zone.

In the last zone (soil replanted by man) over three plants, we can found *Acacia saligna*, and for each plant we collected 4 composite. For the three areas, the number of samples is eight samples.

2.3 Physico-Chemical Analysis of the Soil

2.3.1 Physical Analysis

- The texture was determined as described by Rouiller et al. (1994).

- The pH was measured as described by Callot-Dupuis (1980).

2.3.2 Chemical Analysis

- The electrical conductivity (EC) was measured as described by Aubert (1978).
- The total calcium was determined as described by Callot-Dupuis (1980).
- The active limestone was determined as described by Drouineau (1942).
- The Total carbon and organic matter (OM) was determined as described by Anne (1945) method.

2.4 Serial Dillutions for the Microbial Enumeration

Serial dilution of soil was used to estimate the overall concentration of soil microorganisms (Rapilly, 1968).

Each sample was weighted and then ground in a mortar and diluted in a volume of solution (10 ml/1g of soil). This suspension is homogenized on a magnetic agitator at maximum speed for 5 minutes and was defined as stock solution, 1 ml of each dilution or stock solution was spread on a nutrient medium (spreading mass) distributed at 30 ml per Petri dish.

The estimate of soil flora density was done by counting colonies growing on the surface of the culture medium after two days of incubation at 28 °C. Reading was performed for 2 or 3 dilutions to retain only the dilution that gives a number of colonies between 30 and 300 per Petri dish 10cm in diameter. For all of these analyzes, and to estimate statistically the validity of the result, we used each time, 3 repetitions of 3 Petri dishes each. Three replicates were performed.

2.5 Statistical Analysis of Data

To compare the microbial population number and physicochemical analysis for the four seasons, analysis of variance (ANOVA), test correlation and factor analysis were performed using XLSTAT (Addinsoft XLSTAT version 2007.6).

3. Results and Discussions

3.1 Physico-Chemical Analysis

The physico-chemical data (Table 1) show that the three soils have not significant difference between them. They are all sandy structure characterized by pH alkaline (8.81 to 9.09) and very low conductivity for all sites (0.3 to 0.5 ms/cm²).

Organic matter is very low and does not exceed 1% for the same carbon, we deduce that the sandy quarry of Terga is mineral soil where organic matter is low and the pH is alkaline.

Table 1. Results of physico-chemical analysis of Terga soil

Samples of soil	EC (ms/cm)	pH	Total calcium (%)	Active Limestone (%)	Carbon (%)	Organic Matter (%)
Bare soil	0,03	9,00	13,2	4	0,26	0,52
Rhizosphere soil of <i>Lotus creticus</i> (the native Forest)	0,04	9,00	12,8	1,75	0,24	0,48
Rhizosphere soil of <i>Retama monosperma</i> (the native Forest)	0,04	9,09	20,4	2	0,18	0,36
Rhizosphere soil of <i>Ononis natrix</i> (the native Forest)	0,04	8,95	19,8	1,25	0,27	0,54
Rhizosphere soil of <i>Lotus creticus</i> (Soil replanted by men)	0,05	8,94	14,8	1,87	0,33	0,66
Rhizosphere soil of <i>Retama monosperma</i> (Soil replanted by men)	0,05	8,92	15,2	5,62	0,24	0,24
Rhizosphere soil of <i>Ononis natrix</i> (Soil replanted by men)	0,04	8,81	16,4	1,87	0,43	0,86
Rhizosphere soil of <i>Acacia saligna</i> (Soil replanted by men)	0,05	8,87	18	3,12	0,15	0,30

3.2 Statistical Analysis

From the variance analysis we see that the effect of the spring season and winter is not significantly different

(Pr > F greater than 0.001) However for the autumn and summer season there is a significant difference (Pr > F less than 0.001).

Correlations cards (Figures 1, 2, 3 and 4) show that there is a correlation with the physico-chemical parameters and microbial population. In all seasons we noticed that a very high correlation is equal to 100% between soil, active limestone and organic matter, soil is moderately correlated to the electrical conductivity and the carbon, the total calcium and the number of bacteria is weakly correlated with the pH for the season spring, autumn, winter and summer season.

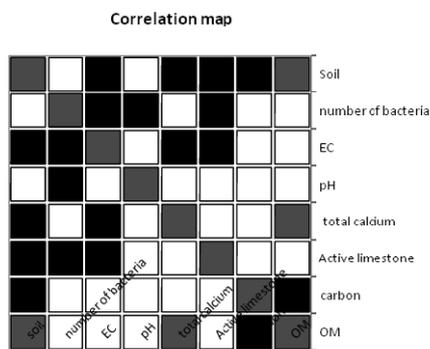


Figure 2. Correlation map of the spring season

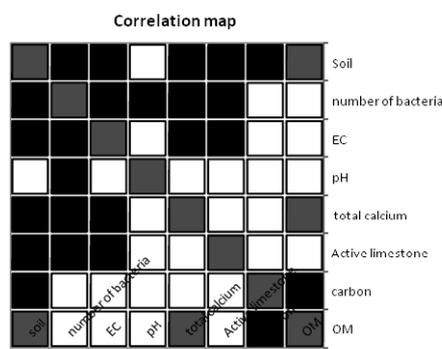


Figure 3. Correlation map of the summer season

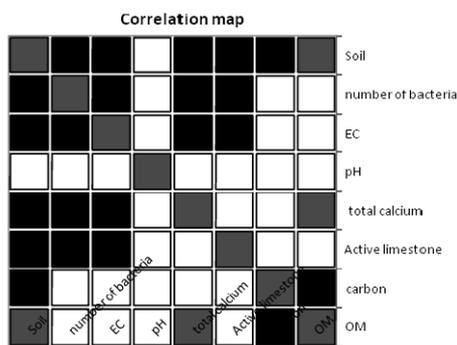


Figure 4. Correlation Map of the winter season

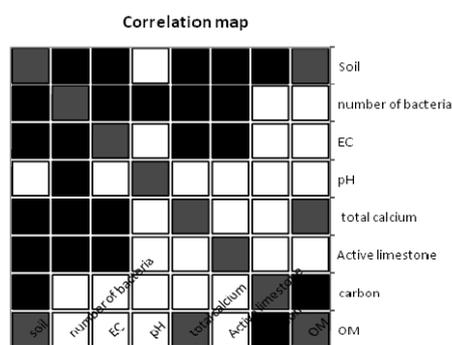


Figure 5. Correlation Map of the autumn season

We note that it is not only weakly correlated with pH but also with the number of bacteria. Factor analyzes cards obtained shown in Figures 5, 6, 7 and 8 involving physic-chemical parameters and microbial population.

We note that in all seasons the physico-chemical parameters and the number of bacteria correlate with them except for autumn season where pH does not correlate with other parameters.

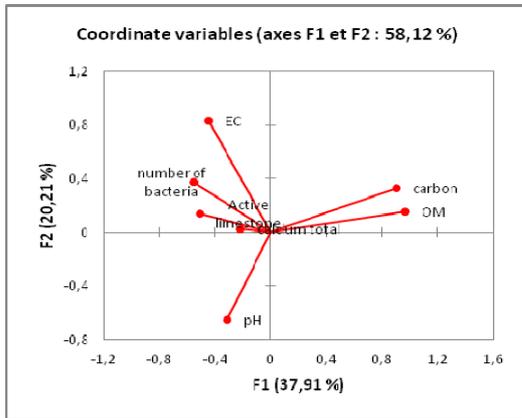


Figure 6. Factor analysis map of summer season

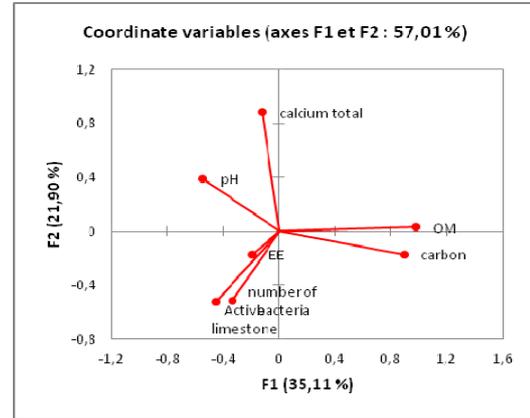


Figure 7. Factor analysis map of autumn season

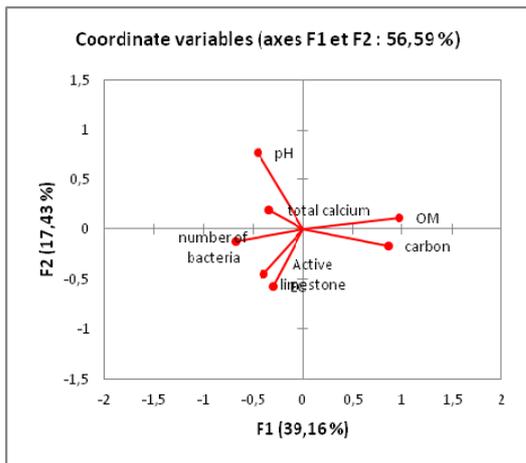


Figure 8. Factor analysis map of winter season

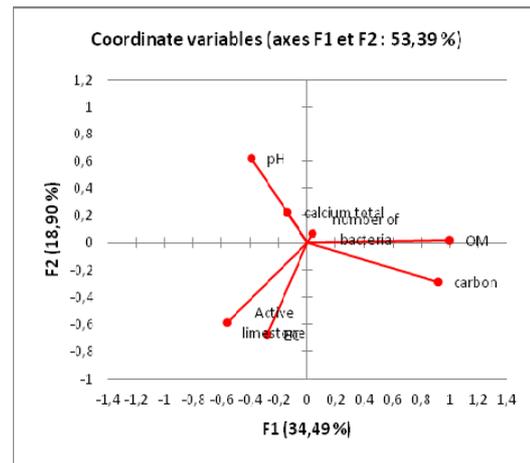


Figure 9. Factor analysis map of spring season

3.3 Microbial Enumeration

Figures 10, 11, 12 and 13 are representations of microbial flora for all samples per season, we note that in all seasons the microbial population is important in the soil replanted by man and decreases in the winter season.

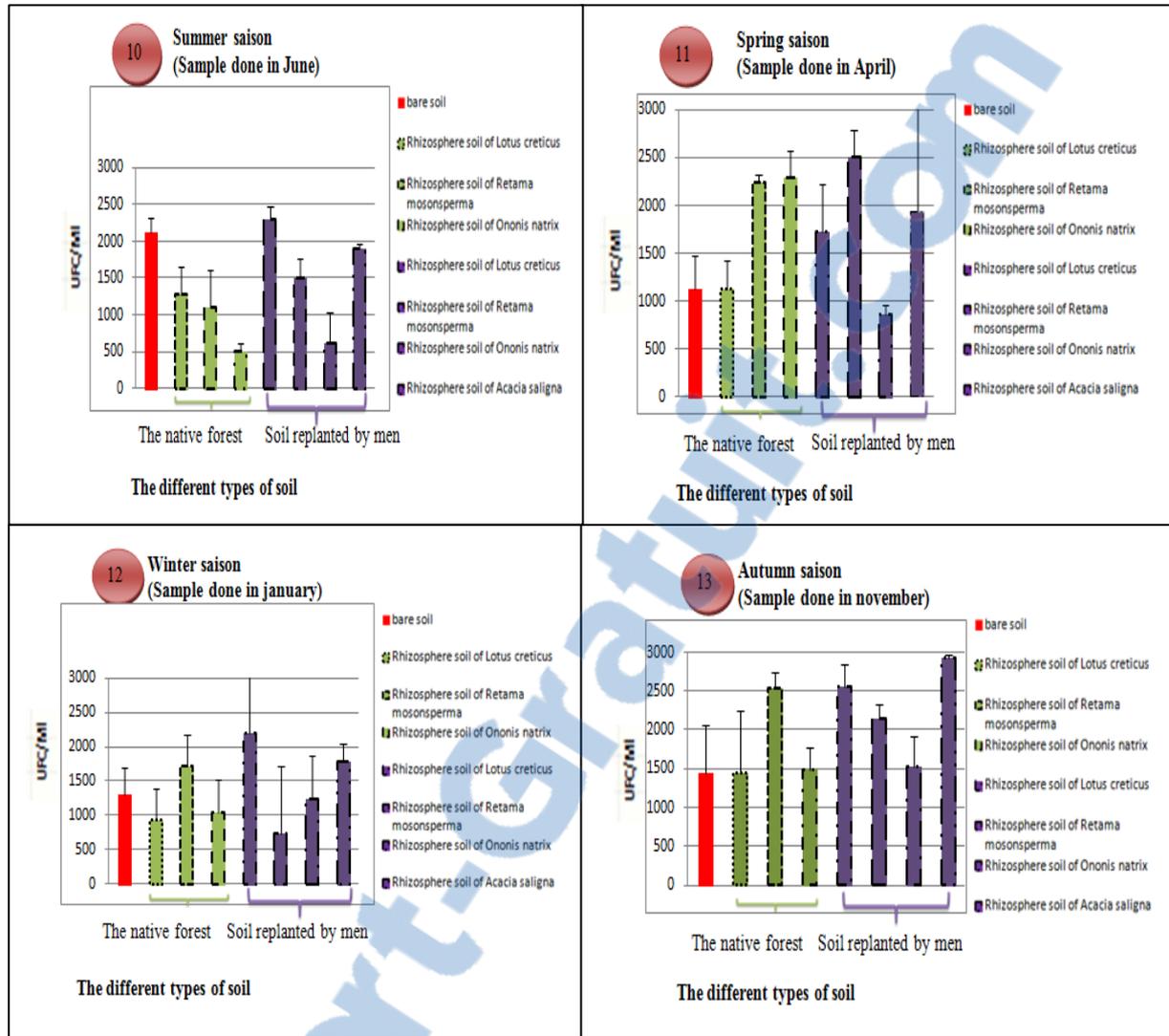
In the summer season the microbial flora is important in bare soil and for some plant in the soil replanted by man such as soil rhizosphere of *Lotus creticus* and *Acacia saligna* and we see a decrease in native forest soil and even for soil rhizosphere *Retama monosperma* in soil replanted by man.

In the spring and autumn season microbial population is important in both types of soil, the soil of the native forest and the soil replanted by man.

And for the winter season microbial population is very important in the soil replanted by man (soil rhizosphere of *Lotus creticus*) and decreases in native forest soil for (*Lotus creticus* and *Ononis natrix*) and *Retama monosperma* for soil replanted by man.

Sandy soils are generally poor in nutrients and water (Fisher et al., 1978; Hatimi, 1995).

In some accidentally dunes rich in nutrients, low humidity reduces the mobility of elements in particular phosphor (Olson et al., 1961). Despite the unfavorable conditions, sandy soils can harbor bacterial and fungal microflora rich and varied (Hatimi, 1995; Nicolson et al., 1979).



Figures 10, 11, 12 and 13. Representations of all samples per season

The results in Figure 14 show that bacteria enumerations were interesting and inexplicable variations in bare soil and in different seasons, microbial population in autumn are at a very low level compared to the number observed in summer and spring season.

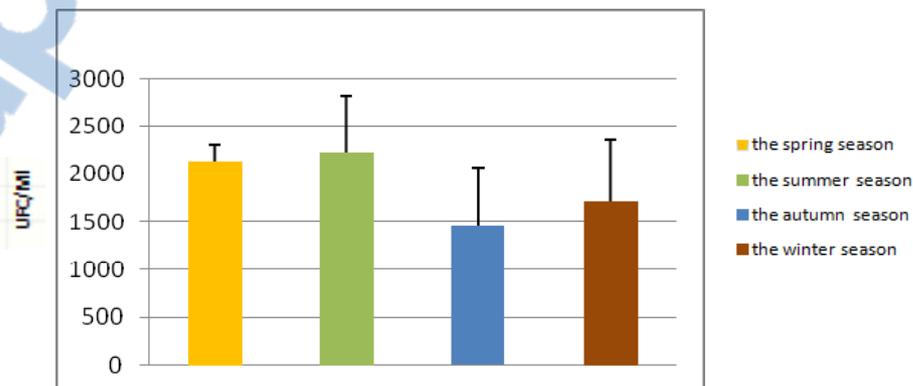


Figure 14. Sample of bare soil at different seasons

In natural state, the microbial population in winter is at an average level, equal or less to that observed in summer, then they decrease brutally in spring and maintained at a very low level in summer.

What is normal is that bacteria multiply actively in winter to reach new or exceeded the number found in the bare soil (Olivier et al., 1998).

From these results it can be deduce that the effect of temperature plays a very important role in determining the microbial flora in the bare soil.

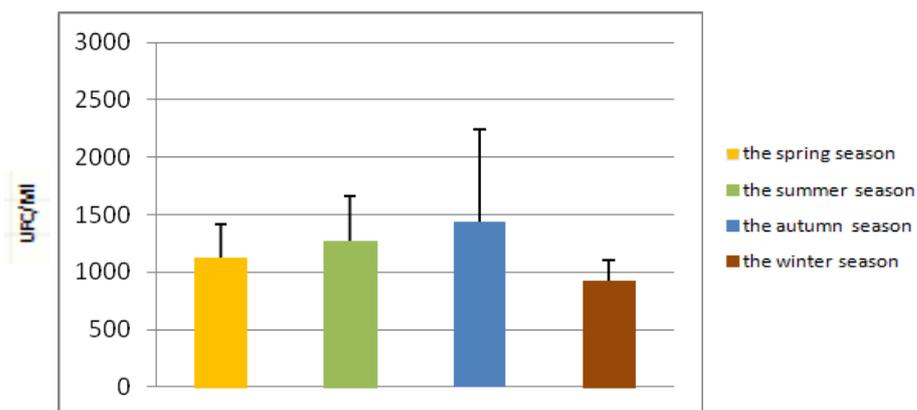
The effect of temperature has been examined in some work where microbial flora increased is greater at higher temperatures (Kätterer et al., 1998; Knorr et al., 2005).

Rui et al. (2009) showed a significant effect of different temperatures (15, 30 and 45 °C) on the microbial population dynamics.

Figure 15 is the representation of each sample during the four seasons of rhizosphere native forest soil.

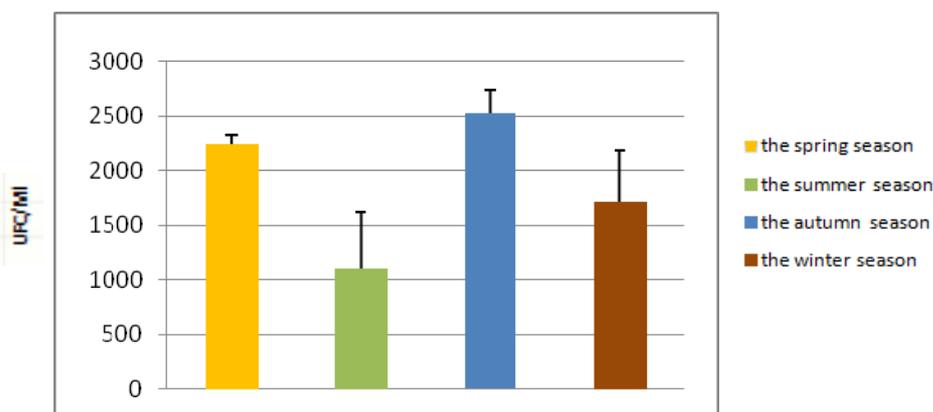
We note that the microbial population of *Ononis natrix* and *Retama monosperma* in autumn and spring season is very important and gradually fall in summer season compared to *Lotus creticus* rhizosphere soil where microbial population is almost equivalent in all seasons.

Lotus creticus



Rhizosphere soil of *Lotus creticus* in different saisons

Retama monosperma



Rhizosphere soil of *Retama monosperma* in different saisons

Ononis natrix

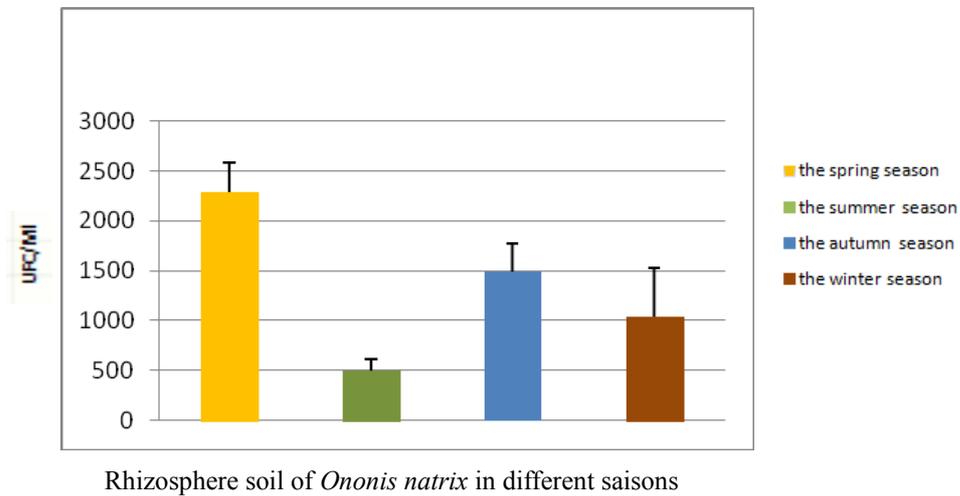


Figure 15. The flora of rhizosphere soil of the native forest in different seasons

And for representations of soil replanted by man which are shown in Figure 16 we always see an increase in the microbial population for *Lotus creticus*, *Ononis natrix* and *Acacia saligna* during autumn season where it is very important however for *Retama monosperma* in spring season marks most population.

From this we can bring these results to the plant, which affects the microbial population of rhizosphere soil.

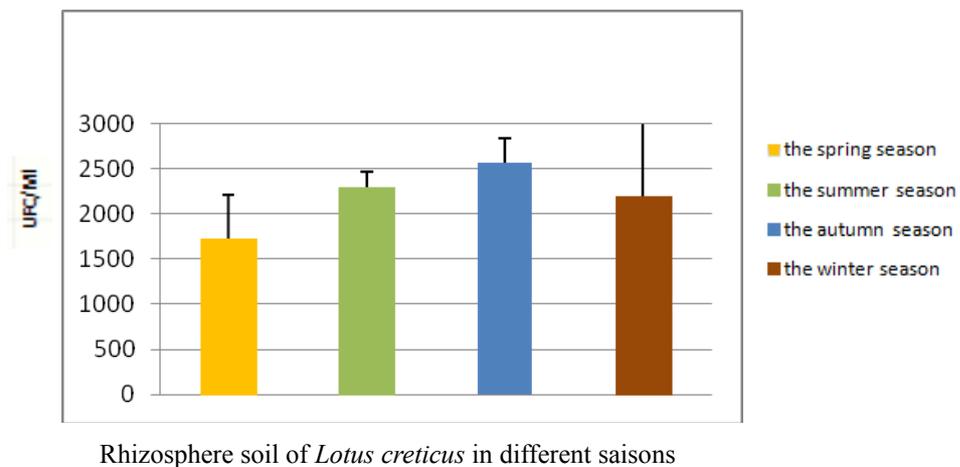
Concerning the bacterial flora, Cambell (1985) reports to the R / S (number of rhizosphere germes / number in bare soil) high variation due to the nature of plant and isolated microorganisms.

The authors agree that the plant increases the microbial biomass in soils (Cookson et al., 2008; Fang et al., 2007).

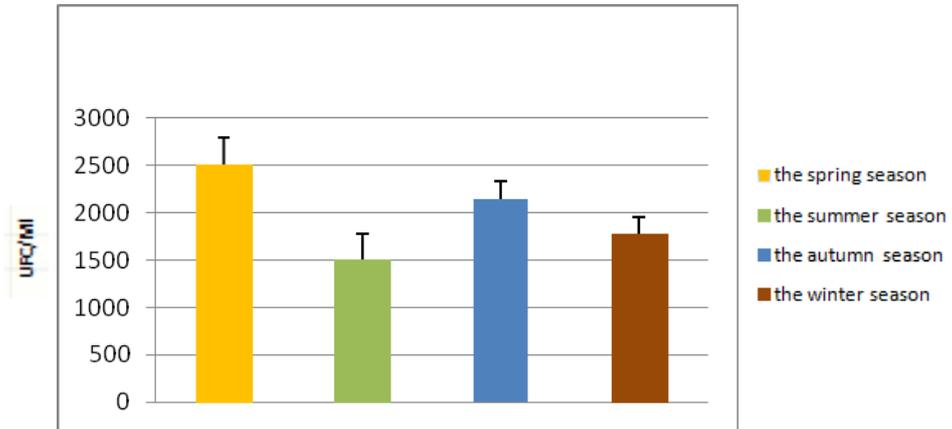
Some studies have begun to focus on microbial communities dynamics and have brought out succession of bacterial and fungal populations (Bastian et al., 2009; Baumann et al., 2009; Bernard et al., 2007; Poll et al., 2010).

The presence of plant causes profound changes in the bacterial community of the soil (Singh et al., 2004).

Lotus creticus

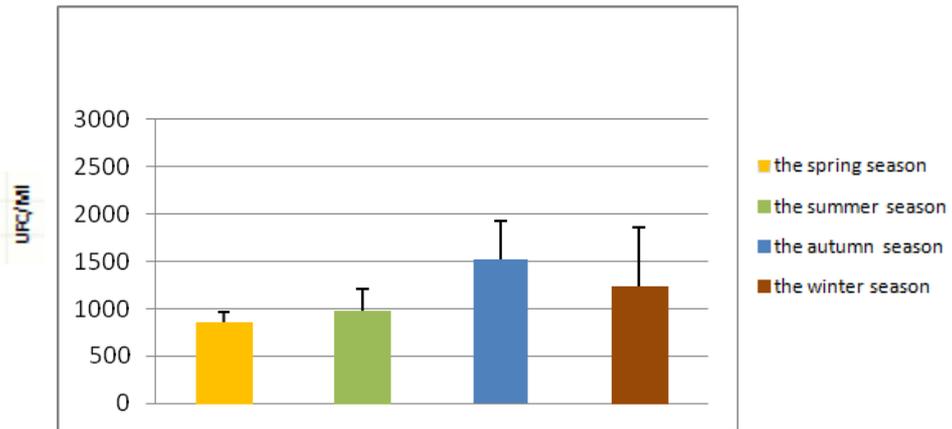


Retama monosperma



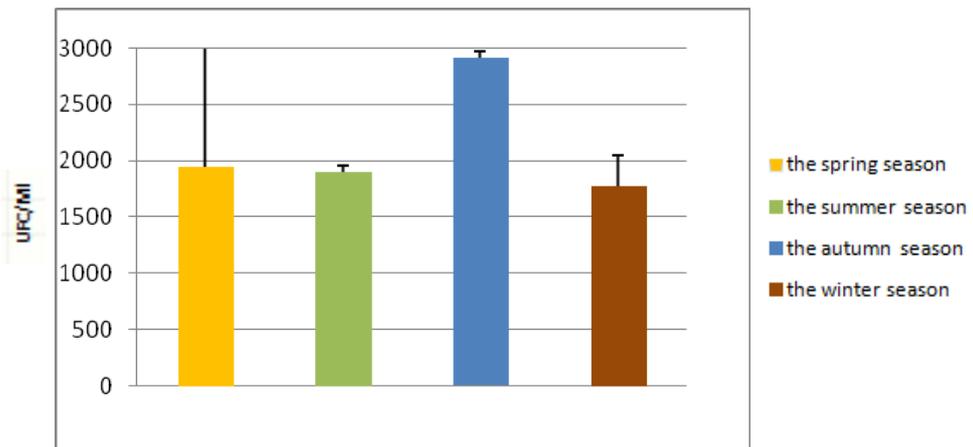
Rhizosphere soil of *Retama monosperma* in different saisons

Ononis natrix



Rhizosphere soil of *Ononis natrix* in different saisons

Acacia saligna



Rhizosphere soil of *Acacia saligna* in different saisons

Figure 16. The flora of rhizosphere soil replanted by men in different seasons

4. Conclusion

The study conducted in Terga quarry revealed the existence of a biological activity of these soils. Despite the poverty of soil nutrients, especially organic matter, there is installation of important pioneer vegetation but low diversified. Densities recorded for the total microflora attest for a significant microbiological activity. Microbiological analysis of soil detected a difference between the three study sites. Seasons influence greatly the microbial population development. Indeed, plant density could influence the distribution and richness of soil microorganisms. Thus, Terga sandy quarry constitute an ecological living environment.

In perspective, to understand the influence of soil parameters on microbial population, obtained results will be the object of a mathematical modelisation.

Acknowledgements

The authors thank Mr. A. Bouraoui director of Terga quarry for his cooperation and institute of INRAA Sidi Bel-Abbes for physico-chemical analysis and Mr Karkachi noureddine for statistical analysis.

References

- Alexander, M. (1977). *Introduction to soil microbiology* (2nd ed.) United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Anne, P. (1945). *The rapid assay of organic carbon in soils. Ann. Agron. April, May, June, 1945 SHE, No. 2, 161-172.*
- Aphaawwa, W. (1970). *Standars methods of the examination of water waste water* (14th ed.).
- Aubert, G. (1978). *Relationship between the ground and five heath in the South East of France. Oecol. Plant, 13(3), 253-269.*
- Bastian, F., Bouziri, L., Nicolardot, B., & Ranjard, L. (2009). *Impact of wheat straw decomposition on successional patterns of soil microbial community structure. Soil Biology & Biochemistry, 41, 262-275.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.10.024>
- Baumann, K., Marschner, P., Smernik, R. J., & Baldock, J. A. (2009). *Residue chemistry and microbial community structure falling on decomposition of eucalypt, wheat and vetch residues. Soil Biology & Biochemistry, 41, 1966-1975.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.soil.bio.2009.06.022>
- Bernard, L., Mougel, C., Maron, P. A., Nowak, V., Leveque, J., Henault, C., & Ranjard, L. (2007). *Dynamics and identification of soil microbial populations actively assimilating carbon from ¹³C Labelled wheat residue as Estimated by DNA- and RNA- SIP techniques. Environmental Microbiology, 9, 752-764.* <http://dx.doi.org/10.1111/j.1462-2920.2006.01197.x>
- Bouhot, D., & Rouxel, F. (1971). *Technical selective and quantitative analysis Fusarium solani and Fusarium oxysporum in the soil. Ann. Phytopathol, 3(2), 251-254.*
- Callot, G., & Dupuis, M. (1980). *The active limestone soils and its significance. Sc.du So, Bull. of I'AFES, n" 1, 17-26.*
- Campbell, C. D., Grayston, S. J., & Hirst, D. J. (1997). *Use of rhizosphere carbon sources in sole carbon source tests to discriminate soil microbial Communities. J. Microbiol. Methods, 30, 33-41.* [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-7012\(97\)00041-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-7012(97)00041-9)
- Campbell, R., (1985). *Plant microbiology* (p. 191), In Arnold (Ed.). London.
- Drouineau, G. (1942). *Rapid determination of the active limestone sols. Ann. Agron. Vol. 12.*
- Fang, Y., Zhang, H., Wang, B., & Zhang, Y. (2007). *New taxa of Aboilinae (Insecta, Orthoptera, Prophalangopsidae) from the Middle Jurassic of Daohugou, Inner Mongolia, China. Zootaxa, 1637, 55-62.*
- Fisher, R. A., & Turner, N. C. (1978). *Plant productivity in the arid and semi- arid areas. Ann. Rev. Plant Physiol., 29, 277-317.* <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.pp.29.060178.001425>
- Girvan, M. S., Bullimore, J., Ball, A. S., Pretty, J. N., & Osborn, A. M. (2004). *Responses of active bacterial and fungal Communities in soils under winter wheat to different fertilizer and pesticide Regimens. Applied & Environmental Microbiology, 70, 2692-2701.* <http://dx.doi.org/10.1128/AEM.70.5.2692-2701.2004>
- Gobat J., Aragno, M., & Matthey, W. (2003). *The living soil* (2nd ed.). Lausanne polytechnic and university presses romandes.
- Hatimi, A. (1995). *Root symbionts of three tree legumes coastal dune Souss -Massa. Ed INRA, Paris, The*

Collogues, 77, 183-190.

- Katterer, T., Reichstein, M., Andren, O., & Lomander, A. (1998). *Temperature dependence of organic matter decomposition : a critical review using literature data Analyzed with different models*. *Biol. Fertil. Soils*, 27, 258-262. <http://dx.doi.org/10.1007/s003740050430>
- Knorr, W., Prentice, I. C., House, J. I., & Holland, E. A. (2005). *Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming*. *Nature*, 433, 298-302. <http://dx.doi.org/10.1038/nature03226>
- Nicolson, T. H., & Johnston, C. (1979). *Mycorrhiza in the Gramineae*. III. *Glomus fasciculatum* as the endophyte of pioneer fat in a maritime sand dune. *Trans. BR. Mycol. Soc.*
- Olson, S. R., Watanabe, F. S., & Danielson, R. E. (1961). *Phosphor absorption by corn roots affected by moisture and phosphorus concentration*. *Soil Soc. Amer. Proc.*, 25, 289-294. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1961.03615995002500040018x>
- Rapilly, F. (1968). *Techniques of Mycology Plant Pathology*. *Ann. Plant Diseases*, Vol. 19.
- Schlöter, M., Dilly, O., & Munch, J. C. (2003). *Indicators for Evaluating soil quality*. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 98, 255-262. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00085-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00085-9)
- Singh, B. K., Millard, P., Whiteley, A. S., & Murrell, J. C. (2004). *Unravelling rhizosphere - microbial interactions: opportunities and limitations*. *Trends Microbiol.*, 12, 386-393. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tim.2004.06.008>
- Stroosnijder, L. (1992). *Desertification in Sahelian Africa* (E 133, pp. 36-39). ECC. Brussels, Belgium.
- Van Elsas, J. D., & Garbeva, P. (2002). *Effects of agronomical Measures on the microbial diversity of soils as related to the suppression of soil-borne plant pathogens*. *Biodegradation*, 13, 29-40. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1016393915414>

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/>).