

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



جامعة قاصدي مرباح - ورقلة
UNIVERSITE DE OUARGLA



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences Agronomiques

THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT ès SCIENCES

Spécialité : Sciences Agronomiques

Option : Sciences du sol

Par : Mokhtar KARABI

Thème

**FONCTIONNEMENT MICROBIOLOGIQUE DES SOLS
OASIENS. CAS DE QUELQUES SOLS DE LA REGION DE
OUARGLA**

Soutenue Publiquement le : 19 / 01 / 2016

Devant le Jury Composé de :

Président	CHELOUFI Hamid	Professeur	Université de Ouargla
Directeur de thèse	HAMDI AISSA Baelhadj	Professeur	Université de Ouargla
Rapporteurs	BENSLAMA Mohamed	Professeur	Université de Annaba
	HALILAT Mohamed Tahar	Professeur	Université de M'sila
	DADDI BOUHOUN Mustapha	Maitre de conférences	Université de Ouargla
	BOURAS Noureddine	Professeur	Université de Ghardaïa

Année universitaire : 2016/2017

Avant-propos

Je remercie tout d'abord le bon Dieu qui m'a donné le courage et la patience pour terminer ce travail, sans oublier, toutefois, de remercier mes chers regrettés parents que dieu ait leurs âmes dans son vaste paradis.

Le plaisir de présenter mes résultats ne me fera pas oublier d'exprimer ici mes sincères remerciements aux personnes qui ont contribué efficacement à la réalisation de ce travail :

Mon directeur de thèse, Monsieur HAMDY AISSA Baelhadj, Professeur à l'université de Ouargla, pour l'intérêt qu'il me porte et pour bien vouloir me consacrer une partie de son temps précieux pour discuter mes résultats.

Pour ses encouragements, ses nombreux conseils scientifiques et pour avoir fait l'honneur de présider le jury, je remercie profondément Monsieur CHELOUFI Hamid, Professeur à l'université de Ouargla.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance à ; Monsieur BENSLAMA Mohamed, Professeur à l'université d'Annaba de m'avoir accepté d'honorer mon jury de sa participation ; Monsieur HALILAT Mohamed Tahar, Professeur à l'université de M'sila, d'avoir accepté de participer au jury et d'avoir apporté son attention à la lecture de cette thèse.

Je tiens à exprimer ma gratitude à l'égard de Monsieur BOURAS Noureddine, Professeur à l'université de Ghardaïa pour ses aides précieuses et pour avoir accepté de faire partie de mon jury.

Pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de participer au jury et pour les séances de travail qu'il m'a consacré, je remercie grandement Monsieur DADDI BOUHOUN Mustapha, Maître de conférences « A » à l'université de Ouargla.

Je témoigne une particulière gratitude à ZENKHRI Salah, KEMASSI Abdallah, BABA HANNI Souad et IDDER Mohamed Tahar pour leur soutien et leurs qualités humaines incontestables.

Je remercie également Mohammed BELLAROUSSI, Mounir SAGGAI et CHAABNA Ahmed, maîtres assistants à l'université de Ouargla pour les séances de travail statistique qu'ils m'ont consacré.

Toute ma gratitude à l'équipe du laboratoire biogéochimie des milieux désertiques, particulièrement le directeur du laboratoire le Professeur HADJ-MAHAMED Mahfoud pour ses conseils et pour sa motivation.

Pour m'avoir soutenu de leur amitié, je tiens à exprimer ma reconnaissance à mes chers (es) collègues et amis (es) : Raouf KORICHI, Amor OULED BELKHEIR, OMEIRI Nawel, Brahim DJILI, Rabia SLIMANI, Yamina MIMOUNI (pour son aide précieuse afin de réaliser certaines expériences biochimiques) et Rokaya HAMMOUDI.

Je suis très reconnaissant du soutien et de la bonne humeur quotidienne de l'ensemble des personnes des Laboratoires pédagogiques du département des sciences agronomiques, particulièrement le responsable BEGGARI El ayache.

Mes remerciements vont également aux personnes suivantes : IDDER Abdelhak, IDDER Tahar, Tahar BOUCHOUCHA.

A tous ceux et celles qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail, qu'ils trouvent ici ma haute considération.

Enfin, ce travail n'aurait pas été mené à terme sans les concessions et les encouragements de ma femme.

DEDICACE

A la mémoire de mes très chers regrettés parents ;

A ma femme et mes enfants, Malak, Madjda et Mehdi ;

A mes frères et sœurs ;

A mes beaux-parents ;

A toute ma famille et ma belle-famille réunies ;

A mon ami Salah ZENKHRI

Je dédie ce travail

KARABI Mokhtar

Fonctionnement microbiologique des sols oasiens. Cas de quelques sols de la région de Ouargla

Résumé

Le présent travail se fixe comme objectif d'étudier les relations existantes entre les microorganismes du sol et les systèmes de culture, les pratiques culturales, les variations spatiotemporelles et l'hydromorphie du sol en milieu oasien, à Ouargla. Cette contribution révèle, d'une part, l'effet stimulateur des facteurs cités sur la taille du compartiment microbien et son activité et d'autre part, la sélectivité engendrée par le pédoclimat vis à vis de ces microorganismes.

Des déterminations microbiologiques (densité des principaux groupes microbiens, $C_{\text{microbien}}$, $N_{\text{microbien}}$, activité enzymatique), ont été réalisées parallèlement aux déterminations physico-chimiques sur des échantillons composites provenant de la couche superficielle (0 – 30cm) des sols issus de quelques palmeraies et exploitations agricoles.

Les résultats des analyses physico-chimiques et microbiologiques de la couche superficielle des sols étudiés, montrent que la présence de matière organique augmente la biomasse microbienne. Le dénombrement des différents groupes microbiens révèle que les bactéries présentent une supériorité numérique, suivies parfois par les actinomycètes, parfois par les champignons et enfin les algues dans l'ensemble des sols étudiés. La densité des microorganismes est influencée par les conditions pédoclimatiques et la nature du sol (humidité, texture, matière organique, pH,...). Ainsi, les sols nus sont beaucoup moins riches en microorganismes que les sols cultivés. Le nombre et l'activité des microorganismes dépendent essentiellement de l'énergie qui peut être libérée à la suite de la décomposition de la matière organique. Ces modifications sont plus manifestées au niveau de la rhizosphère, qui met en évidence l'importance de l'effet rhizosphérique. Il ressort aussi de notre étude que le système de culture et les pratiques culturales sont susceptibles de varier considérablement les propriétés biologiques des sols oasiens. Ainsi, il a été démontré que le travail du sol a une forte influence sur la biomasse fongique comparativement aux autres groupes microbiens. L'absence d'irrigation diminue considérablement la densité microbienne. Ainsi les bactéries sont les plus sensibles au stress hydrique suivi par les champignons et les actinomycètes. Une variabilité spatiale des indicateurs microbiologiques du sol a été notée, entre deux pieds de palmiers dattier. Cette variabilité est due à l'effet rhizosphérique et aux résidus de récoltes mis à la disposition des microorganismes. Quant aux variations saisonnières (automne / hiver), il est clairement constaté que le maximum de l'activité microbienne est situé en automne et que les espèces microbiennes sont affectées à des degrés variables par l'effet saisonnier ; c'est ainsi que les champignons sont les plus touchés, suivi par les algues, ensuite les bactéries et les actinomycètes, qui semblent bien s'adapter aux variations climatiques. La densité des bactéries sulfato-réductrices est importante dans le sol qui présente les conditions les plus favorables au développement de ces bactéries (engorgement, salinité, teneurs en matière organique et en gypse).

Mots clés : sol, biomasse microbienne, pratiques culturales, système de culture, saison, humidité, Ouargla-Algérie.

Oasis soils microbiofunctioning. Case of some soils in Ouargla area

This work sets the objective to study the relationships between soil microorganisms and cropping systems, farming practices, spatiotemporal variations and waterlogging soil on oasis environment, in Ouargla. This entry reveals, in one hand, the stimulatory effect of the factors cited on the size of the compartment microbial and its activity, and on the other hand, the selectivity caused by the pedoclimate overlooked these microorganisms.

Microbiological determinations (density of the main microbial groups, $C_{\text{microbial}}$, $N_{\text{microbial}}$, enzymatic activity) were performed in parallel with physico-chemical determinations on composite samples from the surface layer (0 - 30cm) of soil from some palm groves and farms.

The results of physico-chemical and microbiological analyzes of surface layer of studied soils, show that the presence of organic matter increases the microbial biomass. The enumeration of various microbial groups reveals that the bacteria have a numerical superiority, sometimes followed by actinomycetes, sometimes by fungi and finally algae in all soils studied. Soil microbial density is influenced by pedoclimatic conditions and soil type (moisture, texture, organic matter, pH, ...). So bare soils are much less rich in microorganisms than cultivated soils. The number and activity of the microorganisms essentially depend on the energy that can be released as a result of the decomposition of organic matter. These changes are manifested in the rhizosphere, which highlights the importance of rhizosphere effect. It also appears from our study that cropping system and farming practices are likely to vary considerably the biological properties of oasis soils. Thus, it has been shown that tillage has a strong influence on the fungal biomass compared to other microbial groups. Irrigation lack substantially reduces the microbial density. Thus, bacteria are more sensitive to drought stress followed by fungi and actinomycetes. A spatial variability in soil microbiological indicators was noted between two feet of date palms. This variability is due to the rhizospheric effect and crop residues available to microorganisms. As for seasonal variations (fall / winter), it is clearly found that the maximum microbial activity is located in the autumn and microbial species are affected to varying degrees by the seasonal effect; thus fungi are the most affected, followed by algae, then bacteria and actinomycetes, which seem to adapt to climate variations. The density of the sulphate-reducing bacteria is important in soil that is most favorable to the development of these bacteria (waterlogging, salinity, organic matter and gypsum).

Keywords: soil, microbial biomass, farming practices, cropping systems, season, Ouargla-Algeria.

العمل الميكروبيولوجي لتربة الواحات. حالة بعض الترب في منطقة ورقلة

الملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة العلاقات بين الكائنات المجهرية في التربة والنظم الزراعية، الغطاء النباتي، التغيرات الموسمية الملوحة والرطوبة لتربة الواحات. هذا العمل يكشف من جهة، التأثير التنشيطي للعوامل المذكورة على الحجم والنشاط الميكروبي ومن ناحية أخرى، الانتقائية التي يسببها الجو الارضي اتجاه هذه الكائنات الدقيقة.

تحاليل ميكروبيولوجية (كثافة اهم المجموعات الجرثومية، الكربون الميكروبي، الازوت الميكروبي، النشاط الأنزيمي) بالتوازي مع تحاليل فيز وكيميائية، اجريت على عينات مركبة من الطبقة السطحية (0-30 سم) لتربة بعض بساتين النخيل والمستثمرات الفلاحية.

نتائج التحاليل الفيز وكيميائية والميكروبيولوجية للطبقة السطحية للتربة، تبين أن وجود المواد العضوية يزيد من الكتلة الحيوية الميكروبية. تعداد مختلف المجموعات الميكروبية يكشف أن البكتيريات هي الاكثر عددا، تليها الفطريات الشعاعية ثم الفطريات واخيرا الطحالب في جميع أنواع التربة التي شملتها الدراسة. تتأثر كثافة الكائنات الحية الدقيقة في التربة بالظروف المناخية ونوع التربة (الرطوبة، والملمس، والمواد العضوية ...). التربة العارية هي أقل فقرا بالكائنات الحية الدقيقة مقارنة بالتربة المزروعة. عدد ونشاط الكائنات الحية الدقيقة تعتمد أساسا على الطاقة التي يمكن أن تنطلق نتيجة لتحلل المواد العضوية. تتجلى هذه التغيرات في منطقة التجدير، والذي يسلط الضوء على أهمية تأثير منطقة التجدير. ويبدو أيضا من دراستنا أن النظم الزراعية وممارسات الزراعة من المرجح أن تغير تغييرا كبيرا الخصائص البيولوجية لتربة الواحات. الحرث لديه تأثير قوي على الكتلة الحيوية الفطرية مقارنة بالفئات الجرثومية الأخرى. نقص الري يقلل بشكل كبير من الكثافة الميكروبية. البكتيريا هي أكثر حساسية للجفاف تليها الفطريات والفطريات الشعاعية. التباين المكاني للمؤشرات الميكروبيولوجية للتربة بين قدمين النخيل بسبب تأثير منطقة التجدير ومخلفات المحاصيل الزراعية المتاحة للكائنات الحية الدقيقة. أما بالنسبة للتغيرات الموسمية (خريف / شتاء)، وجدنا أنه من الواضح أن الحد الأقصى للنشاط الميكروبي يقع في الخريف وتتأثر الأنواع الميكروبية بدرجات متفاوتة من التأثير الموسمي. وبالتالي الفطريات هي الأكثر تضررا تليها الطحالب، ثم البكتيريا والفطريات الشعاعية، والتي تبدو حسنة التكيف مع التغيرات المناخية. كثافة البكتيريا المرجعة للكبريت معتبرة في التربة الأكثر ملاءمة لتطوير هذه البكتيريا (غرق التربة، نسبة الملوحة، نسبة المواد العضوية ونسبة الجبس).

الكلمات الدالة: تربة، الكائنات الدقيقة، الممارسات الزراعية، النظم الزراعية، موسم، ورقلة-الجزائر.

Sommaire

INTRODUCTION	01
PREMIERE PARTIE. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	
Chapitre I. Le sol, une ressource dynamique vivante	07
I.1. Les caractéristiques du sol	07
I.2. Les microorganismes du sol	11
I.3. Fonctionnement microbiologique du sol	16
Chapitre II. L'écosystème oasien	29
II.1. Présentation de l'écosystème oasien	29
II.2. Les composantes biologiques du système oasien	30
II.3. La gestion de l'eau dans les oasis	32
II.4. L'écosystème oasien En Algérie	32
Chapitre III. Généralités sur les sols sahariens	36
III.1. Définition des Sols des zones arides	36
III.2. Caractéristiques générales des Sols des zones arides	36
III.3. Principaux sols dans les régions arides	37
DEUXIEME PARTIE. CONDITIONS LIMITROPHES DE L'ACTIVITE MICROBIENNE DU SOL DANS LA REGION DE OUARGLA ET CADRE DE L'ETUDE	
Chapitre IV. Conditions limitrophes de l'activité microbienne du sol dans la région de Ouargla	39
IV.1. Salinisation (stress osmotique)	39
IV.2. Faible teneur en matière organique (stress énergétique)	40
IV.3. Texture grossière (stress minéralogique)	41
IV.4. Hydromorphie des sols	41
Chapitre V. Cadre de l'étude	42

V.1. Localisation géographique	42
V.2. Climat	43
V.3. Hydrographie	44
V.4. Géomorphologie	45
V.5. Géologie	46
V.6. Hydrogéologie	47
V.7. Pédologie	48
V.8. Flore naturelle et faune	50

TROISIEME PARTIE. MATERIEL ET METHODES

Chapitre VI. Matériel d'études	52
VI.1. Choix des sites d'études	52
VI.2. Zone d'étude I	53
VI.3. Zone d'étude II	55
VI.4. Zone d'étude III	57
VI.5. Zone d'étude IV	59
Chapitre VII. Méthodes d'études	62
VII.1. Approches méthodologiques	62
VII.2. Méthodes d'analyses	68

TROISIEME PARTIE. RESULTATS ET DISCUSSION

Chapitre VIII. Effets de quelques systèmes de culture sur la diversité microbienne des sols oasiens	77
VIII.1. Introduction	77
VIII.2. Caractéristiques abiotiques	78
VIII.3. Caractéristiques biotiques	82
VIII.4. Conclusion	100
Chapitre IX. Effets de quelques pratiques culturales sur la densité microbienne de quelques sols oasiens	101

IX.1. Effet du travail du sol	101
IX.2. Effet de l'humidité du sol sur la densité microbienne	115
Chapitre X. Variations spatio-temporelles de la biomasse microbienne dans les sols oasiens	131
X.1. Variabilité spatiale de l'activité microbienne sous culture de palmier dattier	131
X.2. Effet des variations saisonnières sur la densité microbienne des sols oasiens	147
Chapitre XI. Mise en évidence du phénomène de sulfato-réduction dans les sols oasiens	155
XI.1. Introduction	155
XI.2. Caractéristiques abiotiques	156
XI.3. Caractéristiques biotiques	160
XI.4. Conclusion	170
CONCLUSION GENERALE	172
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	180
ANNEXES	216
LISTE DES TABLEAUX	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES PHOTOS	
TABLE DES MATIERES	

Introduction

Introduction

Le sol, loin d'être un substrat inerte, est un milieu dynamique et complexe grâce, en particulier, aux microorganismes qui l'habitent (Gobat, 2003). Ces derniers constituent un des maillons du cycle biologique et l'étude de leur nature, de leur nombre, de leurs effets, est un élément nécessaire pour la connaissance des sols en ce qui concerne la formation, la conservation, l'évolution et la fertilité.

Les microbes sont les catalyseurs des processus écosystémiques et différents microbes jouent différents rôles dans ces processus. Les variations de la diversité microbienne du sol et la structure des communautés affectent sérieusement la matière organique du sol et peut avoir également une incidence sur le fonctionnement des écosystèmes (Wang et *al.*, 2013).

Les microbes du sol effectuent une variété d'activités requise pour le bon fonctionnement du sol comme système dynamique (Kalia et Gosal, 2011). Tout changement dans la biomasse microbienne du sol peut avoir un impact sur ces fonctions importantes dans le sol. En outre, les microorganismes réagissent rapidement aux changements des conditions du sol, en particulier l'approvisionnement en matière organique (Araújo et Melo, 2010). Une compréhension des processus microbiens est importante pour la gestion des agrosystèmes (Smith et Paul, 1990).

L'activité biologique reste une composante essentielle de la fertilité du sol. Elle y 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.

Dans de nombreux cas, l'absence de prise en compte des contraintes physiques, chimiques et microbiologiques des sols demeure préjudiciable à leur exploitation. Pourtant, il est depuis très longtemps connu que certains paramètres des sols jouent un rôle capital dans la gestion de la nutrition végétale et qu'un approvisionnement adéquat en éléments nutritifs dépend de leur optimisation (Troeh et Thompson, 2005).

Malheureusement, l'agriculture intensive que l'on pratique aujourd'hui influence la qualité des terres agricoles. On assiste ainsi à une diminution, parfois même à la destruction de leur productivité à long terme. Leur capacité à entretenir la diversité de la vie et les écosystèmes est également entravée. Les formes les plus courantes de dégradation des sols

Introduction

agricoles sont la salinisation, l'engorgement et la perte de leur matière organique (Pelletier, 1992).

Les faibles potentialités agronomiques des sols oasiens est un problème préoccupant depuis plusieurs décennies. De nombreuses techniques ont été étudiées pour faire face à ce fléau. Cependant les principales stratégies préconisées (fertilisation minérale ou organique, rotation culturale, utilisation de plantes de couverture comme les légumineuses, parage) permettent de produire plus, mais pas suffisamment pour maintenir durablement la fertilité des sols oasiens. On assiste encore à une dégradation des terres, une dégradation physico-chimique ou / et biologique, qui se traduit souvent par une baisse des réserves de matière organique et des nutriments nécessaires à la croissance des plantes.

Cependant, les microorganismes du sol n'ont que très rarement fait l'objet d'étude pour comprendre les interactions fonctionnement/biodiversité/stabilité du système sol. Pourtant deux caractéristiques, au moins, des microorganismes en font des modèles pertinents, d'une part leur très grande diversité taxonomique et métabolique et d'autre part leur rôle essentiel dans la régulation des cycles biogéochimiques et de la productivité végétale (O'donnell et *al.*, 2001; Wardle, 2002; Nannipieri et *al.*, 2003 in Schimann, 2005).

Comprendre le rôle des activités microbiennes et les facteurs qui les contrôlent dans les sols est depuis très longtemps une question importante pour la gestion adéquate des systèmes sol-plante. Les matières organiques et l'ensemble des flux associés à leurs transformations sont une composante essentielle de la fertilité des sols (Recous et *al.*, 2015).

Le fonctionnement microbiologique du sol est peu pris en compte en raison d'une méconnaissance des déterminants qui influencent ce fonctionnement. Pourtant, celui-ci est particulièrement important dans les écosystèmes naturels et les agrosystèmes à faibles apports d'intrant. Il est à l'origine d'un grand nombre de processus (décomposition et minéralisation des nutriments) qui conduit à la disponibilité des nutriments nécessaires aux végétaux (Djigal, 2003)

En effet, les microorganismes sont au cœur des processus de transformation et de libération de l'azote (Djigal, 2003). Du fait de l'importance du processus de minéralisation de la matière organique du sol dans la fourniture d'azote minéral et des autres nutriments pour la

Introduction

croissance des plantes dans les agrosystèmes à faible apport d'intrants, il est fondamental de comprendre le rôle de ces microorganismes.

Dans la majorité des études d'écologie microbienne, l'objectif principal est de comprendre la réponse adaptative des communautés microbiennes aux changements du milieu (Schmalendberger et *al.*, 2001).

Une meilleure connaissance des limites d'utilisation des indicateurs biologiques devrait permettre de mieux appréhender l'impact réel des pratiques culturales sur l'agrosystème oasien et de pouvoir ainsi se diriger, peu à peu, vers une gestion oasienne durable.

Plusieurs contraintes environnementales sont limitantes pour la production agricole mondiale. La salinité et la sécheresse sont considérées comme les deux facteurs majeurs influant l'agriculture dans les zones arides et semi arides. Les surfaces agricoles affectées par la salinité dans le monde seraient de 340 millions d'hectares soit 23% des terres cultivées (Cheverry, 1995).

L'Algérie fait partie du groupe des pays méditerranéens où la sécheresse, observée depuis longtemps, a conduit manifestement au processus de salinisation des sols sur 3,2 millions d'hectares de terres (Belkhdja et Bidai, 2004). Cette salinisation est plus marquée dans les régions arides du fait des températures élevées durant presque toute l'année, du manque d'exutoire et de l'absence de drainage efficace. Elle provient aussi de l'irrigation, le plus souvent mal contrôlée, ainsi que la qualité des eaux d'irrigation.

Dans des conditions de salinité et/ou aridité élevées les cellules vivantes subissent une forte pression osmotique. Une diminution brutale de la teneur en eau dans le sol entraîne une déshydratation cellulaire. Celle-ci tend à compacter les organites et les macromolécules cytoplasmiques, ce qui ralentit fortement la survie des plantes et des microorganismes telluriques ou arrête complètement leur croissance. De plus, l'accroissement de la concentration de sels dans le sol conduit à un effet toxique spécifique des ions, en menaçant le fonctionnement physiologique de la cellule (Levigneron et *al.*, 1995 ; Le Rudulier et *al.*, 2002).

Dans les sols arides, comme les déserts, les *Bacteria* et les *Archaea* sont sous l'influence de paramètres environnementaux extrêmes qui se caractérisent par des fluctuations

Introduction

importantes de température, des radiations UV élevées, une faible teneur en nutriment et une faible teneur en eau (Andrew et *al.*, 2012). L'environnement désertique supposé être hostile à la vie, abrite pourtant une flore microbienne abondante (Theodorakopoulos, 2013)

Le Sahara algérien, est caractérisée par une hétérogénéité édaphique et climatique ; toutefois, les informations sur les indicateurs biologiques des sols arides semblent être très rares.

Les contraintes liées à la fertilité des sols cultivés restent encore mal connues dans les principales régions agricoles du pays et les rares informations existantes restent assez générales.

Dans la cuvette de Ouargla, la salinisation des sols constitue l'un des facteurs abiotiques majeurs qui réduit le rendement agricole de plusieurs cultures (Daoud et Halitim, 1994).

Si de nombreux travaux sur les caractéristiques physico-chimiques des sols des régions arides existent, les études sur les caractéristiques microbiologiques restent relativement périphériques. Il est donc tout à fait légitime, de chercher à utiliser des mesures biologiques pour mieux connaître ces sols et les gérer au mieux dans une perspective agronomique.

Les chercheurs qui se sont penchés sur les activités biologiques des sols des régions arides ont souligné leur faible teneur en matière organique (Masse, 2007), particulièrement leur taux très bas d'azote organique ; une humification faible et un turnover intense (Meftah, 1988 ; Mekhazni 1990 ; Oustani, 2006, Karabi, 2010).

En revanche, dans ces sols, les propriétés biologiques sur base d'analyses des populations microbiennes et de leurs activités ont fait l'objet de très peu de travaux. Pourtant le rôle du compartiment microbien dans la décomposition de la matière organique, dans les cycles de nombreux éléments nutritifs a été bien démontré. Ces travaux de recherche ont signalé une densité microbienne considérable dans ces sols. On cite, entre autres, les travaux de Dellal et Halitim (1992) en conditions salines dans quelques sols salés de la région de Relizane (Nord-Ouest de l'Algérie) qui ont constaté que les microorganismes du sol sont affectés à des degrés variables par la salinité.

Introduction

Bessdik et al. (2000) lors d'une étude de l'écologie et de la densité de la microflore tellurique en vue de trouver une forme de lutte biologique contre la fusariose du palmier dattier dans différentes palmeraies du Touat, ont signalé que les sols de ces palmeraie sont riches en bactéries, actinomycètes et en champignons. Oustani (2006) en travaillant sur l'influence des amendements organiques sur l'amélioration des propriétés microbiologiques des sols sableux non salé et salés dans la région de Ouargla (sud est algérien) a montré que malgré l'insuffisance de leur activités microbiologiques, un certain nombre de germes demeure dans les biotopes salés où ils sauvegardent l'espèce, il s'agit naturellement d'une sélection ou d'une adaptation au milieu. Mokrane et *al.*, (2013) ont signalé la présence d'une microflore importante dans certains sols salés et non salés des palmeraies dans le sud Algérien y compris celles de la région de Ouargla.

Il est important, si l'on désire mieux connaître le milieu dynamique complexe constitué par les sols sahariens, et, en particulier, mieux saisir les modalités de leur évolution, capitales quant à la fertilité, d'étudier leur aspect microbiologique, parallèlement aux déterminations des propriétés physiques et chimiques.

La région de Ouargla possède la particularité d'avoir des sols où les problèmes de salinisation et d'hydromorphie sont prononcés. La présente étude qui s'inscrit dans un vaste projet qui vise à la relance de la fertilité des sols oasiens, vient pour contribuer à l'étude du fonctionnement microbiologique des sols de la région de Ouargla. En effet, vu l'importance de la région de Ouargla dans le contexte sahariens de point de vue socio-économique et agricole, du fait de la rareté des travaux sur la microbiologie des sols dans cette région et suite à mon travail de Magister qui a porté sur le fonctionnement microbiologique et biochimique des sols sahariens, il était nécessaire:

- d'étudier l'impact des systèmes de cultures sur la densité et l'activité microbienne.
- de comprendre la réponse adaptative des communautés microbiennes à certaines pratiques culturelles en particulier le travail du sol et l'irrigation,
- d'étudier les variations spatiotemporelles de la biomasse microbienne.
- de relever les principales contraintes à la productivité de ces sols,
- d'étudier l'effet des conditions hydro-édaphiques sur la biomasse microbienne des sols soumis à ces conditions en mettant ainsi le point sur le phénomène de sulfato-réduction dans ces sols.

Introduction

Le manuscrit présente dans la première partie une approche bibliographique permettant de replacer les connaissances de bases et le contexte de l'étude : les microorganismes des sols oasiens, l'écosystème oasiens, les principaux sols des régions arides.

Dans la deuxième partie nous exposons les conditions limitrophes de l'activité microbienne dans la région de Ouargla ainsi que le cadre général de l'étude.

Nous présenterons dans la troisième partie les matériels et les méthodes mis en œuvre pour mener notre étude. Cette partie comprend la présentation des zones d'étude, la description des dispositifs expérimentaux et des différentes méthodes utilisées.

Les résultats obtenus et leur discussion feront l'objet de la troisième partie.

Une conclusion générale synthétise l'apport de ce travail à la connaissance de la microbiologie des sols oasiens ainsi que des recommandations et des perspectives seront présentées à la fin de ce document

Première partie

Revue bibliographique

Chapitre I. Le sol, une ressource dynamique vivante

I.1. Les caractéristiques du sol

Le sol est la partie supérieure de la croûte terrestre. Il est l'interface entre l'atmosphère, l'hydrosphère, la lithosphère et les organismes vivants. C'est un milieu polyphasique composé d'une phase solide (minérale et organique), d'une phase liquide, d'une phase gazeuse et, colonisé par des organismes vivants (Djigal, 2003). La pédogenèse résulte de l'altération d'un substrat minéral par des phénomènes physiques, chimiques et biologiques (Quenea, 2004) (Fig. 1). Le sol est traversé par des flux d'énergie et de matière dont la régulation est en grande partie assurée par les communautés vivantes qui le colonisent (Djigal, 2003). C'est un milieu organisé et cette organisation, qui influe directement sur l'ensemble des propriétés du sol, dépend des interactions bio-organominérales.

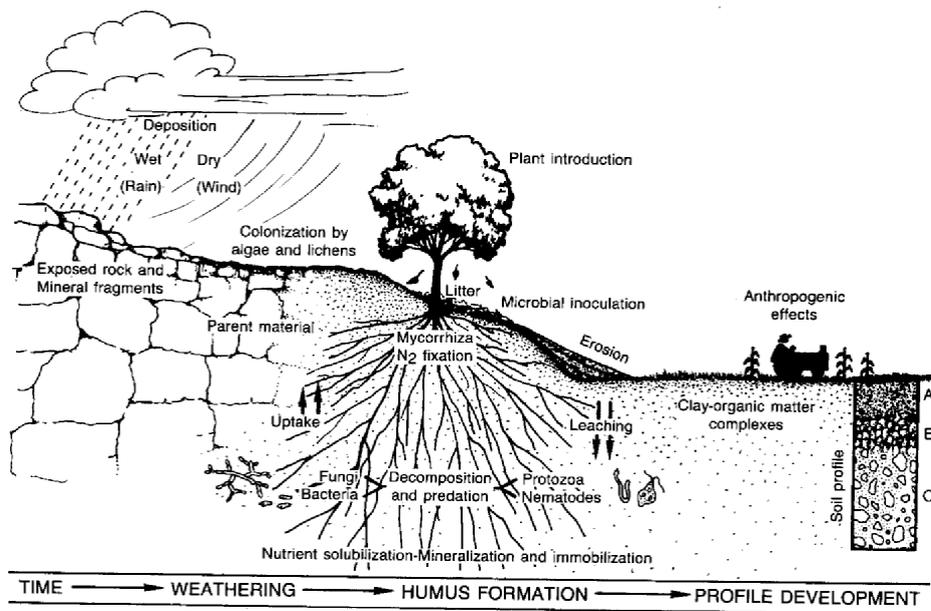


Figure 1. Relation entre organismes, matière organique et roche mère dans le développement du sol (Paul et Clark, 1996)

Le sol a de nombreuses fonctions. Il est un milieu biologique dans/et sur lequel se développent des êtres vivants. Ce développement va dépendre de la qualité de ce sol ou fertilité (quantité de carbone, d'azote, capacité d'échange cationique, etc...). Il est aussi un acteur déterminant du cycle de l'eau (stockage et régulation) et de la qualité de cette eau (source de pollution, capacité de rétention des polluants mais aussi biodégradation de ceux-

ci). Mais le sol joue aussi un rôle prédominant dans les cycles biogéochimiques (Quenea, 2004).

I.1.1. Les composantes du sol

Les propriétés et le fonctionnement du sol, qu'il soit naturel ou cultivé, sont largement déterminés par les propriétés individuelles de ses constituants et par leurs proportions relatives.

I.1.1.1. La phase minérale

C'est la fraction la plus importante du sol, elle constitue, en général, de 95 à 99% du poids total du sol. La composition minérale dépend de la nature de la roche-mère. La nature des minéraux peut être extrêmement diverse. La proportion relative des particules élémentaires définit la texture du sol ou composition granulométrique. Ces particules élémentaires ne sont généralement pas indépendantes, mais agrégés en unités structurales sous l'effet des liants organiques ou minéraux (Callot et *al.*, 1982). La détermination de la texture du sol nécessite donc la destruction de ce ciment et l'individualisation des particules. Ces particules sont réparties en fonction de leur taille de la façon suivante : les sables grossiers (0,2mm à 2mm), les sables fins (50 μm à 0,2mm ou 200 μm), les limons grossiers (de 25 μm à 50 μm), les limons fins (2 μm à 25 μm), et les argiles (<2 μm) (Djigal, 2003).

La texture constitue une importante caractéristique du sol, elle influence plusieurs aspects de son fonctionnement comme la quantité d'eau retenue par le sol, ses capacités d'échange d'électrolytes et de cations. La texture du sol agit aussi sur la distribution et l'activité des organismes du sol et sur leurs interactions (Lavelle et Spain, 2001).

En terme de fonctionnement du sol, les argiles constituent le groupe le plus important dans les particules minérales du sol (Lavelle et Spain, 2001 ; Callot et *al.*, 1982). De nature très variés, les minéraux argileux jouent un rôle très important soit directement ou indirectement dans la plupart des processus et interactions du sol.

I.1.1.2. La phase organique

Cette phase organique peut être divisée entre la fraction organique morte et la fraction organique vivante.

I.1.1.2.1. La fraction organique morte

La fraction organique est constituée à plus de 80% de matière organique (MO) morte (tissus végétaux, résidus d'organismes) (Djigal, 2003). La MO morte subit de nombreuses transformations dans le sol : elle est fragmentée, altérée chimiquement mais aussi biologiquement car, au cours de la minéralisation, elle sert de source d'énergie pour les organismes vivants du sol. Certaines molécules non minéralisées vont subir une humification, c'est-à-dire une réorganisation en molécules plus ou moins complexes qui constituent les substances humiques.

I.1.1.2.1.1. La fraction organique labile : composés de matériels organiques simples qui peuvent être facilement assimilés par les organismes du sol. Les polysaccharides solubles dans l'eau libérés par la litière, les exsudats racinaires et les mucus des vers de terres sont des exemples de cette fraction. La biomasse microbienne, qui peut constituer entre 1 et 5% du carbone organique du sol, est considérée comme faisant partie de ce pool de matière organique labile, mais elle est moins labile que les polysaccharides solubles et les exsudats racinaires (Djigal, 2003).

I.1.1.2.1.2. La fraction organique meuble ou légère : formée par les racines en décomposition et les litières des feuilles. Cette fraction a un temps de séjour dans le sol plus long que les composantes labiles. Elle peut s'accumuler pendant longtemps, dépendant des conditions climatiques sur le sol, et de la présence d'invertébrés décomposeurs actifs. Cette fraction peut former entre 5 à 73% du carbone total du sol (Theng et al. 1989 in Lavelle et Spain, 2001). Elle est dominée chimiquement par les polysaccharides condensés comme la lignine et la cellulose.

I.1.1.2.1.3. La fraction organique lourde : composée de substances humiques qui sont liés aux constituants minéraux pour former des structures organo-minérales. Les substances humiques sont caractérisées par leur importante richesse en carbone (50% ou plus) incorporées à l'intérieur de structures aromatiques. Elles proviennent de la dégradation des matériels phénoliques comme la lignine et les polyphénols contenus dans le matériel végétal originel (Djigal, 2003). Seuls les microorganismes (champignons et bactéries) pourvus d'un complexe enzymatique très particulier sont capables de dégrader ces composants.

I.1.1.2.2. La fraction organique vivante : les organismes du sol

Des bactéries, des actinomycètes, des champignons mais aussi des racines ou encore la faune (protozoaires, nématodes, certains insectes, vers de terre), tous participent d'une manière ou d'une autre à la formation et à l'évolution du sol, en particulier de sa fraction organique (Gobat et *al.*, 2003). Bactéries et champignons sont les principaux responsables de la minéralisation des MO mais ils participent aussi à l'humification notamment par l'excrétion d'enzymes dans le sol ainsi qu'à la formation des complexes organo-minéraux. Le sol est, donc, un assemblage d'organismes extrêmement divers qui régulent les processus de décomposition de la matière organique et du cycle des nutriments (Bardgett et Griffiths, 1997).

I.1.1.2.2.1. 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 et régulent les flux d'énergie et de nutriments (Bardgett et Griffiths, 1997). Les invertébrés qui composent la faune du sol peuvent être différenciés selon leur taille en 2 groupes (Swift et *al.*, 1979) :

-La microfaune dont la taille est comprise entre 200 μm et 1 cm, il regroupe essentiellement les nématodes et les protozoaires. Ils ont un impact très important sur les microorganismes du sol, et sur la minéralisation des nutriments (Griffiths, 1994).

-La macrofaune qui regroupe les organismes dont la taille est supérieure au centimètre. Ils sont qualifiés d'ingénieurs du sol en raison de leurs impacts sur les caractéristiques physiques du sol (Jones et *al.*, 1994).

I.1.1.2.2.2. 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 composés organiques qui favorisent la formation d'agrégats.

I.1.1.3. La phase liquide

L'eau peut être présent dans les sols sous forme de solide, de vapeur et dans sa forme habituelle à l'état liquide (Lavelle et Spain, 2002). L'état liquide de l'eau se présente sous trois formes (Frontier et Pichod-Viale, 1995) : l'eau libre des fissures, à laquelle s'ajoute l'eau de ruissellement superficiel ; elles circulent en entraînant une partie des composés du sol ; l'eau interstitielle ou de percolation, circulant entre les grains du sol et constituant les nappes phréatiques ; l'eau d'imbibition qui est soit adsorbée à la surface des grains, soit absorbée par certains corps hygroscopiques comme les argiles.

L'eau qui circule dans les pores du sol (eau de percolation) véhicule une grande diversité de matériels dissous ou en suspension : organiques, inorganiques, organo-minéral. Les échanges ioniques entre l'eau et le substrat solide, en particulier les argiles constituent une des fonctions du sol les plus importantes pour la nutrition végétale (Frontier et Pichod-Viale, 1995).

I.1.1.4. La phase gazeuse : atmosphère du sol

Un mélange de gaz et de vapeur d'eau forme l'atmosphère à l'intérieur des pores du sol. Les plus importants de ces gaz sont le l'O₂ provenant de l'atmosphère et le CO₂ provenant des respirations et fermentations des organismes du sol et des organes non chlorophylliens des plantes supérieures (Frontier et Pichod-Viale, 1995). Les taux de CO₂ (0,3-3,0%) y sont aussi plus élevés que ceux de la surface du sol. L'O₂ doit diffuser rapidement dans le sol pour répondre aux besoins respiratoires des racines et des microorganismes, le CO₂ aussi doit être capable de diffuser à l'extérieur (Lavelle et Spain, 2001). A part, le CO₂ et l'O₂, une variété d'autres gaz (N₂O, CH₄, H₂, CO...) sont présents dans l'atmosphère du sol. Ils peuvent servir de substrats ou d'inhibiteurs à l'activité des microorganismes. La composition de l'atmosphère du sol est cruciale pour la croissance des plantes et l'activité des organismes.

I.2. Les microorganismes du sol

I.2.1. Les micro-organismes, une source de diversité génétique

Les micro-organismes sont, par définition, des êtres microscopiques, pour la plupart unicellulaires. La majeure partie de ces organismes appartient aux règnes procaryotes Bactéries et Archaea, mais sont aussi représentés chez les eucaryotes comme les Protozoaires et les Fungi. Les bactéries, les actinobactéries et les champignons représentent l'essentiel de la

biomasse microbienne du sol (Lavelle et Spain, 2001). Les virus, bien que non cellulaires, sont également classés parmi les micro-organismes.

Le réseau trophique du sol est fondamentalement la communauté des organismes qui vivent dans le sol. Chaque champ agricole, forêt, prairie ou pâturage possède son propre réseau trophique avec un ensemble unique d'organismes du sol.

Le sol est un milieu oligotrophe, la plupart des microorganismes telluriques (algues, protozoaires, champignons, bactéries) sont impliqués dans de nombreux processus biogéochimiques. La communauté microbienne tellurique, qui joue un rôle primordial dans les cycles biogéochimiques du carbone, de l'azote et d'autres éléments, exerce également des effets bénéfiques ou délétères sur la croissance et la santé des plantes (Zinger, 2009) (Fig. 2).

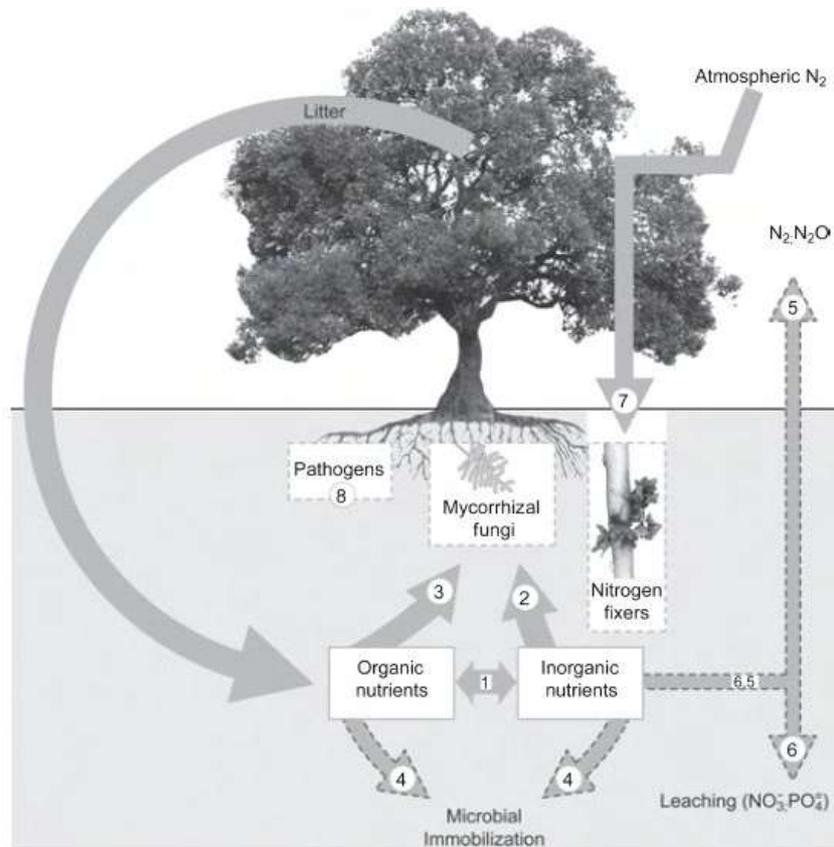


Figure 2. Représentation schématique du rôle du compartiment microbien du sol. Les microbes agissent sur la disponibilité et la réallocation des ressources de façon positive par décomposition, transformation, et transport de la matière organique et des nutriments vers les plantes (1, 2 et 3), ou négative par séquestration des ressources dans leur biomasse ou dans la matière organique récalcitrante (4). La diminution de ressources est également due à la transformation de l'azote organique en des composés volatiles ou facilement lessivables (5, 6) qui peut néanmoins être acquis via les bactéries fixatrices d'azote atmosphérique (7). Les agents pathogènes induisent quant à eux une diminution de la productivité des plantes (8). Ces processus sont accompagnés d'efflux de CO₂ via la respiration des microorganismes (9). *D'après van der Heijden et al. (2008)*

La diversité microbienne est donc vaste tant du point de vue de la diversité taxonomique que du point de vue des fonctions.

En effet, Les agents de la microflore du sol se divisent en quatre groupes : les bactéries, les champignons, les bactéries filamenteuses ou actinobactéries et les algues.

I.2.1.1. Bactéries

C'est le groupe le plus nombreux et le plus varié, puisque leur densité peut s'élever de dix millions à un milliard par gramme de sol. Du fait de leur petite taille, leur poids reste inférieur à une tonne par hectare de sol. Ce qui donne aux bactéries une place importante dans le sol, c'est leur extraordinaire variabilité biochimique qui leur permet de transformer toutes les substances du sol et de les faire entrer dans le monde vivant (Bourguignon et Bourguignon, 2008).

Ce sont des procaryotes unicellulaires de formes très diverses. Leur taille peut varier entre 0,3 et 3 ppm. Leur classification était habituellement basée sur des caractères phénotypiques incluant par exemple la morphologie des cellules (bâtonnets, cocci, bacilles...), la structure de la paroi cellulaire (Gram positif, Gram négatif), la présence d'endospores, la mobilité des cellules et la position des flagelles (Lavelle et Spain, 2001), et aussi sur des groupes nutritionnels (hétérotrophes et autotrophes). Mais c'est la classification en groupe fonctionnel qui est souvent préféré, parce qu'elle donne plus d'informations (Lavelle et Spain, 2001). Cette classification divise les bactéries en 4 groupes selon la source d'énergie utilisée (énergie lumineuse ou des réactions redox) et la nature du donneur d'électron (organique ou minéral) : les photolithotrophes, les photoorganotrophes, les chémolithotrophes et les chémo-organotrophes.

Les bactéries forment une population très diversifiée avec une estimation de 30000 espèces dans le sol (Hawksworth et Mound, 1991)

Les bactéries hétérotrophes constituent les types dominants dans le sol. De par leur consommation et minéralisation des matériels organiques, elles représentent la plupart des flux d'énergie à travers le sol (Bakken, 1997). Les bactéries interviennent dans un grand nombre de processus, et d'interactions mutualistes ou antagonistes avec les autres organismes du sol. Elles jouent un rôle fondamental dans les cycles de l'azote (ammonification, nitrification, dénitrification, fixation symbiotique du N₂), du carbone (décomposition et

minéralisation), du phosphore, du soufre, et dans le recyclage des déchets et des polluants comme les pesticides (Leung et *al.*, 1997). Elles interviennent également dans le maintien de la structure du sol, par la formation d'agrégats.

I.2.1.2. Actinobactéries

Ce sont des microorganismes filamenteux hétérotrophes présentant des similitudes avec les Champignons et les Eubactéries (Fig. 3). De ces premiers, ils ont l'aspect filamenteux et la capacité de sécréter d'antibiotiques (Stolp, 1988) ; des secondes, ils ont la possibilité d'effectuer de très nombreuses réactions biochimiques. Leur nombre est d'un à cent millions par gramme de terre, et leur poids total est d'environ une tonne par hectare.

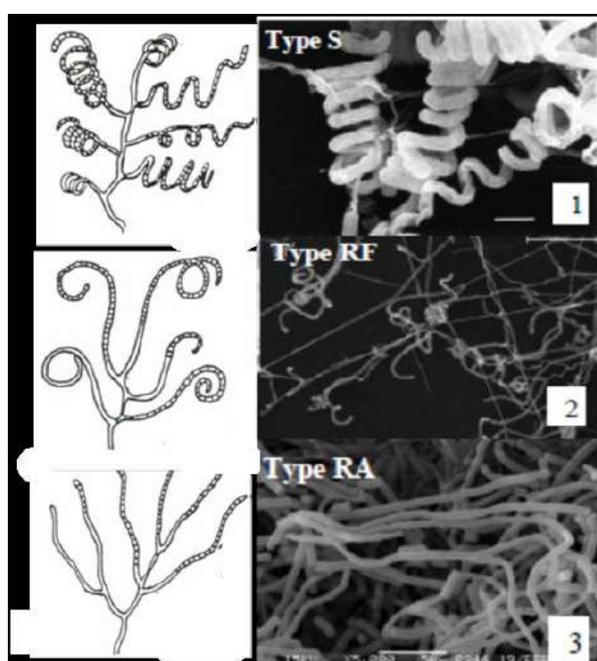


Figure 3. Une comparaison de la micro-morphologie du genre *Streptomyces* (Bergey, 1989 in Aloui, 2014). Les images sont prises au microscope électronique à balayage.

- 1- S (chaînes spiralées),
- 2- RF (chaînes en crochets ou en boucles fermées),
- 3- RA (chaînes de spores droites à flexueuse).

Les actinobactéries sont des décomposeurs primaires des matières végétales résistantes comme l'écorce, les feuilles et les tiges. Ils sont particulièrement efficaces dans la dégradation de la cellulose, de la chitine, et de la lignine. Les espèces du genre *Frankia* forment des

symbioses fixatrices d'azote en associations avec les casuarinacées et d'autres plantes supérieures (Lavelle et Spain, 2001 ; Stolp, 1988).

I.2.1.3. Champignons

Les Champignons du sol ou mycètes sont des levures, des Champignons supérieurs et surtout des moisissures des genres *Penicillium*, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Mucor*, *Trichoderma*... (Fig. 4). Ils peuvent être définis comme des microorganismes hétérotrophes filamenteux et immobiles ; mais l'hétérotrophie est la règle générale, les autres critères ne sont pas absolus (Sablonnier, 2002).

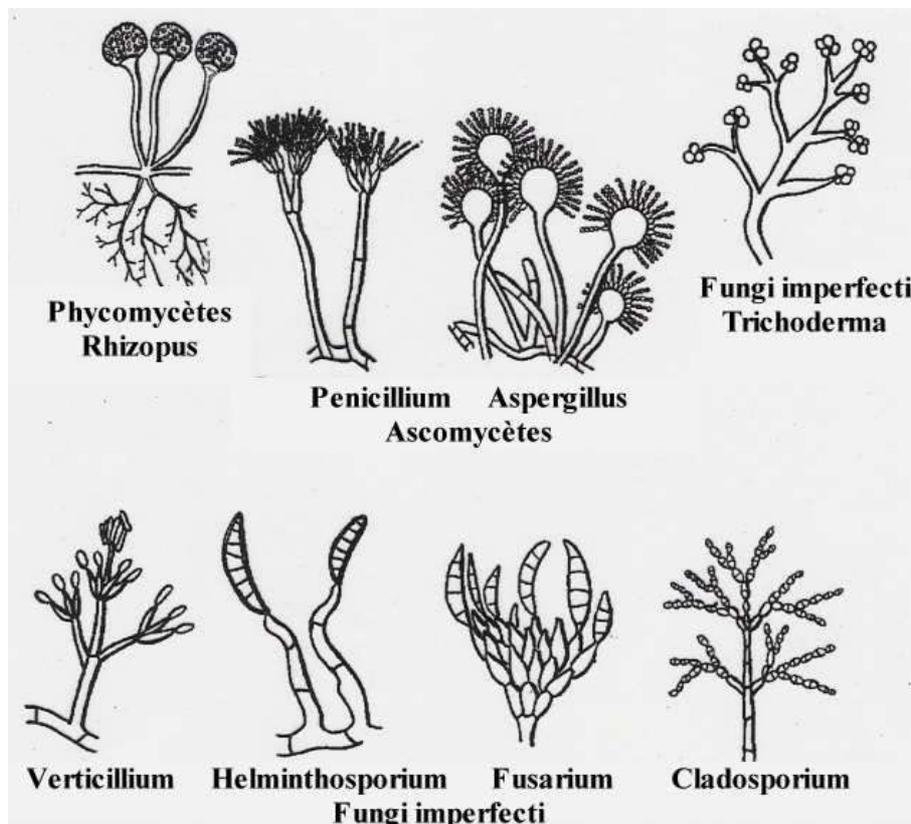


Figure 4. Champignons du sol (Dommergues et Mangenot, 1970)

La plupart sont des Eumycètes, ils ont une paroi chitineuse, et leur organe reproducteur est dépourvu de flagelles. Les Eumycètes sont constitués de quatre principaux groupes qui diffèrent par la structure de leur mycélium et de leur organe reproducteur survivant dans le sol : les Zygomycètes, les Ascomycètes, les Basidiomycètes et les Deutéromycètes (Lavelle et Spain, 2001). La majorité des grands groupes taxonomiques de champignons sont tous hébergés dans le sol (Thorn, 1997). Elles présentent une grande

diversité. Des études estiment le nombre d'espèces à 1,5 million approximativement (Hawksworth et Mound, 1991).

Les champignons sont souvent dominants dans les sols naturels en termes de biomasse (Shields et *al.*, 1973). Ils jouent des rôles très importants dans les cycles des nutriments du sol (Thorn, 1997, Bloem et *al.*, 1994) notamment dans la décomposition de la matière organique. Ils interviennent dans un grand nombre d'interactions mutualistes (mycorhizes, champignon-termites) ; et ont une part importante dans plusieurs relations commensales et compétitives avec les autres organismes du sol. Les champignons jouent un rôle dans le recyclage des déchets, des sécrétions chimiques et excréments des racines des plantes, des animaux et des microorganismes (De Ruyter et *al.*, 1993).

I.3. Fonctionnement microbiologique du sol

Les microbes du sol influencent le fonctionnement des écosystèmes ainsi que la fitness et la diversité des espèces environnantes. Mais qu'en est-il des facteurs influençant le compartiment microbien des sols ?

Les 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 (Trevors et Van Elsas, 1997). Elles constituent les moteurs des différents processus qui se déroulent dans le sol.

I.3.1. Facteurs abiotiques régulant les communautés microbiennes

I.3.1.1. Humidité du sol

Les sols secs ne présentent qu'une activité microbienne faible, cette activité augmente progressivement avec l'augmentation de la teneur en eau du sol. L'excès de l'eau est néfaste à la prolifération de certains groupes microbiens (Morel, 1989).

Selon Boullard et Moreau (1962), l'excès d'eau entraîne une aération anoxie et détermine une sélection des germes. Un manque chronique d'eau entraîne également une sélection, mais la microflore inhibée est évidemment différente de la précédente.

D'après ces mêmes auteurs, la résistance à la dessiccation des microorganismes du sol est très variable. Ce caractère est lié dans une certaine mesure à l'origine des microorganismes. On ne trouve des microorganismes très sensibles à la dessiccation que dans des sols à humidité relativement élevée et constante alors qu'ils sont absents dans des sols soumis à des alternances d'humidité et de dessiccation.

L'humidité est nécessaire à la vie des microorganismes et aussi à leurs déplacements ; la vie sans air est possible puisqu'il existe des êtres anaérobies, mais la vie sans eau ne l'est pas sauf pour la migration, et le développement optimum varie avec l'espèce du microbe considéré et avec la nature des sols (Gausher, 1968).

I.3.1.2. pH du sol

On peut considérer que le pH a une influence sur la composition microbienne du sol. Chaque espèce microbienne est activée entre des limites de pH qui lui sont propre. Ainsi, le développement des bactéries est meilleur entre pH 6 et pH 8, les actinomycètes qui ont un rôle antagoniste vis-à-vis des champignons, sont particulièrement sensibles à l'acidité, ils préfèrent des pH 6 à 7.5 (Soltner, 2003).

Les champignons supportent généralement les pH acides ; dans de telles conditions, ils sont plus compétitifs que les bactéries pour l'exploitation d'un substrat. Cependant, on ne doit pas pour autant les considérer comme des acidophiles, ils se développent dans des limites de pH assez large (2 à 9) (Alexander, 1982). Les diatomées prédominent dans les sols neutres ou alcalins, les algues jaunes verts et chlorophycophytes dans les sols acides (Sablonnier, 2002). L'influence du pH du sol est soulignée dans les effets de l'apport de chaux ou de carbonate de calcium sur la population microbienne.

I.3.1.3. Température du sol

La température des sols est également un facteur déterminant dans la distribution et l'activité des micro-organismes, en particulier pour les processus d'ammonification et de nitrification. Cette température affecte non seulement la physiologie des micro-organismes, mais influencent aussi les mouvements d'eau et la diffusion des gaz et des nutriments (Standing et Killham, 2007). Les micro-organismes ne montrent pas tous la même tolérance face à la température. On distingue ainsi les cryophiles se développant dans des températures comprises entre -5°C et 5°C, les psychrophiles supportant des températures allant de 5 à 15 °C

; des mésophiles, qui tolèrent des températures de 15 à 45 °C ; des thermophiles supportant des températures de 65 à 95°C (Standing et Killham, 2007) et des hyper thermophiles tolérant des températures allant de 80°C jusqu'à 130°C.

I.3.1.4. Énergie lumineuse

L'énergie lumineuse a un effet principalement indirect, *via* la stimulation de la germination et de la croissance de la végétation. Elle peut cependant avoir une action directe sur les microorganismes phototrophes (Standing et Killham, 2007).

I.3.1.5. Facteurs énergétiques

Certains germes réagissent à l'addition au sol d'un quelconque aliment. Pour un temps déterminé leur activité est alors stimulée aux dépens d'autres espèces. Ainsi donc des apports énergétiques altèrent provisoirement les équilibres microbiens dans les sols et toute action qui modifiera la quantité ou la qualité de la source d'énergie, c'est-à-dire de carbone ou qui affectera ses modalités d'emploi, bouleversera fatalement et plus ou moins profondément la microflore (Boullard et Moreau, 1962).

On peut schématiquement représenter un écosystème par un diagramme dans lequel le sol constitue un compartiment qui reçoit la majeure partie de son énergie des plantes vertes, qui ont, elles même capté l'énergie solaire. Ce flux d'énergie provient aux microorganismes du sol par des voies complexes dont les deux principales sont constituées par l'apport de débris végétaux (litière des parties aériennes, résidus de racines, exsudats racinaires) et par l'apport de déjections animales ou de cadavres animaux (Sasson, 1967).

La qualité de cette matière organique est très variable, allant de composés facilement dégradables (comme les monomères glucidiques solubles) à d'autres récalcitrants (polymère insolubles comme la lignine). Les caractéristiques de la matière organique peuvent en outre affecter les propriétés physico-chimiques du sol, comme le pH.

I.3.1.6. Salure

Dans leur habitat naturel, les micro-organismes sont fréquemment exposés à des variations de pression osmotique du milieu environnant. En effet, la salinité élevée du sol peut interférer avec la croissance et l'activité des bactéries. La concentration de la solution en sels

entraîne une augmentation de la pression osmotique. Celle-ci inhibe le développement des microorganismes (Halitim et Dellal, 1992). Une diminution de l'activité microbienne dans les sols salins conduit à une accumulation de la matière organique non dégradée, ce qui agit négativement sur la disponibilité des nutriments nécessaires à la croissance végétale (Zahran, 1997).

La complexité de l'effet de la salure dans le sol sur les microorganismes est telle qu'il est difficile de tirer des conclusions générales des travaux, d'ailleurs assez peu nombreux, consacrés à la biologie des sols salés.

De tous les processus biologiques, la nitrification est la plus touchée, ainsi que le dégagement de CO₂. Selon Mallouhi et Jacquin, 1986 *in* Dellal et Halitim, 1992, ces deux processus subissent à la fois l'influence des paramètres de la salinité (concentration des sels, nature des ions, pH) et ceux de la sodicité (SAR, ESP).

L'inhibition de l'activité biologique par les sels se traduit par une forte teneur en composés hydrosolubles très mobiles au détriment des composés plus polycondensés.

I.3.1.7. Texture

L'action des microorganismes dépend de la texture du sol. Dans les sols sableux, l'agrégation est faiblement reliée à la biomasse microbienne et à leurs produits de synthèse ; seuls les hyphes fongiques peuvent agréger ce type de sol. Par contre, dans les sols argileux, les champignons et les bactéries ainsi que leurs substances de synthèse jouent un rôle dans l'agrégation (Annabi, 2005). De plus dans les sols sableux, la perte de la matière organique est très importante, du fait qu'ils sont trop aérés et que la matière organique s'y décompose plus rapidement ce qui n'est pas le cas dans les sols argileux qui assurent une protection physique de la matière organique.

I.3.1.8. 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 microbienne et minéralisation de l'azote (Hassink et *al.*, 1994).

I.3.1.9. 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 qualité structurale du sol est fortement influencée par la valeur du pouvoir d'oxydoréduction de ce sol. Cette valeur oriente la nature et l'intensité de la population microbienne (Dommergues et Manganot, 1970).

De la formation et de la rupture des agrégats résultent deux actions possibles, opposées quant à leurs conséquences :

- L'inclusion des substances organiques à l'intérieur d'un agrégat, le rend temporairement inaccessible aux microorganismes ;
- La rupture des agrégats par broyage stimule la minéralisation rendue d'autant plus aisée que la dimension des agrégats est plus grande (Morel, 1996).

La structure du sol la plus favorable à la prolifération des microorganismes est la structure particulaire du fait qu'elle agit directement sur l'aération, la circulation et la teneur en eau.

I.3.1.10. Travail du sol

Les microorganismes du sol se développent au dépend de la matière organique, l'activité biologique est donc étroitement dépendante de la localisation des matières organiques assimilables, comme les résidus de récolte.

L'activité biologique sera ainsi distribuée de façon plus ou moins homogène dans l'horizon labouré ou bien d'avantage concentré en surface, selon le type de travail du sol pratiqué (Morel, 1996).

I.3.1.11. Influence des saisons

Le nombre total des microorganismes dans le sol présente deux maxima au cours de l'année: le plus net au printemps (Mars et Avril), en rapport avec l'élévation thermique qui succède au froid de l'hiver et un autre moins net en automne (Octobre), en liaison avec l'accroissement des aliments mis à la disposition des germes par la mort des plantes annuelles et la chute des feuilles. Le minimum le plus accentué est en hiver (froid et rythme vital général), mais il y a également une légère baisse en été (Morel, 1996). Connaissant les conditions climatiques des régions sahariennes, la densité microbienne dans les sols soumises à ces conditions présente un maximum à la fin du mois de Février et au début de mois de Novembre.

I.3.1.12. Influence des travaux agricoles

Ils ont dans l'ensemble une action favorable sur la pullulation des microorganismes, corrélativement avec leur action sur les végétaux mis en culture.

L'activité des micro-organismes, soit le déstockage des matières organiques, est stimulée par les pratiques culturales comme la fertilisation, l'irrigation ou le travail du sol (Annabi et *al.*, 2009).

I.3.1.13. Chaux et engrais acidogènes

L'addition de chaux aux sols acides ou d'engrais acidogènes (sulfate d'ammoniaque ou soufre élémentaire par exemple) aux sols alcalins entraîne une modification considérable de la microflore, les processus sont d'ailleurs difficiles à préciser : directement en modifiant le pH et en permettant ainsi à certaines espèces très strictes à ce facteur de se proliférer ; indirectement en provoquant la floculation ou la solubilisation de certains éléments organiques ou minéraux du sol (Morel, 1996).

I.3.1.14. Amendements et fumures organiques

L'addition de fumier entraîne toute une série de phénomènes extrêmement complexes ; celui-ci enrichit le sol, d'une part en matière organique et minérale, d'autre part en germes

spéciaux, ceux de la flore des fumiers, essentiellement coprophiles. Le rôle de ces germes est d'ailleurs transitoire, au fur et à mesure de la destruction du fumier dans le sol et du mélange plus intime de celui-ci avec la terre, ils disparaissent peu à peu pour être remplacés par la flore normale du sol (Morel, 1996).

La fumure avec des engrais verts n'aura pas la même influence sur la microflore du sol car, dans ce cas, l'apport en germes, d'une part est faible, et d'autre part les tissus végétaux n'ont pas subi de fermentation préalable et contiennent tous leurs éléments (Morel, 1996).

I.3.2. Facteurs biotiques régulant les communautés microbiennes

I.3.2.1. Le compartiment aérien

Le sol est perpétuellement enrichi par la matière organique provenant des organismes du compartiment aérien, dont les plantes sont les principaux contributeurs. Ces entrées de ressources sont variables et leur qualité et quantité sont intrinsèquement liées à la nature de la végétation sus-jacente. En effet, les végétaux peuvent être classés selon leurs traits fonctionnels, leurs caractéristiques morphologiques, biochimiques et reproductives (taux de croissance, absorption des nutriments, dégradabilité...). Ces traits covarient avec les conditions environnementales par effet de rétroaction (Eviner et Chapin, 2003). A l'échelle de la communauté, le type de réponses/effets face aux contraintes environnementales est principalement porté par les espèces dominantes qui constituent une part importante de la biomasse (Grime, 1998). Ainsi, les contraintes environnementales et les groupes fonctionnels dominants déterminent le fonctionnement des écosystèmes, notamment à travers la production primaire et la décomposition (Grime, 1998).

Ces traits fonctionnels influencent donc la qualité et la quantité de litière. Or, la qualité des ressources du sol influence de manière significative les communautés microbiennes (Zhou et al., 2002; Wardle et al., 2004; Chapman et al., 2006; Lauber et al., 2008 in Zinger, 2009). De plus, l'augmentation de la récalcitrance de la matière organique provoque une diminution de la biomasse microbienne, et pourrait parallèlement résulter en une augmentation de la diversité fonctionnelle de ces communautés (Hopkins et Gregorich, 2005). Cependant, l'impact de la qualité de la litière, et indirectement celui de la diversité fonctionnelle des communautés végétales, sur la diversité et le recrutement des espèces microbiennes restent encore mal caractérisés.

La productivité du milieu, ou l'apport des ressources, régulent la diversité des macroorganismes. Cette relation est unimodale, et le maximum de diversité est atteint à des niveaux intermédiaires de productivité. Il semble que cette relation productivité-diversité soit similaire chez les micro-organismes tant bien en milieu aquatique (Horner-Devine et *al.*, 2003), qu'en milieu terrestre (Waldrop et *al.*, 2006).

La composition de la végétation peut aussi influencer les communautés microbiennes, particulièrement celles associées aux racines soit par leur capacité à sécréter des métabolites secondaires antimicrobiens, soit par leur vulnérabilité face aux pathogènes, soit enfin par les associations qu'elles établissent avec les micro-organismes, comme les mycorhizes.

Cependant, l'association entre une espèce hôte et une espèce microbienne est rarement obligatoire (Gardes et Dahlberg, 1996) et il est difficile de statuer sur l'existence d'une relation entre la diversité en espèce des communautés végétales, et celle des micro-organismes du sol. En effet, bien qu'il semble exister une relation entre la diversité des communautés végétales et celle des communautés microbiennes (Wardle et *al.*, 2004), cette relation dépend du contexte de l'étude. Par exemple, Waldrop et *al.* (2006), n'ont pas observé d'effet direct de la diversité des communautés végétales sur la diversité des champignons du sol.

La végétation influence aussi ces communautés à une échelle locale, dans la rhizosphère. En effet, les racines des plantes contribuent à la structuration du sol, se renouvèlent en permanence, et produisent des exsudats (carbohydrates, acides organiques, acides aminés) dont la qualité et la production sont variables dans le temps et selon la plante, (Bais et *al.*, 2006; Standing et Killham, 2007). En effet, le stade de développement de la plante et la rhizodéposition ont un impact significatif sur la structure des communautés microbiennes de la rhizosphère de *Medicago truncatula*, *Chrysanthemum* et *Lolium multiflorum* (Duineveld et *al.*, 2001; Butler et *al.*, 2003; Mougél et *al.*, 2006 in Zinger, 2009).

I.3.2.2. Le compartiment sous-terrain

Les communautés microbiennes du sol sont également fortement influencées par les interactions qu'entretiennent les espèces du compartiment souterrain. Ces interactions ont lieu à une échelle bien inférieure à celle des animaux ou des végétaux. En effet, la structure du sol partitionne les communautés microbiennes dans des micro-niches. Ces « îlots » de

populations microbiennes peuvent être connectés par des mouvements d'eau, par la croissance de racines des plantes ou celle du mycélium fongique, et par la mobilité de la faune du sol. La fragmentation des communautés microbiennes du sol et leur degré de connectivité sont déterminantes dans leurs interactions physiques, biochimiques, et trophiques (Van Elsas et al., 2007).

Les interactions biotiques sont habituellement classées le long d'un continuum entre les bénéfiques et les pertes résultant de l'interaction. Précisons ici que la nature de ces interactions n'est pas toujours fixe, et qu'elle peut se déplacer le long du continuum parasitisme/mutualisme au cours de l'existence des protagonistes de l'interaction (Johnson et al., 1997). Dans la catégorie des interactions antagonistes se classent la prédation et le parasitisme, dans lesquels l'un des protagonistes gagne un avantage aux dépens de l'autre.

Citons par exemple les champignons trappeurs de nématodes (Van Elsas et al., 2007), la mycophagie bactérienne (De Boer et al., 2005), ou l'infection d'une population bactérienne par des bacteriophages. Ces interactions peuvent être cycliques puisqu'elles peuvent entraîner une diminution de la densité d'hôtes/proies et ainsi réduire la densité de parasite/prédateurs (Van Elsas et al., 2007).

Ces interactions antagonistes comprennent aussi la compétition pour l'occupation de l'espace et l'exploitation des ressources. Par exemple, les bactéries et les champignons sont les acteurs principaux de la dégradation de la matière organique du sol et constituent la base vivante des chaînes trophiques du sol (Bardgett, 2005). Il existe donc un recouvrement entre les niches bactériennes et fongiques. En conséquence, ces deux taxons se mènent une « guerre froide », où la diminution de la croissance de l'un entraîne une augmentation de la croissance de l'autre (de Boer et al., 2005; Rousk et al., 2008). Cette compétition s'effectue principalement par la production respective d'antibiotiques ou d'inhibiteurs de croissance (phénomènes appelés Fongistase et Bactériostase), qui peuvent interférer avec la synthèse de la paroi cellulaire ou de protéines ou encore affecter l'intégrité de la membrane cellulaire ou le métabolisme de l'acide nucléique (Van Elsas et al., 2007). Notons que ces phénomènes de compétition sont impliqués dans la spécialisation aux niches écologiques chez des populations de *Pseudomonas fluorescens*, et ont donc un effet potentiellement positif sur la diversité microbienne des sols (Rainey et al., 2005).

Parallèlement, les micro-organismes du sol peuvent entretenir des relations positives et plus ou moins obligatoires. Par exemple, les phénomènes de facilitation sont courants et se retrouvent typiquement dans les relations trophiques. Cette facilitation s'opère lorsqu'un taxon modifie le milieu de façon avantageuse pour d'autres sans pour autant affecter sa propre fitness. Dans ce contexte, la dégradation de la matière organique résulte d'une coopération métabolique entre les populations microbiennes, où certaines d'entre elles sont capables de métaboliser un composé dont les métabolites peuvent être utilisés par cette même population et/ou par d'autres. Ce type d'interaction est courant entre bactéries et champignons puisque ce sont ces derniers qui sont principalement impliqués dans la dégradation de substrats complexes tels que les lignocellulosiques (De Boer et *al.*, 2005). En outre, des études ont montré des cas de stimulation de la germination de spores fongiques par certaines bactéries.

Parmi les différents mécanismes impliqués, citons l'activité chytinolytique de bactéries dégradant la paroi de la spore fongique (De Boer et *al.*, 2005).

Enfin, certaines populations microbiennes entretiennent des relations obligatoires dont les deux protagonistes tirent bénéfice. Par exemple, l'un des facteurs de virulence du champignon pathogène du riz, *Rhizopus microsporus*, provient des bactéries qu'il abrite (Partida-Martinez et *al.*, 2007) et peut causer même des infections nosocomiales. De même, de nombreux champignons mycorhiziens arbusculaires abritent des endosymbiontes bactériens du genre *Burkholderia* possédant des gènes codant pour la nitrogénase, enzyme responsable de la fixation de l'azote atmosphérique.

Cette symbiose consisterait en un échange d'éléments azotés fournis par la bactérie contre un apport de phosphore provenant du champignon (Minerdi et *al.*, 2002).

I.3.2.2.1. Interactions entre organismes du sol (Le réseau trophique du sol)

Un réseau trophique est défini comme une chaîne d'interactions consommateur-ressource entre différents groupes fonctionnels d'organismes (Bloem et *al.*, 1997). Dans le sol, les réseaux trophiques incluent les microorganismes (bactéries et champignons principalement), les protistes, nématodes et quelques acariens.

Les interactions entre les microorganismes et les nématodes surviennent principalement à l'intérieur du film d'eau des espaces porales du sol, et des films d'eau qui couvrent les particules solides. Ces interactions dépendent de l'humidité du sol, de sa porosité,

lesquels dépendent de la texture. La texture et la porosité du sol sont des déterminants importants de la structure des réseaux trophiques (Lavelle et Spain, 2001). La présence de ressources organiques et la capacité des organismes de se déplacer à travers les microsites du sol sont aussi des conditions favorables pour l'établissement de ces réseaux. Ces microsites se trouvent particulièrement dans la rhizosphère, où les racines des plantes fournissent l'énergie nécessaire aux bactéries et aux bactérivores (Djigal, 2003).

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 (antagonisme ou antibiose), 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.

I.3.2.2.2. Interactions entre les microorganismes et les plantes

I.3.2.2.2.1 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 UFC g^{-1} de sol sec 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 (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 de 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.

I.3.2.2.2.2 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.

I.3.2.2.2.2.1. 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 (Djigal, 2003).

I.3.2.2.2.2.2. 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, césalpinaciées) et des *Frankias*, bactéries filamenteuses sporulantes associées à des plantes dites actinorhiziennes comme les Casuarinacées (Djigal, 2003).

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). 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).

Chapitre II. L'écosystème oasien

II.1. Présentation de l'écosystème oasien

Le concept oasis est défini principalement sur la base climatique. L'oasis est présentée ainsi : « Une oasis (du grec ancien), désigne une zone de végétation isolée dans un désert. Ceci se produit à proximité d'une source d'eau ou lorsqu'une nappe phréatique est suffisamment proche de la surface du sol ou parfois sur le lit de rivières venant se perdre dans le désert » (Lazarev, 1988).

L'eau constitue ainsi une condition préalable, sans laquelle l'oasis ne peut pas exister. Avec les deux autres ressources vitales (sol, végétaux), l'eau a permis la création d'un écosystème unique et original, situé dans des zones désertiques. « L'attraction qu'exercent l'eau et la verdure confère à cet espace les caractéristiques d'un refuge et d'un lieu de vie pour des nombreuses espèces végétales et animales » (Lazarev, 1988). Le microclimat oasien est favorable au développement d'une flore très diversifiée. Les oasis abritent également une faune riche en petits mammifères, reptiles, mollusques et insectes, et une faune associée, composée pour l'essentiel d'oiseaux transsahariens, migrateurs et hivernants d'intérêt international (UNESCO, 2003).

C'est dans cet espace aussi que l'homme s'établit et subsiste et développe des activités diverses. Son alimentation dépend beaucoup des produits de l'oasis et son habitat est lié aux produits et sous-produits oasiens.

Résultat d'une combinaison ingénieuse de modes de gestions et des techniques basés sur un savoir ancestral, les agrosystèmes oasiens sont le témoignage de la capacité des êtres humains à composer avec les contraintes naturelles du milieu dans un processus évolutif conjoint êtres humains/nature (Hamdi-Aissa et *al.*, 2010).

La pérennité de ce système repose sur une gestion rigoureuse de l'écosystème tirant avantage des ressources locales rares en terres et en eau (Bechraoui, 1980 ; Toutain et *al.*, 1990). Les hommes ont contribué, grâce à une relation d'équilibre et à un système d'irrigation collective, à l'existence et à la pérennité de ces agro-écosystèmes oasiens. Cet ensemble des paramètres (ressources naturelles, végétales, animales, et humaines) constitue ainsi les piliers interdépendants du système oasien.

II.2. Les composantes biologiques du système oasien

Le microclimat oasien permet l'existence d'une importante diversité végétale, elle-même génératrice d'une grande diversité animale. En effet la présence du palmier dattier rend possible l'existence d'autres cultures en jouant le rôle de brise vent, en fournissant de l'ombre et en diminuant le degré de sécheresse de l'air.

II.2.1. Les cultures oasiennes

Les faibles ressources en eau et l'aridité environnante obligeaient depuis la naissance des oasis à une occupation intensive des parcelles qui se sont matérialisées dans les oasis traditionnelles par un système de culture à trois étages. Sous les palmiers, poussent les arbres fruitiers alors que le troisième étage, totalement à l'ombre est celui des cultures maraichères et fourragères (Zella et Smadhi, 2006) (Fig. 5). De plus, les impératifs d'une économie vivrière imposaient la diversification des cultures et des productions agricoles, ce qui explique la grande diversité de la flore oasienne.

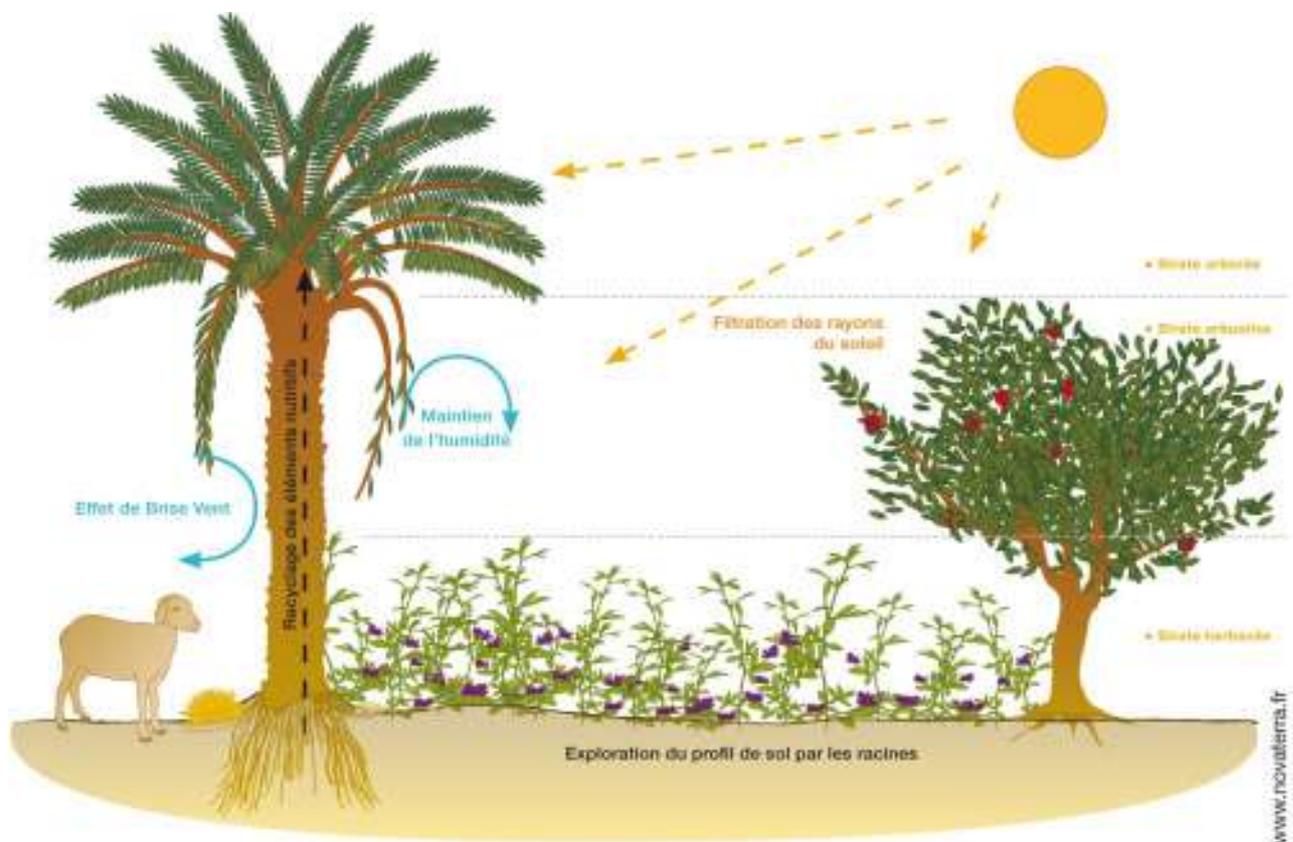


Figure 5. Structure d'une oasis traditionnelle à trois étages

II.2.1.1. Le palmier dattier

Le palmier dattier est le pilier principal de l'écosystème oasien. Il permet une pérennité de la vie dans les régions désertiques où, sans lui, elle serait impossible, même en présence d'eau (Daddi Bouhoun, 2010).

La population de palmiers dattiers est issue souvent d'une multiplication naturelle par graines de pieds de dattiers sélectionnés par la suite par les agriculteurs oasiens. De ce fait, dans toutes les oasis il existe une diversité très grande des cultivars sélectionnés. Dans le monde il existe près de 2000 cultivars (El Bekr, 1972).

Le palmier dattier joue le rôle d'ombrage à différentes autres cultures par son aspect parasol et son dégagement au sol permettant la cohabitation de l'espace par d'autres végétaux : arbres fruitiers et cultures herbacées diverses.

II.2.1.2 Les arbres fruitiers

L'homme a intégré dans la palmeraie la culture à étage afin d'optimiser la rentabilité. Ainsi, une multitude d'espèce d'arbres fruitiers poussent à l'ombre des palmiers dattiers et constituent le deuxième étage de ce système de culture. Parmi elles, les principales espèces sont représentées par le grenadier, l'abricotier et le figuier et la vigne de table. Il y a d'autres espèces qui sont moins cultivées, mais tout autant connues depuis l'antiquité, comme le pommier, le poirier, le pêcher et le mûrier (Zella et Smadhi, 2006 ; Ben Salah, 2014).

II.2.1.3. Les cultures de l'étage inférieur

D'après Toutain (1973), plusieurs raisons ont conduit le phoeniculteur à opter pour l'installation des cultures vivrières sous ses palmiers ainsi qu'au maintien d'un cheptel réduit afin de satisfaire en priorité son autoconsommation. Les cultures retrouvées presque partout dans les palmeraies en période hivernale sont : le blé, l'orge, l'oignon, la fève, les carottes, le navet, les plantes médicinales et aromatiques telles que la coriandre et la menthe. Durant la période estivale, on cultive le mil, le sorgho, le maïs et des cultures maraichères (poivron, tomate, courge...). Dans certaines palmeraies telles que celle de Reggane (région d'Adrar), on cultive surtout du tabac et aussi beaucoup de tomate (cultures rentables). D'autres cultures peuvent être cultivées aussi dans les oasis comme le coton, le henné, le carthame, la lentille, la salade, l'ail...etc (Rahal Bouziane et *al.*, 2010).

II.2.2. La végétation naturelle

Du fait de son emplacement aux contours de zones arides et sèches et tirant avantage de la présence d'eau, une population de nombreuses espèces végétales naturelles (annuelles bisannuelles ou pérennes) prend place dans l'écosystème oasien. Certaines entourent l'espace de production et profitent aux oasiens, à travers des usages multiples : condimentaire et médicinal, d'autres constituent des mauvaises herbes que les agriculteurs oasiens combattent tout le temps pour réduire leur concurrence sur l'eau avec les espèces cultivées.

II.3- La gestion de l'eau dans les oasis

Les systèmes et paysages oasiens sont intimement liés à l'action de l'homme. Les oasis constituent une forme très élaborée d'irrigation collective et dont la conception est très ancienne (Ben Salah, 2014). Le système d'irrigation est basé sur la mise en commun et le partage des eaux des différentes sources entre les parcelles par un réseau complexe de canaux d'irrigation (Bechraoui, 1980). Le partage de l'eau entre les membres de la communauté se fait en unité de temps, selon la technique subtile des tours d'eau, en cours dans de nombreuses Oasis (Zella et Smadhi, 2006).

II.4. L'écosystème oasien en Algérie

Les oasis Algériennes sont majoritairement occupées par le palmier (Zella et Smadhi, 2006), et se localisent en grande partie dans le nord du Sahara, où les conditions climatiques semblent être plus favorables pour l'épanouissement de cette culture. A Adrar, le palmier domine la totalité de la surface, à Ouargla le taux d'occupation du palmier est de 80%, il est autour de 50 à 60 % pour le reste des Oasis (Guillermou, 1993 ; Toutain et *al.*, 1988).

Les Oasis algériennes représentent une mosaïque trop variée, avec 93.000 ha de palmeraies et plus de 10 millions de palmiers dattiers, soit 11% du total mondial (Bouzaher, 1990). Elles sont réparties pour 60% au Nord-Est (Zibans, Oued Righ, El Oued et Ouargla) et pour 40% au Sud-Ouest (M'Zab, Touat et Gourara). Les Oasis sont tantôt isolées, de taille plus au moins morcelés comme l'Oasis de Ouargla, qui compte elle seule plus d'un million de palmiers, tantôt regroupées comme celles de Oued Righ en 47 Oasis s'échelonnent sur 150 km avec 1,7 millions de palmiers (Bouzaher, 1990).

Chapitre II. L'écosystème oasien

Le contrôle de l'eau constitue donc un pilier central dans cette organisation collective très hiérarchisée, expression d'un consensus général dans certain cas, mais plus d'un rapport de force dans d'autres (Battesti, 1996). Verticalement, l'espace connaît trois strates végétales dans la quasi-totalité des Oasis. Sous les palmiers, poussent les arbres fruitiers alors que le troisième étage, totalement l'ombre est celui des cultures maraichères et fourragères.

Horizontalement, la structure foncière se présente comme un puzzle au sein de l'Oasis (Battesti, 1996).

Le type d'Oasis dépend de la nature et de l'exploitation de la ressource en eau, de la nature du sol et de sa topographie. On distingue dans cette étude quatre types :

1. l'Oasis située dans les dépressions de l'erg, l'eau d'irrigation est extraite de la nappe phréatique par puits et forage (Oasis de Ouargla).
2. l'Oasis située dans des Ghoûts ou l'eau d'irrigation est puisée par capillarité (Oasis d'El Oued).
3. l'Oasis fluviale, approvisionnée en eau des oueds (Oasis du Ghoufi, du M'Zab, de Oued Bachar).
4. l'Oasis de dépression alimentée en eau par les foggaras (Oasis d'Adrar, Timimoun).

II.4.1. Notion du système de culture

Selon Gras (1990), « un système de culture se définit pour une surface de terrain traitée de façon homogène, par les cultures pratiquées, leur ordre de succession et les itinéraires techniques (combinaison logique et ordonnée des techniques culturelles) mis en œuvre ». Le système de culture est un concept qui peut s'appliquer à différentes échelles spatiales (Jouve, 2003).

II.4.2. Principaux systèmes de culture dans la région de Ouargla

Dans les régions sahariennes les systèmes culturels reposent sur des associations complexes entre le palmier dattier, des arbres fruitiers plantés à l'ombre de celui-ci, et une gamme très diversifiée de cultures au sol. Ces systèmes s'inscrivent dans une logique d'autosuffisance alimentaire (Guillermou, 2014).

L'agriculture dans la région de Ouargla est dominée par la culture du palmier dattier dont la pratique remonte à des siècles. La phœniciculture est souvent intercalée par d'autres types de cultures grâce au microclimat qui favorise la coexistence de ce type de culture (Baouia, 1998). Selon Bouammar et Bekhti (2008), l'agriculture dans cette région se distingue par deux systèmes agricoles :

- Les anciens systèmes agricoles, ou l'agriculture dans les anciennes palmeraies, qui sont l'objet d'une dégradation importante et qui impliquent l'intervention de l'Etat par un soutien aux agriculteurs pour des impératifs écologiques, sociaux, économiques et culturels.
- Le nouveau système agricole ou les nouvelles palmeraies qui sont créées dans le cadre de la mise en valeur des terres agricoles et des différents programmes de développement. Deux types d'agriculture peuvent être distingués dans ces nouveaux espaces :
 - le premier type à travers l'extension des palmeraies qui a donné naissance à une agriculture «périurbaine» ou encore petite mise en valeur parce que constitué de petites et moyennes exploitations,
 - le deuxième type que l'on qualifie de grande mise en valeur à travers de vastes programmes de concession.

L'agriculture dans la région d'Ouargla a connu une évolution rapide et des mutations, grâce aux efforts entreprise par les pouvoirs de croissance économique et les développements socio-économiques.

II.4.2.1. La phœniciculture

Le patrimoine phœnicicole en Algérie est estimé, en 2003, à 15,1 millions de palmiers se caractérise par une diversité exceptionnelle aussi bien dans les variétés cultivées que les techniques utilisées. C'est dans le Nord-Est du Sahara que l'on trouve les $\frac{3}{4}$ du patrimoine phœnicicole : région des Ziban, l'Oued-Righ et la cuvette de Ouargla. Comme la culture dans la région de Ouargla se repose essentiellement sur la culture de palmiers dattier, la phœniciculture a connu une extension et surtout depuis l'avènement de la mise en valeur (Bouguedoura et *al.*, 2015).

II.4.2.2. La serriculture

C'est la culture en serres, elle est largement répandue dans cette région grâce à son bénéfice très rentable et à la disponibilité des produits comme les films plastiques, et la faible superficie du modèle de serre qui permet de les placer à côté des palmiers et dans d'autres espaces libres dans une exploitation.

La serriculture est développée surtout dans certaines grandes exploitations céréalières. Étant donné que la rentabilité économique du palmier dattier est tardive (au moins 7 à 8 ans), afin de favoriser la fiabilité et la durabilité des projets de mise en valeur, l'État a introduit une nouvelle action, consiste en acquisition des armatures de serre ce qui a pour conséquence de permettre aux bénéficiaires la compensation des charges liées à leur activités avant l'entrée en production des cultures pérennes (Dadda Moussa et Bouhafs, 1995).

II.4.2.3. La céréaliculture

La céréaliculture était pratiquée depuis fort longtemps dans les oasis (sous palmier), mais destinée principalement à l'autoconsommation. Depuis l'avènement de la loi 83/18 portant accession à la propriété foncière agricole (APFA), de nouvelles exploitations céréalières dites modernes, de tailles assez importantes et utilisant la technique d'irrigation par centre pivot, ont été implantées principalement au niveau de la commune de Hassi Messaoud (Gassi Touil), Hassi Ben Abdellah et Ain Beida. Deux facteurs ont principalement contribué à l'implantation de la céréaliculture hors palmeraie dans les régions sahariennes : l'existence de vastes superficies ayant un sous-sol très riche en aquifères et l'énorme soutien de viabilisation accordé par l'État pour une culture dite stratégique (Dadda moussa, 2007).

Chapitre 3. Généralités sur les sols sahariens

III.1. Définition des Sols des zones arides

Les sols arides sont l'un des ordres des sols les plus répandus au monde, et les plus caractérisés par leurs carences en eau. La plupart des sols arides contiennent des quantités suffisantes d'eau pour soutenir la croissance des plantes pour un maximum de 90 jours consécutifs (Mathieu et Pielain, 2009).

III.2. Caractéristiques générales des Sols des zones arides

Dans les régions arides les sols, en général, présentent un certain nombre de caractères constants :

- Les sols du Sahara sont essentiellement des sols minéraux dans le sens où, en dehors des oasis, la fraction organique y est très faible voire nulle. Sur les topographies élevées, les sols sont rocailloux ou sableux (Hamadas, regs, ergs). Dans les dépressions, la texture peut être fine, mais les sols sont salés (Sebkha et Chotts).
- Évolution lente, faible teneur en matière organique, souvent inférieure à 0,1 % (Daoud et Halitim, 1994). Cette faible teneur résulte de la rareté de la végétation et de la faible biomasse.
- structure faiblement définie et en général, présences des croûtes calcaires, gypseuses et d'autres salines (Aubert, 1960).
- La qualité physique, chimique et biologique des sols sahariens posent à la fois des problèmes d'ordre agronomiques (aptitude culturale faible) et environnementaux (érosion et ruissellement de surface).
- Les sols arides sont caractérisés par un lessivage significatif des nutriments et une érosion intensive des minéraux.
- Dans les zones arides et semi-arides, la productivité des sols dépend de la capacité de rétention d'eau qui tend à augmenter avec la profondeur et le contenu organique. La capacité de rétention d'eau des sols sableux est inférieure à celles des sols argileux.

Les zones arides sont des régions où les précipitations sont moindres que l'évapotranspiration au moins durant une période plus ou moins longue de l'année (Robert, 1996). D'après Emberger, (1955) on peut distinguer trois domaines d'aridité d'après la

pluviométrie annuelle :

- le domaine hyperaride ($P < 100\text{mm}$)
- le domaine aride ($100 < P < 300-400\text{mm}$)
- le domaine semi-aride ($300-400 < P < 600\text{mm}$).

En Algérie la zone aride représente près de 95% du territoire national dont 80% dans le domaine hyperaride (Halitim, 1988).

III.3. Principaux sols dans les régions arides

Dans les régions arides, les sols, d'une manière générale, posent d'énormes problèmes de mise en valeur. Ils présentent souvent des croûtes calcaires ou gypseuses et sont la plupart du temps salés et sujets à l'érosion et à une salinisation secondaire (Aubert, 1960). Parmi les principaux types des sols de ces régions (sols salés, sols calcaires, sols gypseux.)

III.3.1. Les sols salés

Les sols salés sont ceux dont l'évolution est dominée par la présence de fortes quantités de sels solubles (plus solubles que le gypse) ou par la richesse de leur complexe absorbant en ions provenant de ces sels et susceptibles de dégrader leur caractéristiques et leurs propriétés physiques, en particulier leur structure, qu'ils rendent diffuse (Aubert, 1983).

III.3.2. Les sols calcaires

Le terme «calcaire» est un terme général qui s'applique à un sol contenant du CaCO_3 libre en quantité suffisante pour présenter une effervescence visible sous l'action d'HCl dilué et à froid (Lozet et Mathieu, 2011 ; Baize et Girard, 1992; Baize et Djabiol, 2011). Il est considéré également comme «calcaire» un sol non calcaire dans la terre fine mais qui contient des graviers et cailloux calcaires en grand nombre dans sa masse (Baize et Girard, 1992). En outre le référentiel pédologique [1992] d'après les mêmes auteurs propose deux qualificatifs additionnels :

- une terre dite hypo calcaire : moins de 15% de CaCO_3 .
- une terre dite hyper calcaire : plus de 40% de CaCO_3 .

III. 3.3. Les sols gypseux

Le terme "sol gypseux" est utilisé dans plusieurs sens selon la source consultée. La légende révisée de la carte du sol du monde (FAO, 1988) définit "sol gypseux" quand il contient

5 % ou plus du gypse. La présence du gypse dans les sols affecte la plupart de leurs propriétés, causant des problèmes, chimiques et des problèmes de fertilité (Mashali, 1996).

III. 3.4. Les sols peu évolués

Sols caractérisés essentiellement par la faible altération du milieu minéral et dans la majorité des cas, la faible teneur en matière organique avec un profil de type AC (Lozet et Mathieu, 2011).

Deuxième partie

**Conditions limitrophes de
l'activité microbienne du sol
dans la région de Ouargla et
cadre de l'étude**

Chapitre IV. Conditions limitrophes de l'activité microbienne du sol dans la région de Ouargla

Les palmeraies dans le Sahara algérien, bien qu'elles soient différentes par leur importance et leur vocation, sont caractérisées par la fragilité de leur écosystème menacé de rupture en raison d'innombrables facteurs : le vieillissement des palmeraies, le non-respect de la densité de plantation, l'exploitation abusive sans restitution notable ou assolement (Boumaraf, 2013), la salinité des eaux et des sols et le niveau élevé de la nappe phréatique, en conditions de mauvaise gestion de l'irrigation-drainage (Daddi Bouhoun, 2010). Il s'ajoute à ces facteurs, les problèmes de démembrement (héritage) et de mono-variété.

IV.1. Salinisation (stress osmotique)

La salinisation est identifiée comme une cause majeure de la dégradation des terres, particulièrement dans les régions arides et semi-arides (Pandey *et al.*, 2011 ; Ferreira *et al.*, 2015 *in* Singh, 2015). Elle peut être causée soit par des processus naturels, salinisation primaire, ou être induite par des activités humaines, salinisation secondaire (Ghassemi *et al.*, 1995)

A côté de la pénurie d'eau, la salinité élevée dans l'eau et le sol entrave l'activité microbienne (Rietz et Haynes, 2003) et la production agricole (Al-Yassin, 2005). Les dépressions salines naturelles sont très répandues au Sahara (Dregne, 1976).

Malgré les études approfondies sur les effets de la salinité sur les propriétés du sol (Qadir *et al.*, 2007) et la croissance des cultures, peu d'informations existent sur ses effets possibles sur les activités microbiennes du sol (Singh, 2015).

La variabilité de la salinité des sols est fonction des caractéristiques hydro-pédologiques et géomorphologiques de l'oasis par rapport aux axes naturels d'écoulement et de concentration des eaux (Zidi *et al.*, 1997 *in* Boumaraf, 2013).

La dégradation du sol peut également être induite par la qualité de l'eau. Dans certaines palmeraies, la qualité de l'eau souterraine locale est en baisse en raison de la décharge des eaux urbaines résiduaires ou les effluents d'eaux usées industrielles contenant des sels minéraux, principalement des chlorures et des sulfates de Na, Ca et Mg, qui sont à l'origine de

l'accumulation des sels dans le sol sous des conditions climatiques arides et d'évapotranspiration intense (Mlih et *al.*, 2015).

La surexploitation des ressources en eau et le manque de dispositifs de gestion rationnelle des excédents hydriques, dans un contexte naturel aussi difficile et fragile que celui de Ouargla, ont provoqué une généralisation du phénomène de salinisation des sols irrigables de la palmeraie. Ainsi, le paysage pédologique qui caractérise la cuvette de Ouargla est principalement dominé par les caractères d'halomorphie et d'hydromorphie, comme il est d'ailleurs pratiquement le cas dans toutes les oasis sahariennes (Djebaili, 1978 ; Floret et Pontanier, 1982 *in* Idder et *al.*, 2014). Cette salinité, constitue un fléau dangereux et une contrainte majeure, qui depuis très longtemps, avait eu des impacts préjudiciables sur le dysfonctionnement de l'oasis de Ouargla, à travers la baisse des rendements du palmier dattier et la qualité des dattes. Dans certaines situations extrêmes, la salinité avait provoqué la mort de beaucoup de palmeraies et la disparition d'oasis entières, faute de mesures appropriées pour limiter la gravité de ce phénomène dangereux et réduire ses conséquences néfastes (Daddi Bouhoun, 2010).

IV.2. Faible teneur en matière organique (stress énergétique)

Dans les sols des zones sahariennes, l'insuffisance considérable en substrats énergétiques représente le facteur le plus limitant de la biomasse microbienne dans ces sols. Les sols des zones arides, y compris les sols oasiens, sont généralement caractérisés par une faible teneur en matière organique (Dregne, 2002 ; Masse, 2007), en particulier leur taux d'azote organique très bas, une humification faible parce que sérieusement inhibée par une minéralisation intense (Oustani, 2006 ; Karabi, 2010). La matière organique disparaît, donc, rapidement, et l'humus, patrimoine organique du sol, n'étant plus alimenté par la chaîne de décomposition des matières organiques, disparaît progressivement. Enfin, l'activité biologique est fortement réduite.

La teneur en carbone organique du sol dans la région du Moyen-Orient et Nord-Afrique atteint à peine 0,5% (Lal, 2002). Les palmiers dattiers ne jettent pas leurs feuilles, donc il y a moins de litière en surface dans de tels systèmes de végétation (Mlih et *al.*, 2015). La productivité des plantes est faible, ce qui donne peu d'intrants de matière organique (El-Juhany, 2010).

IV.3. Texture grossière (stress minéralogique)

En raison de la texture sableuse des sols arides, le potentiel de séquestration du carbone est limitée (Kösters et *al.*, 2013), et sa capacité de rétention en eau est également faible. Cette texture grossière rend les quantités du carbone organique du sol sujettes à l'érosion et à la minéralisation rapide de la matière organique (Lobe et *al.*, 2001 ; Bruand et *al.*, 2005 in Mlih et *al.*, 2015). Jusqu'à 4,7% du carbone organique pourrait être perdue chaque année dans des sols sableux dans la région du Sahara.

Dans des conditions sèches et de faibles précipitations, la disparition du fumier se produit très rapidement. Esse et *al.* (2001) ont montré que dans les sols sableux des zones semi-arides d'Afrique de l'Ouest, 75% du fumier épandu a disparu au cours des 10 premières semaines après l'application. Cette déprotection physique limite, en conséquent, la densité et l'activité des microorganismes dans les sols oasiens.

IV.4. Hydromorphie des sols

L'accroissement des rejets d'eaux usées urbaines et d'eaux de drainage agricole a entraîné des remontées importantes des eaux des nappes superficielles dans la plupart des agglomérations urbaines du Sahara algérien. Ces remontées ont favorisé la dégradation des conditions environnementales et ont fortement perturbé les équilibres naturels dans les oasis sahariennes, déjà fragilisées par des conditions climatiques extrêmes et par des caractéristiques topographiques qui ne facilitent pas l'évacuation des eaux excédentaires (Idder et *al.*, 2014). Par conséquent, des quantités élevées de ressources en eau d'irrigation sont gaspillées en raison des propriétés du sol (Blanchart et *al.*, 2007 in Mlih, 2015).

Les oasis du Sahara algérien sont en effet, pour la plupart, installées dans des cuvettes sédimentaires. Ouargla, l'une des plus importantes oasis du Sahara algérien, souffre de ce phénomène d'excédents hydriques dont la principale conséquence est le dépérissement d'une partie importante de la palmeraie qui s'est retrouvée noyée dans ses eaux excédentaires. Ces eaux ont contrarié son drainage et provoqué une augmentation excessive de la salinité des sols cultivables (Idder et *al.*, 2014).

Chapitre V. Cadre de l'étude

V.1. Localisation géographique

La wilaya de Ouargla (Fig. 6) se situe dans le Sud-Est de l'Algérie, à vol d'oiseau, elle est à 580 Km au Sud-Sud-Est d'Alger. Cette wilaya couvre une superficie de 163323 km et Elle se trouve limitée au Nord par la wilaya de Biskra, au Sud par la wilaya de Tamanrasset, au Nord-Ouest par la wilaya de Djelfa, à l'Ouest par la wilaya de Ghardaïa, à l'Est par la wilaya d'El Oued, et au Sud-Est par la wilaya d'Illizi.

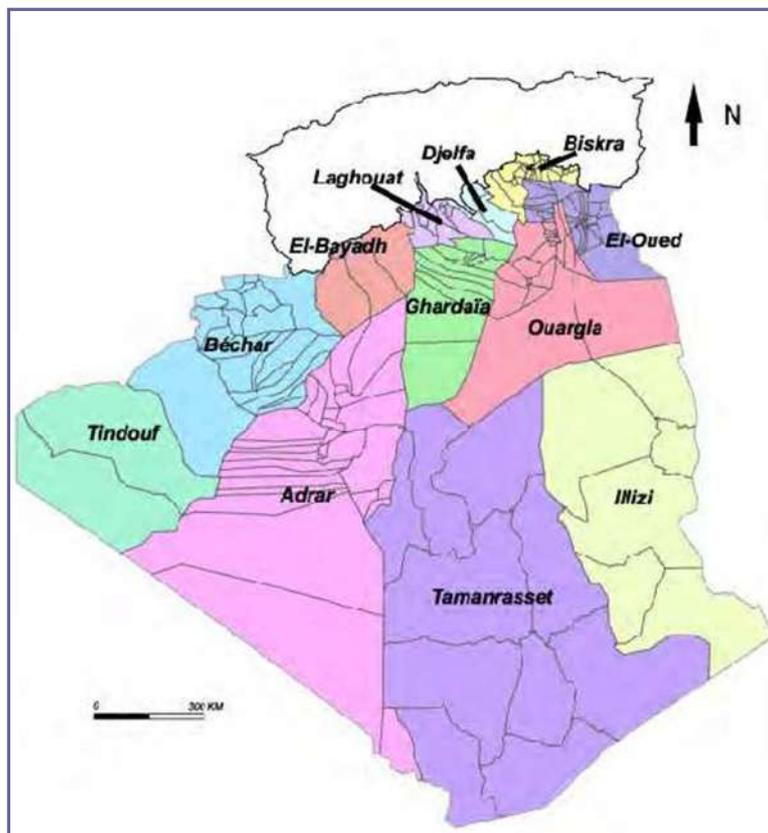


Figure 6. Situation géographique de la wilaya de Ouargla

La wilaya de Ouargla prend une place importante dans l'économie nationale par sa production agricole et ses gisements pétroliers ainsi que pour ses ressources en eaux souterraines.

La cuvette de Ouargla est située au Nord Est du Sahara, avec une superficie de 99000 km² (ONA, 2003). Elle tire son nom de l'oasis de Ouargla, chef-lieu de la wilaya (Fig.7).

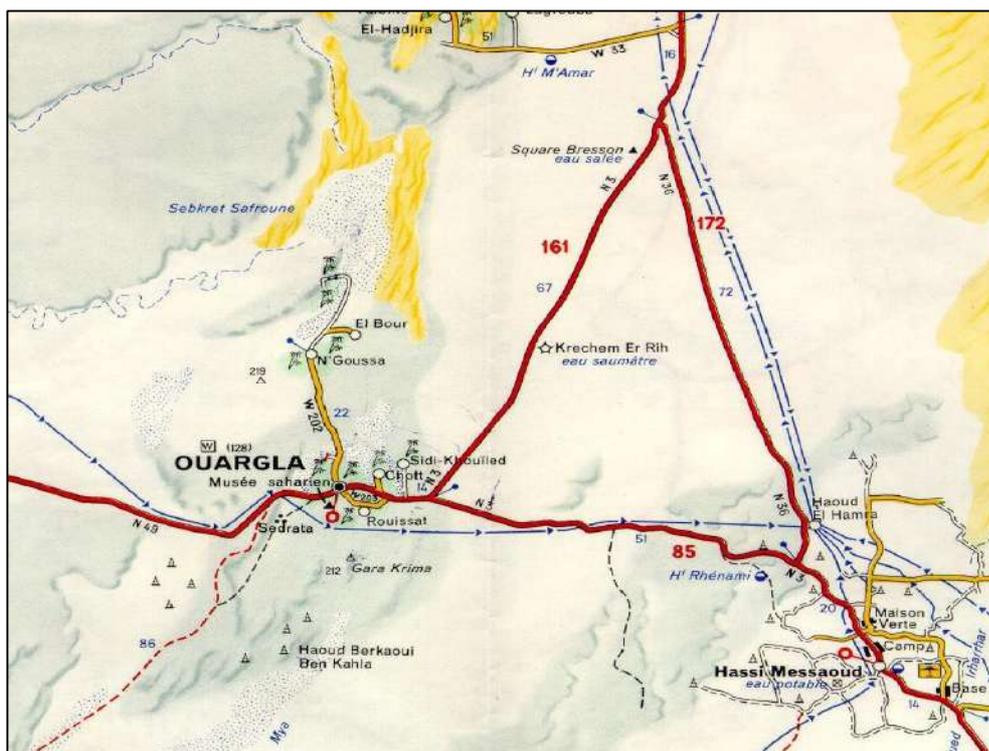


Figure 7. Carte de situation de la cuvette de Ouargla (BG, 2004)

V.2. Climat

Comme l'ensemble du Bas-Sahara, Ouargla présente un climat désertique avec un hiver froid et un été chaud (Dubief, 1959 ; Dubief, 1963). Elle évolue dans des conditions climatiques extrêmes, elle appartient à l'étage bioclimatique saharien tempéré (Annexe 1). Son climat est caractérisé par une aridité bien marquée due à un manque de précipitations et une sécheresse quasi permanente. Dans la région de Ouargla, la pluviométrie, qui est le facteur déterminant pour la caractérisation du climat, est faible et varie très fortement durant l'année et d'année en année. Les températures sont élevées avec des amplitudes thermiques (entre minima et maxima) très importantes (Mate, 2001). Ce type de climat se distingue, également, par une forte insolation dont la moyenne annuelle peut atteindre les 3000 heures (Khadraoui, 2005).

Les données météorologiques de la région de Ouargla s'étalant sur une période de 10 ans (de 2004-2013) et fournies par l'ONM sont représentées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Données climatiques de Ouargla (2004-2013)

Mois	Précipitation (mm)	T (°C)			Vitesse de vent (m/s)	Evaporation (mm)	Durée insolation moyenne (h)	Humidité relative d'air
		T° maximale	T° minimale	T° moyenne				
Janvier	10.01	18.7	5	11.5	2.8	91.1	244.6	61.3
Février	0.7	20.9	6.7	13.7	3.6	128.2	241.6	50.7
Mars	4.68	26	11.1	18.7	4.1	209.2	259.8	44
Avril	2.31	30.3	15.3	23.2	4.6	257.6	278	38
Mai	0.2	34.8	19.7	27.8	4.7	327.5	299.4	32
Juin	0.61	40.3	24.9	33.2	4.7	405.9	256	27.8
Juillet	0.35	43.6	28.2	36.5	3.7	462	330	24.7
Août	1.87	42.7	27.5	35.6	3.7	422.2	331.7	27.7
Septembre	3.91	37.5	23.3	30.5	4.1	300.8	270	37
Octobre	6.09	32.1	17.7	24.8	3.3	232.3	263	44
Novembre	6.53	24	10.3	16.8	2.8	128.5	252.2	55.4
Décembre	4.01	19.2	6	12.1	2.6	89.1	220.6	61.6
Cumul annuel	41.27					3108.4	3246.9	
Moyenne annuelle		30.84	16.3	23.7	3.7			42.01

Source : O.N.M (2014)

Le diagramme Ombrothermique de Gaussen et Bagnouls (1953) qui nous permet de suivre les variations saisonnières de la réserve hydrique, est représenté dans l'annexe 1.

A travers ces données, on peut dire que notre région d'étude est caractérisée par un climat Saharien. La faiblesse de précipitations devant un pouvoir évaporant élevé font que le déficit hydrique est quasi permanent ce qui se répercute défavorablement sur la densité, la biodiversité ainsi que sur l'activité des microorganismes du sol.

V.3. Hydrographie

De par la position géographique et le relief de Ouargla, le réseau hydrographique y est naturellement endoréique (D.P.A.T, 2009). Malgré leur nombre assez élevé, les oueds sont peu importants avec très peu de crues. Parmi les oueds les plus importants, il est possible de citer l'oued Mya considéré aujourd'hui comme fossile (Dubief, 1963). Ce grand oued descend du Tademait (Fig. 8) et se termine actuellement avec l'Oued M'Zab et l'Oued N'Sa dans la Sebkh de Safioune, 20 km au Nord de Ouargla. Il s'étend sur plus de 19.800 km². Sa longueur devait atteindre 900 km (Cornet, 1952). Ils existent d'autres oueds moins importants mais fonctionnels à l'inverse de l'Oued M'ya. Ce sont l'oued N'sa et l'oued M'Zab qui sont actifs. Malgré la faiblesse des précipitations et de leurs caractères orageux, ces Oueds participent dans une

certaine mesure à l'alimentation en eau des nappes phréatiques superficielles (Rouvillois-Brigol, 1975). Ils peuvent avoir une ou deux crues par an. Il faut également citer, l'artésianisme des sources naturelles (chria) et des lacs (behars) (D.P.A.T, 2009).

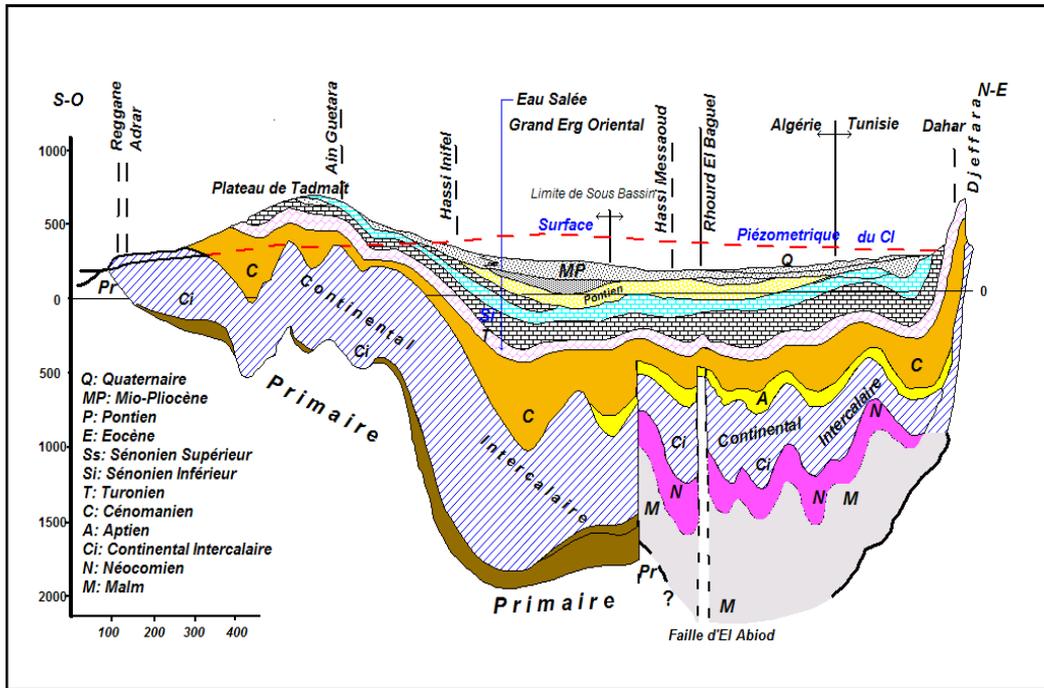


Figure 8. Coupe hydrogéologique du système aquifère CT et du CT (UNESCO, 1972)

V.4. Géomorphologie

Ouargla s'étend sur une soixantaine de kilomètres sur le lit de l'oued Mya. Ce dernier draine tout le versant Nord-Est du Tademaït et sa vallée suit une direction Sud-Ouest /Nord-Est. Les principaux ensembles paysagiques (Fig. 9) de la cuvette de Ouargla sont les hamadas, les glacis, les sebkhas et chotts, et les dunes de sable. Le relief de Ouargla est constitué de roches sédimentaires et des alluvions et colluvions issus de ces dernières (Busson, 1967).

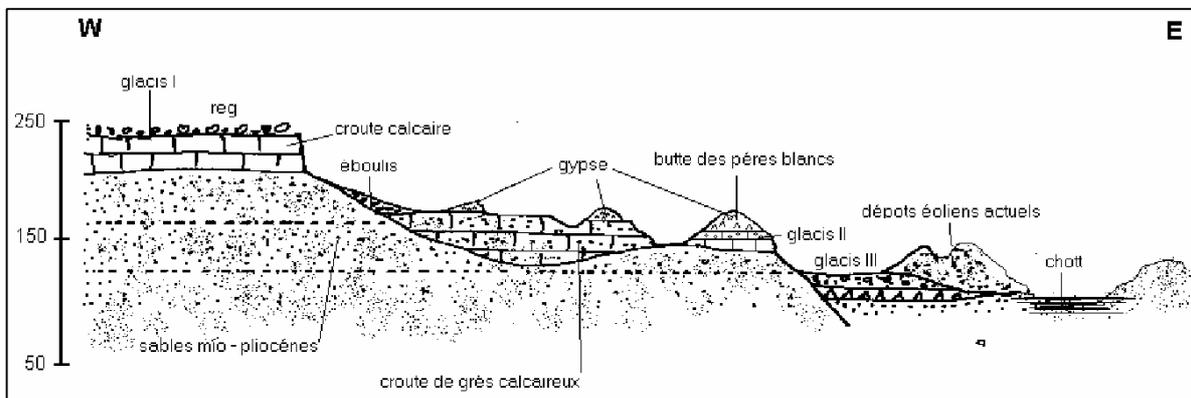


Figure 9. Schéma géomorphologique de la vallée de Ouargla (BG, 2003)

V.4.1. Les plateaux ou hamadas

A l'ouest de Ouargla, la vallée de Oued Mya est bordée par le plateau de la Hamada Pliocène de 200 à 250m d'altitude à faible pendage dans la direction Est. Sa fin est marquée par la dépression ovale de la sebkha Mellala (30 Km de long, de 6 à 10 11 Km de large, 80 à 90 m de profondeur). Fortement érodée, elle nous offre un beau paysage de buttes témoins (Goures).

V.4.2. Les glacis

Le versant Ouest de la cuvette, présente quatre niveaux étagés de glacis. Le plus ancien est marqué par une couverture très caractéristique formée d'une croûte gypso-calcaire, épaisse de 1,5 m ; son altitude s'abaisse de 225m à l'Ouest, à 200m à l'Est. Le deuxième glacis, à une altitude de 180m, est caractérisé par l'affleurement du substrat gréseux de Mio-Pliocène. Le troisième à 160m d'altitude est souvent recouvert de sable et de graviers gréseux plus ou moins encrustés de gypse. Ce dernier a été fortement démantelé par le dernier glacis qui est à 140m d'altitude sur lequel sont installées quelques palmeraies de Ba-Mendil (Hamdi Aissa, 2001).

V.4.3. Les chotts et les sebkhas

Installés dans les plus basses altitudes, ils sont constitués de sols gypseux en surface et forment des grandes zones d'épandage de matériel alluvial, sableux le plus souvent (Dutil, 1971). Les grands chotts se trouvent dans le Sahara septentrional, particulièrement dans le Bas-Sahara, où ils s'allongent dans de larges vallées fossiles (Oued Rhir, souf, mya, igharghar).

V.4.4. Dunes

Ce sont de dépôts actuels constitués des sables éoliens d'origine gréseuse issus de la Hamada mio-pliocène. Ils occupent les talwegs, les bordures des sebkhas et les versants rocheux (Zatout, 2012).

V.5. Géologie

D'après Busson (1967), les affleurements géologiques à Ouargla et ses environs sont le Quaternaire indifférencié (q) et dunes (D), le Pliocène ou Quaternaire ancien (qp), le Miocène ou Pliocène (mp) et plus loin vers le Sud-ouest le Sénonien et Eocène indistinguables (Fig. 10).

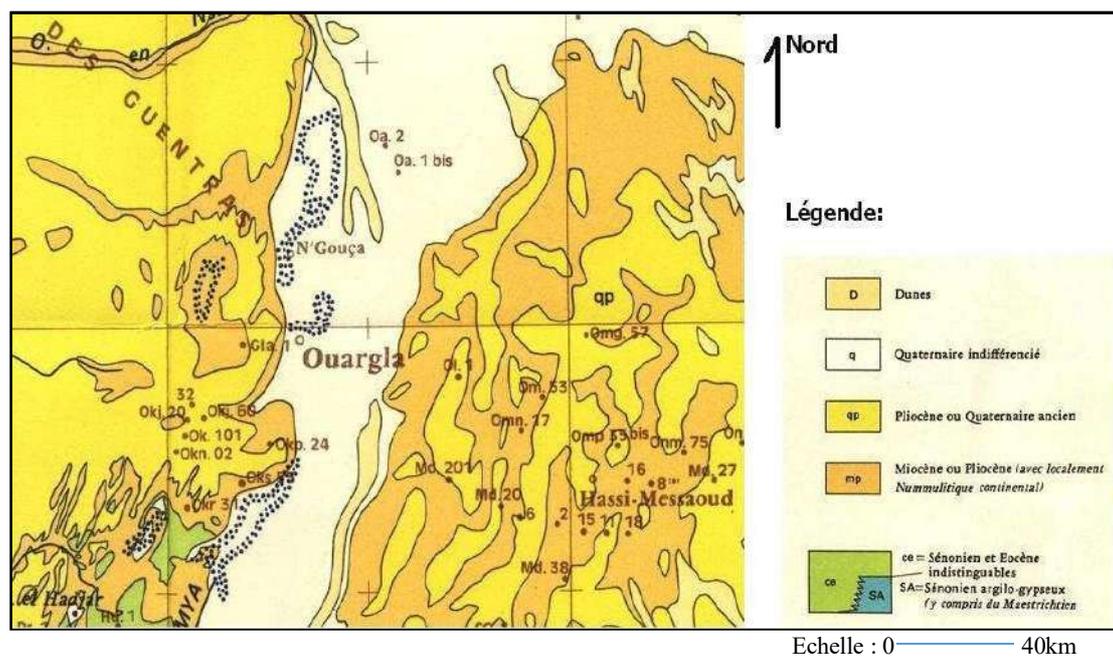


Figure 10. Carte géologique de la région de Ouargla (BG, 2004)

La cuvette de Ouargla est creusée dans un dépôt du continental terminal dans lequel alterne des sables rouges, ayant le même aspect que ceux de la vallée de l'Oued N'Sa, les argiles et parfois des marnes ; le gypse est peu abondant, daté du Pontien. Le dépôt est connu au nom du Miopliocène. Le Pliocène continental constitue l'ossature des Regs, sous forme d'une croûte calcaire locale avec des poudings ou des calcaires lacustres. Vers le fond de la vallée de Ouargla, il y a une succession de formations de plus en plus récentes (Cornet et Gouscov, 1952 *in* Daddi bouhoun, 2010) :

1. Des alluvions, Regs et terrasses qui datent du Quaternaire continental.
2. Des dunes récentes au Nord-Est et au Sud-Est près du lit de Oued Mya et du grand Erg oriental, formées à l'Holocène (Coude-Gaussen, 1991).
3. Alluvions actuels, ils occupent le fond de la cuvette de Ouargla et composés de chotts, sebkhas, limons et croûtes gypso-salines.

Les Chotts et sebkhas de la dépression de l'Oued Mya font partie d'un bassin salifère fermé continental Plio-Quaternaire. Ils proviennent du lessivage des dépôts salifères antérieurs, s'effectuant sous un climat aride à semi-aride, et cela jusqu'à l'époque actuelle (Merabet et Popov, 1972).

V.6. Hydrogéologie

Les eaux souterraines constituent la principale ressource d'eau dans la région de Ouargla.

Les aquifères utilisables à des fins urbaines et agricoles, sont illustrés sur le tableau 2.

De bas en haut, on distingue :

- La nappe du continental intercalaire dite de l'Albien ;
- La nappe des calcaires au niveau du Sénono-Eocène ;
- La nappe du Mio-Piocène dite des sables ;
- La nappe libre (phréatique) contenue par les sables fins argileux et gypseux du Quaternaire.

Tableau 2. Aquifères du CI et CT à Ouargla (ANRH, 2004)

Chronostratigraphie	Unités hydrogéologiques		Prof	Lithostratigraphie	Lithologie
Quaternaire	Nappe phréatique		20m		
Tertiaire	Nappe du Complexe Terminal	Nappe des sables	120m	Mio-Pliocène	
		Impermeable		Eocène évaporitique	
		Nappe des calcaires (Sénono-Eocène)	520m	Eocène carbonaté	
		Impermeable	700m	Sénonien carbonaté	
Nappe du turonien	Sénonien lagunaire				
Secondaire	Crétacé	Impermeable	1100m	Turonien	
				Cénomaniens	
		Nappe du Continental Intercalaire	2000m	Vraconien	
		Nappe de l'Albien		Albien	
			Aptien		
			Barrémien		

V.7. Pédologie

Au Sahara, la cuvette pédologique présente une grande hétérogénéité et se compose des classes suivantes : sols minéraux bruts, sols peu évolués, sols halomorphes et sols hydromorphes. La fraction minérale est constituée dans sa quasi-totalité de sable. La fraction organique très faible et ne permet pas une bonne agrégation. Ses sols squelettiques sont très peu fertiles car leur rétention en eau est très faible, environ 8% en volume d'eau disponible (Daoud et Halitim, 1994).

La région de Ouargla est caractérisée par des sols légers à prédominance sableuse et à structure particulière. Ils sont caractérisés par un faible taux de matière organique, un pH alcalin, une activité biologique faible, une forte salinité et une bonne aération (Rouvillois-Brigol, 1975).

En effet, cette région présente des sols possédant le plus souvent des nappes phréatiques proches de la surface du sol et une très forte salinité (Khadraoui, 2010). Ces sols dérivent du grès argilo -quartzeux du Miopliocène non gypseux, ils sont constitués de sable quartzeux. Sur

les sols de la dépression, la masse basale argileuse présente un aspect poussiéreux. Elle est constituée d'un mélange de micrite détritique et de quelques paillettes de micas (Hamdi Aïssa, 2001).

Le gypse est fréquent dans de nombreux sols. Selon Youcef et *al.* (2014), en profondeur l'accumulation de gypse se présente différemment soit par une grande quantité en petits cristaux (forme fibreuse, rose de sable) conférant au sol un aspect poreux, spongieux, soit par de nombreuses tâches (diffuses ou en mycélium) ou amas de gypse pulvérulent. Les teneurs en calcaire sont généralement faibles dans cette région (inférieure à 10%). Les pH sont légèrement basiques.

D'après Khelili et Lammouchi (1992) ; Halilat (1993) ; Hamdi -Aïssa (2001), la typologie des sols de la région est comme suit :

- Sols salsodiques
- Sols hydromorphes.
- Sols minéraux bruts.

L'étude des états de surface des sols dans la cuvette de Ouargla réalisée avec la télédétection et la prospection sur terrain par Hamdi-Aïssa (2001) (Fig.11), montre qu'ils sont constitués de cinq Pédopaysages :

1. Un plateau à 180-200 m d'altitude, caractérisé par une croûte pétrocalcarique, surmontant une croûte pétrogypsique.
2. Les glacis et les versants Ouest de la cuvette, sont en grande partie recouverts de matériaux alluvio-éoliens, sans développement pédologique notable (Régosols sableux et/ ou à graviers).
3. Les bordures des glacis étagés à 180 m, à 160 m et à 140 m, bien visibles, en partie érodées, se caractérisant par l'affleurement du substrat gréseux du Miopliocène (Lithosols).
4. La cuvette comprend un ensemble légèrement surélevé, constituant le pédopaysage gypseux, caractéristique du chott situé entre 140 et 135 m d'altitude. Il est subdivisé :
 - Sols à croûtes gypseuses de surface,
 - Sols gypso-salins, à croûtes gypseuses de sub-surface et croûtes salines de surface.
5. Le centre de la cuvette de 135-130 m d'altitude, correspond au pédopaysage salin à croûtes salines de surface

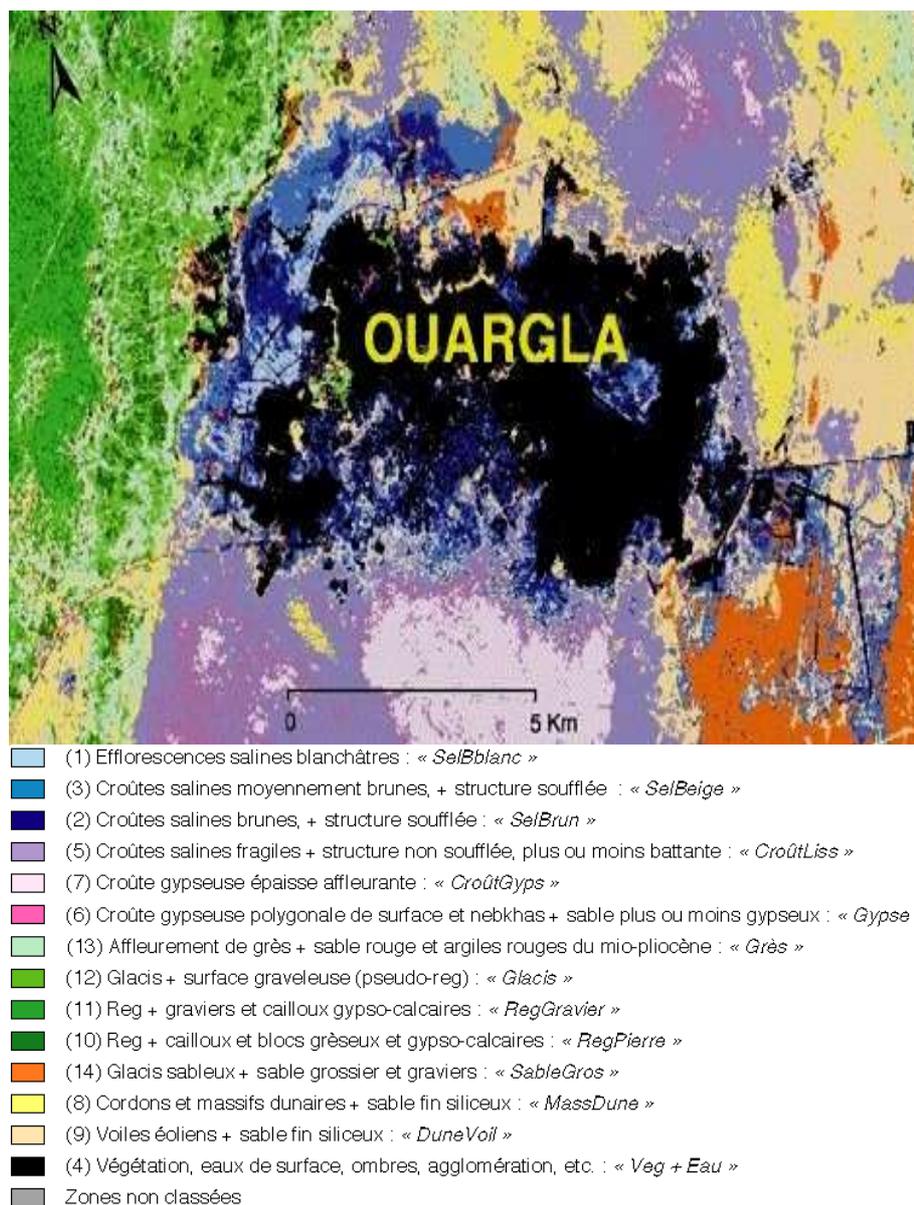


Figure 11. Carte des états de surface des sols à Ouargla (Hamdi-Aïssa, 2001)

V.8. Flore naturelle et faune

Au Sahara, comme partout ailleurs, la végétation est le plus fidèle témoin du climat (Gardi, 1973). Par conséquent l'absence de végétation sur des grandes étendues est le caractère le plus simple du paysage saharien, le tapis végétal est discontinu et très irrégulier, les plantes utilisent surtout les emplacements où le ravitaillement en eau se trouve un peu moins défavorable qu'ailleurs (Ozenda, 1991).

A Ouargla, comme partout dans le Sahara, la répartition des différentes espèces est très irrégulière et elle est en fonction des différentes formations géomorphologiques. En effet, les

Chapitre V. Cadre de l'étude

travaux menés par Chehema (2005) ; Chehema et al (2005) et Chehema et al (2008) montrent que la quantification végétale est spatialement très irrégulière. En effet, les résultats obtenus ont montré que les recouvrements et les densités sont élevés dans les dépressions (les lits de oueds et Dayas) par contre ils sont faibles sur les plateaux (Reg et Hamada) ou dans les sols sableux, enfin dans les sols salés où ils sont beaucoup plus faible.

L'étude des relations sol-végétation dans l'écosystème de la cuvette de Ouargla a montré que toute évolution floristique (la diversité floristique, changement de comportement des espèces) est suivie parallèlement par une évolution sur le plan édaphique (changement des principaux paramètres édaphiques analysés) (Lakhchakheche et Mokhtara, 2003). L'étude des relations entre le milieu hydro édaphique et le peuplement végétal montre la prédominance des espèces psammophile, halophile, gypsophile et hydro-halophile dans les bas-fonds de la cuvette. Cependant l'amont des versants de la cuvette de Ouargla présente un couvert végétal clairsemé prédominé par des espèces psammophiles, halofuges, gypsofuges et xérophiles (Sais et Zeghidi, 2006).

Il faut signaler enfin la présence d'une végétation abondante et variée au niveau des oasis et des zones cultivées.

En ce qui concerne la faune et tout autant que la flore, elle est rare. Les mammifères qu'on peut trouver dans la région sont entre autres les insectivores comme le rat à trompe ou le hérisson du désert : des carnivores tels que le fennec, le chacal, des rongeurs tels que les gerbilles, les souris, les gerboises et les lièvres, des ongulés tels les gazelles. Parmi les oiseaux quelques espèces sont proprement sahariennes : le corbeau brun, la perdrix ganga. Les reptiles vivent généralement à proximité de la végétation. Avec les reptiles les espèces les mieux adaptées aux conditions écologiques de la région sont les insectes et les arachnides. Parmi ces derniers l'on peut noter le scorpion dont la plupart des espèces sont dangereuses pour l'homme. On peut les trouver sur l'ensemble de l'étendue de la zone où ils vivent dans le sable, sous les pierres. Les insectes quant à eux représentent la population animale la plus nombreuse (on a recensé plus de 800 espèces pour le seul Sahara du nord occidental) ils peuplent l'ensemble du désert (Omeiri, 2016).

Troisième partie

Matériels et méthodes

Chapitre VI. Matériel d'études

VI.1. Choix des sites d'études

Notre étude expérimentale concerne la cuvette de Ouargla. Les sites d'études couvrent plusieurs palmeraies.

Pour apprécier l'effet des différents systèmes de culture sur l'activité et la biomasse microbienne, l'impact des pratiques culturales sur la densité microbienne, les variations spatiotemporelles de la biomasse microbienne, et la mise en évidence des bactéries sulfato-réductrices, notre étude a été réalisée en quatre phases, entre 2011 et 2016, et dans quatre zones de la cuvette (Fig. 12).

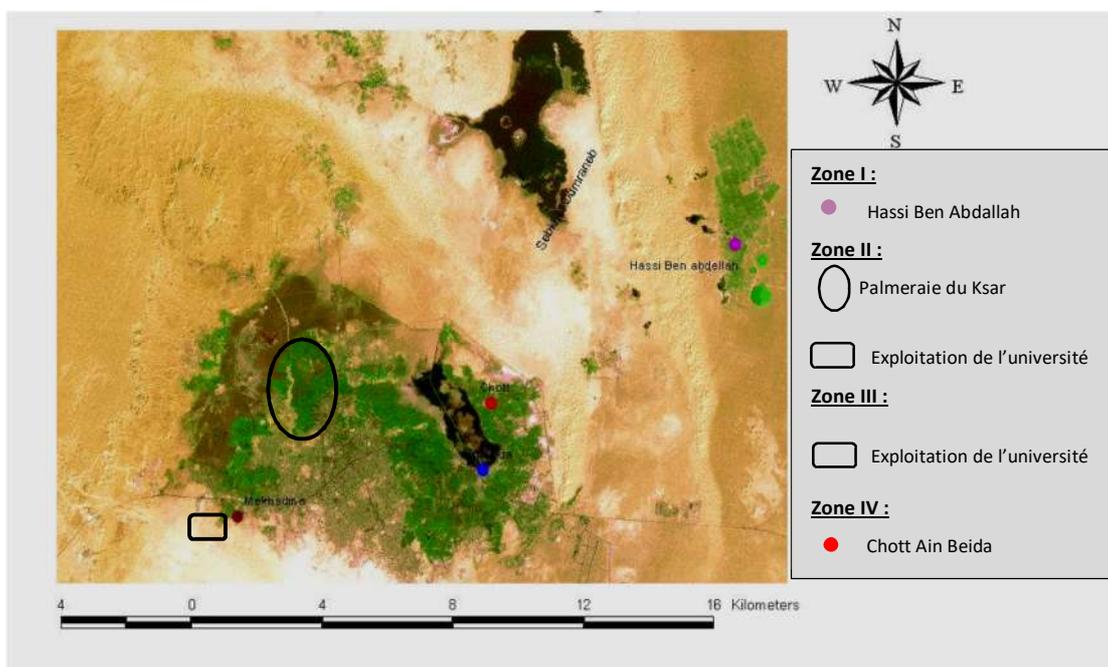


Figure 12. Localisation des zones d'étude dans la cuvette de Ouargla (A.N.R.H., 2005)

VI.1.1. Zone I : Elle est située dans l'exploitation agricole de Babziz située dans le périmètre agricole de Hassi Ben Abdellah (Ouargla), où nous avons étudié, entre 2014 et 2016, l'impact des principaux systèmes de culture dans la région de Ouargla sur l'activité et la biomasse microbienne des sols oasiens.

VI.1.2. Zone II : elle concerne la palmeraie du Ksar ainsi que l'exploitation agricole de l'université de Ouargla, où nous avons étudié, entre 2012 et 2014, l'impact de certaines

pratiques culturales (travail du sol et l'irrigation) sur la densité des principaux groupes microbiens du sol.

VI.1.3. Zone III : elle est située dans l'exploitation agricole de l'université de Ouargla, où nous avons étudié, entre 2011 et 2012, les variations spatiotemporelles de la biomasse et l'activité microbienne des sols oasiens.

VI.1.4. Zone VI : elle est située dans le chott d'Ain Beida où nous avons essayé, entre 2015 et 2016, de mettre en évidence le phénomène de la sulfatoréduction, dû essentiellement à l'hydromorphie, dans un chott bordant une palmeraie.

VI.2. Zone d'étude I

VI.2.1. Choix du site expérimental

Pour la réalisation de cette phase d'étude nous avons choisi la palmeraie de l'exploitation agricole de l'Université de Ouargla. C'est une exploitation moderne qui représente une palmeraie représentative de la plupart des palmeraies de la région de Ouargla.

Créée en 1957 par le service colonial pour la mise en valeur, l'exploitation fut confiée à l'Institut Technologique d'Agriculture Saharienne (I.T.A.S.) en 1979 dans un but pédagogique et scientifique. Elle se présente sous forme d'un glacis d'une grande homogénéité topographique. Elle est située à Mékhadma, six kilomètres au sud Ouest de la ville de Ouargla, à une altitude comprise entre 132,5 et 134 m, une latitude de 31°56' Nord et une longitude de 5°17' Est. Elle présente une orientation Nord-Ouest, dans une zone peu élevée, en bordure du chott de Mékhadma.

L'exploitation s'étend sur une superficie de 32 hectares, 14,4 hectares aménagés, répartis en quatre secteurs A, B, C et D occupant chacun une superficie de 3,6 hectares et cultivés essentiellement en palmier dattiers, une serre vitrée, trois serres plastiques, ainsi que des cultures fourragères sous palmier dattier. Le reste se trouve inexploité correspondant à l'extension de l'exploitation représentée par des secteurs nus E, F, G et H. Actuellement, une partie de cette superficie a été attribué au pôle universitaire.

Le sol est d'une texture sableuse à sablo limoneuse, structure particulière, légèrement basique et pauvres en matière organique, avec une présence notoire à certains niveaux de

croûtes compactes et encroûtements gypseux. Il est d'une conductivité électrique élevée sous palmiers et très élevés pour le sol hors palmiers (3,34 à 9,16ds/m). Le sol est classé comme Solonchak Hypogypsic (Calcaric Gypsic) (IUSS Working Group WRB, 2015).

VI.2.2. Échantillonnage

L'échantillonnage du sol de la phase I de l'étude a été réalisé afin de répondre à une certaine représentativité du site. Ainsi des échantillons élémentaires équipondérales ont été prélevés le long de deux transects diagonales dans une surface de 12 ha des secteurs A1, A2, C1, C2 (fig. 13).



Figure 13. Photo satellitaire de l'exploitation de l'université (image Google Earth, 2015).

VI.2.3. Conduite culturale

L'exploitation est bien entretenue de point de vue agronomique. Elle est conduite de façon traditionnelle, utilisant les amendements organiques et peu d'engrais chimiques. Les palmiers sont plantés au carrée d'une manière régulière avec un écartement de 9 x 9 m, soit théoriquement 110 palmiers à l'hectare. On dénombre plusieurs types de palmiers dattiers qui sont Déglet Nour, Ghars, Déglà Beida, variétés communes et Dokkars ainsi que la présence des cultures sous-jacentes, de types fourragers et maraîchers.

Les palmiers dattiers sont soumis aux problèmes des déprédateurs, notamment la cochenille blanche, le boufaroua, le ver de la datte et les oiseaux.

Chapitre VI. Matériel d'études

Les traitements phytosanitaires sont utilisés au niveau de l'exploitation. La végétation spontanée couvre particulièrement les secteurs E et G. Elle indique une nature de sol de type gypso-saline et sableuse. Les principales espèces identifiées sont : *Tamarix gallica*, *Zygophyllum album*, *Aristida pungens*, *Traganum nudatum*, *Phragmites communis* et *Suaeda mollis*.

L'irrigation de l'exploitation est assurée par deux forages du complexe terminal :

- Forage1 (sénonien), c'est le forage le plus anciens, réalisé en 1959, il est situé dans le secteur A2 au nord- Est du secteur B1, équipé d'une pompe immergée, la profondeur du forage est de 188,8 m, le débit est de 40 l/s.

- Le second forage, est situé au nord Est du secteur A1, réalise en 1986, il est d'une profondeur 68m, avec un débit 18 l/s, et une température de 17C°. La distribution de l'eau se fait par la présence d'un réseau de conduite enterrée avec trois à quatre vannes par secteur. L'irrigation se fait par submersion des planches, en moyenne une fois par semaine en hiver et deux fois par semaine en été. Le réseau de drainage est moyennement entretenu et constitué de drains primaires, secondaires et tertiaires à ciel ouvert tous les 100 m, débouchant dans le collecteur principal, qui évacue les eaux de drainage vers le chott de Mékhadma.

VI.3. Zone d'étude II

VI.3.1. Choix du site expérimental

Dans cette phase nous avons choisis l'exploitation agricole de Babziz située dans la commune de Hassi ben abdallah en amont du versant Nord-Est de la cuvette de Ouargla (Fig. 14). Le choix de la station d'étude été fait sur la base de l'intense activité agricole qui s'y déroule ainsi que par le fait que l'exploitation dispose d'une diversité de systèmes de culture existants dans la région entre autre ; la phœniciculture, la serriculture, la céréaliculture, la culture légumineuse et d'une extension de terrain non exploité (sol nu).

Pour ce qui est de l'homogénéité du sol ; selon Hamdi-Aissa et Girard (2000), il s'agit d'un pédopaysage sableux à sable grossier et graviers, avec du calcaire. Le sol est de prédominance sableuse et pauvres en matière organique, présentant un taux d'accumulation gypso-saline pauvre.



Figure 14. Photo satellitaire de la zone de Hassi Ben Abdallah (image Google Earth, 2015)

VI.3.2. Echantillonnage du sol

Afin d'avoir un échantillon représentatif pour chaque système de culture, des échantillons élémentaires équipondérales moyens ont été prélevés.

VI.3.3. Conduite culturale

La palmeraie appartient au secteur privé, conduite de façon traditionnelle, utilisant les amendements organiques et peu d'engrais chimiques. La plantation du palmier dattier est organisée, avec un écartement entre palmiers de 9m. Les palmiers dattiers sont constitués essentiellement de Déglet Nour et de Ghars. Il existe aussi dans la palmeraie des cultures sous-jacentes, de types maraîchers et fourragers. Les brise-vents sont peu efficaces de type mort (Djérids). Les principaux déprédateurs du palmier dattier sont la cochenille blanche, le boufaroua, le ver de la datte et les oiseaux. Les traitements phytosanitaires sont utilisés. Les plantes spontanées rencontrées sont surtout le *Phragmites communis*, *Tamarix gallica*, *Zygophyllum album* et *Moltkia ciliata*.

Les eaux d'irrigation sont peu chargées en sels et de température élevée provenant d'un forage collectif, de type albien. Le système d'irrigation utilisé est par submersion des planches

pour le secteur phoenicicole à raison de une à deux fois par semaine en hiver et deux fois par semaine en été avec un débit de 1,5 l / s / ha par tour d'irrigation, La technique d'aspersion (par pivot) pour le champ céréalier et la technique d'irrigation localisée (goutte à goutte) est utilisée seulement dans les serres et certaines cultures sous-jacentes. Aucun système de drainage n'est présent et présence d'une nappe profonde.

VI.4. Zone d'étude III

VI.4.1. Choix des sites expérimentaux

Le premier volet de cette phase à savoir l'effet du travail du sol sur la densité des principaux groupes microbiens a été réalisé au niveau de l'exploitation agricole de l'université de Ouargla décrite précédemment. Tandis que pour entreprendre le deuxième volet de cette phase à savoir l'effet de la fréquence d'irrigation sur la densité microbienne du sol, nous avons choisi la palmeraie du Ksar compte tenu de l'importance de son patrimoine phoenicicole et l'état de dégradation de certains jardins.

L'étude couvre trois jardins phoenicicoles différemment entretenus de point de vue agronomique particulièrement la différence de leur état hydrique : un premier jardin en bon état, un deuxième jardin estimée de moyennement dégradé et un troisième en état dégradé. Les sols sont à dominance sableuse (Rouvillois-Brigol, 1975 ; Hamdi Aïssa, 2001).

VI.4.2. Échantillonnage du sol

Les jardins sont choisis en fonction de leur état hydrique et le niveau de leur dégradation. Afin d'avoir un échantillon représentatif pour chacun des trois jardins, des échantillons élémentaires équipondérales moyens ont été prélevés.

Jardin 1 : représente un jardin bien entretenu à trois strates c'est-à-dire les palmiers dattiers, des arbres fruitiers (principalement des figuiers et des grenadiers) et des cultures sous-jacentes de types maraichères et fourragères (photo 01). L'aspect de surface indique un bon état des sols ce qui peut être expliqué par les travaux réguliers d'entretien de la palmeraie qui est irriguée régulièrement à raison de deux fois par semaine. Les agriculteurs utilisent les amendements organiques et peu d'engrais chimiques. Les amendements sableux sont utilisés aussi comme moyen de lutte contre la remontée capillaire des sels.



Photo 01. Palmeraie bien entretenue (station 01)

Jardin 2 : c'est un jardin moyennement entretenu à deux strates (palmiers dattiers et quelques arbres fruitiers), irrigué d'une façon irrégulière en moyenne d'une fois tous les dix jours. Le sol est marqué par des efflorescences salines. Les palmiers ne sont pas entretenus (Photo 02).



Photo 02. Palmeraie moyennement entretenue (station 02)

Jardin 3 : ce jardin est un exemple des jardins complètement abandonnés. Il est constitué uniquement de quelques pieds de palmiers dattiers (jardin à une strate). L'état de surface du sol est marqué par des efflorescences salines très importantes du fait de l'absence totale de l'irrigation et des travaux d'entretien (photo 03).



Photo 03. Palmeraie mal entretenue (station 03)

VI.4.3. Conduite culturale

Les palmeraies présentent une diversité variétale importante. Elles sont peu organisées avec des écartements variables entre palmiers et sont conduites de façon traditionnelle.

L'irrigation des palmeraies est faite par la technique de submersion dont le débit fourni est largement suffisant pour les palmeraies (1,5 l / s / ha, de façon continue). Les fréquences d'irrigation changent en fonction des saisons. Généralement, elles sont de une à deux irrigations par quinzaine en hiver et de deux à trois irrigations par semaine en été.

Le drainage est peu efficace (mal entretenu) de type drainage à ciel ouvert, envahi par le phragmite et le tamarix ce qui engendre des accumulations (efflorescences) salines à la surface des sols des jardins phoenicicoles.

Les brise-vents sont peu efficaces, de types Djérid. Les palmeraies souffrent de l'envahissement des plantes spontanées hygro-halophiles, comme le *Tamarix* et le *Phragmites* et de la présence de certains déprédateurs (*Oligonychus afrasiaticus*, *Parlatoria blanchardi*, *Ectomyelois ceratoniae*) ainsi que certains oiseaux.

Les principales caractéristiques des trois (03) jardins phoenicicoles sont reportées dans l'annexe 2.

VI.5. Zone d'étude IV

VI.5.1. Choix du site expérimental

Notre site d'étude « Chott Ain El Beïda » est situé non loin de la ville de Ouargla (à 8 Km). Il est enserré entre la palmeraie de Ouargla (chef-lieu de commune et de willaya) à l'ouest et au sud et la palmeraie de Ain El Beida à l'est et il s'ouvre sur des formations dunaires sur la côté nord (Tad, 2002). Le chott d'Ain El Beida est limité par les longitudes 5°21'36" et 5°22'48" Est et les latitudes 31°57'00" et 31°58'30" Nord (Boumezbeur, 2004). L'altitude moyenne du chott est de l'ordre de 128 m.

L'image de google earth (Fig. 15) montre la situation du chott de Ain El Baida. Il est presque entièrement entouré par la palmeraie de Ain El Beida, à l'exception du côté Nord Ouest

où il est limité par la sebkhat de Bamendil. Ce chott est traversé par le réseau du drainage des eaux vers l'extérieur de la cuvette et le réseau routier (Zatout, 2012).



Figure 15. Situation du Chott de Ain El Beida (Image google Earth, 2016)

Ce chott est une dépression saline dont la partie inondée est constituée par la Sebkhia, avec une surface de 6853 ha. Allongé en direction Nord-Ouest, Sud- Est sur une longueur de 5,3 km, sa largeur varie de 01 à 1,5 km. Il est parcouru par un réseau de drains qui canalisent les eaux excédentaires de la nappe phréatique de la palmeraie de Ouargla ainsi que celles usées de la même ville.

Le chott en forme de croissant, est une vaste étendue salée s'enfonçant suivant une direction NO-SE, entre les diverses palmeraies : elle délimite deux zones, l'une à l'Est, avec les palmeraies d'Adjaja, du chott et de Sidi Khouiled, l'autre à l'Ouest et au Sud-Ouest, avec celles de Ouargla et de Rouissat. Atteignant quatre kilomètres carrés en hiver et au printemps, le chott diminue progressivement d'étendue avec les chaleurs et se trouve à sec pendant l'été. En automne, son niveau remonte rapidement et il se produit alors une véritable submersion des terrains (Passager, 1957).

Chapitre VI. Matériel d'études

Dans le chott le dépôt en surface devient abondant et il se forme alors un encroûtement, constitué tantôt de calcaire tantôt de gypse et de chlorures (Ozenda, 1958).

Le choix de La station d'étude est justifié par le fait que c'est un écosystème réponsus dans notre région caractérisé par des sols gypseux favorables pour le phénomène de la sulfato-réduction.

Chapitre VII. Méthodes d'études

VII.1. Approches méthodologiques

Notre approche méthodologie consiste à étudier le compartiment microbiologique des sols oasiens en parallèles aux déterminations physico-chimiques de ces sols sous différents systèmes de cultures et sous l'effet de certains paramètres édaphiques en passant par quatre phases expérimentales :

1. Phase I : étudier l'impact des systèmes de culture sur la densité et l'activité microbienne des sols oasiens.

2. Phase II : étudier l'effet de certaines pratiques culturales à savoir le travail du sol et l'irrigation (fréquence) sur la densité des principaux groupes microbiens.

3. Phase III : étudier la variation spatiotemporelle de la densité et l'activité microbienne des sols des palmeraies :

- Variabilité spatiale de l'activité et la biomasse microbienne sous culture de palmier dattier.

- variations saisonnières de la densité microbienne des sols des palmeraies

4. Phase VI : mettre en évidence les bactéries sulfatoréductrices dans les sols oasiens engorgés en eau.

VII.1.1. Impact des systèmes de culture sur la densité et l'activité microbienne des sols

Nous avons évalué dans cette phase sous différents systèmes de cultures à savoir la phœniciculture, la céréaliculture, la serriculture et la luzerne (culture légumineuse fourragère), en comparaison avec un sol nu n'ayant pas encore subi d'action anthropique (Fig. 16), la densité bactérienne et fongique. Nous avons estimé, également, la biomasse microbienne selon la méthode de fumigation extraction ainsi que l'estimation de l'activité enzymatique de la β -glucosidase. Ces mesures microbiologiques ont été complétées par des mesures physico-chimiques du sol.

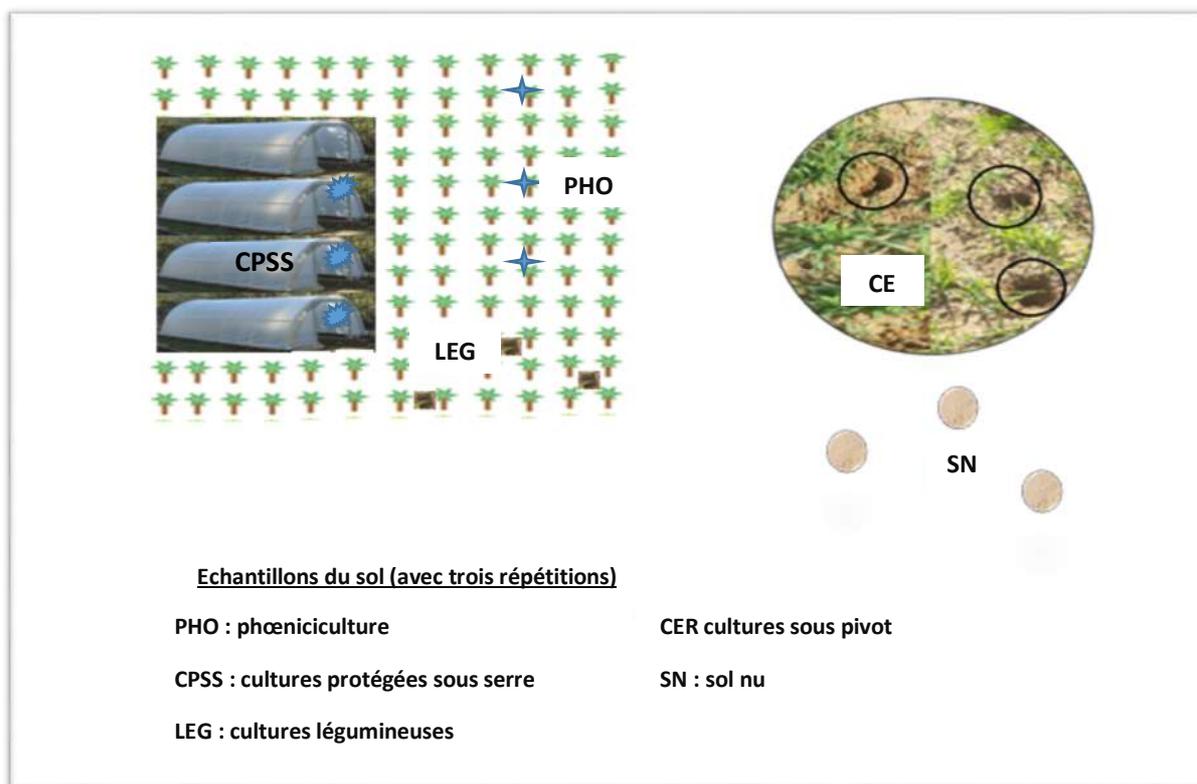


Figure 16. Plan d'échantillonnage du sol sous différents systèmes de culture au niveau de l'exploitation de Babziz à Hassi Benabdellah

Echantillonnage

L'échantillonnage joue un rôle crucial dans la caractérisation des communautés microbiennes. En effet, les micro-organismes sont extrêmement diversifiés, il existe une relation aire/espèce chez ces organismes (Green et Bohannan, 2006), leur répartition spatiale varie à l'échelle microscopique.

La richesse des micro-organismes dépend effectivement de l'aire d'étude. En conséquence, le nombre de prélèvements doit être représentatif de la surface de l'écosystème étudié. Cette limitation peut être contournée par l'analyse d'échantillons composites, c'est-à-dire par mélange des échantillons issus des répliques spatiaux d'un même site (Schwarzenbach et *al.*, 2007).

En matière d'échantillonnage pour des fins microbiologiques dans le sol, la norme NF X31-100 fait référence. L'horizon 0-15 cm est habituellement utilisé. Cependant, en sol agricole limoneux ce qui est notre cas, la biomasse fongique est sensible jusqu'à 30cm (Legras, SD).

Ainsi, nous avons réalisé dans des conditions de stérilité rigoureuse et sur sol ressuyé, 3 prélèvements de chaque sol (sol sous palmier, sol sous serre, sol sous culture de céréale, sol sous culture de luzerne et sol nu), afin d'obtenir un échantillon composite représentatif de chaque sol. Nous avons prélevé des échantillons de la couche superficielle (0-30cm). Il s'agit du principal site de la prolifération microbienne. Les prélèvements ont été effectués le 1^{er} du mois de mars 2015.

VII.1.2. Effet de certaines pratiques culturales sur la densité microbienne des sols oasiens

VII.1.2.1. Effet du travail du sol sur la densité microbienne des sols oasiens

Dans cette phase nous avons étudié l'effet de travail du sol et ses conséquences sur la densité des microorganismes du sol à travers une comparaison entre deux sols, à savoir un sol labouré, et un sol non labouré. Ainsi nous avons évalué la densité des principaux groupes microbiens à savoir les bactéries, les champignons et les actinomycètes parallèlement aux mesures des propriétés physico-chimiques du sol.

Préparation des parcelles et échantillonnage

Un labour manuel superficiel (profondeur d'environ 25-30cm) a été effectué début novembre sur la moitié de 05 parcelles d'une vingtaine de mètres linéaires à l'aide d'une houe, alors que l'autre moitié des parcelles en question ont été laissées intactes (sans labour) afin de servir de témoin (photo 04). Les parcelles objet d'étude contenaient de l'orge comme précédent cultural. Les échantillons ont été prélevés le mois de février 2014.



Photo 04. Parcelle labourée à moitié

VII.1.2.2. Effet de l'humidité du sol sur la densité des principaux groupes microbiens telluriques

Cette phase a pour objectif l'étude de l'effet de la variation d'humidité induite par la fréquence d'irrigation sur la biomasse microbienne du sol aride par rapport à deux saisons (l'hiver et printemps) et dans 3 palmeraies différemment entretenues (cas de la palmeraie du Ksar).

Ainsi nous avons évalué la densité des bactéries, des champignons et des actinomycètes. Des analyses physico-chimiques du sol ont été également effectuées parallèlement aux mesures microbiologiques.

Pour ce qui est de la période d'échantillonnage, nous avons choisi deux moments différents de l'année de point de vue climatique, c'est-à-dire deux saisons, l'hiver (début du mois de janvier) et le printemps (début du mois de mars).

VII.1.3. Variation spatiotemporelle de la densité et l'activité microbienne des sols des palmeraies

VII.1.3.1. Variabilité spatiale de l'activité et la biomasse microbienne sous culture de palmier dattier

Nous avons étudié dans cette phase la variabilité spatiale à l'échelle métrique car c'est à cette échelle que l'étude de l'impact des perturbations est généralement étudiée.

L'objectif est d'étudier les patrons de variabilité spatiale à petite échelle de deux indicateurs de la qualité des sols à savoir la biomasse microbienne et l'activité enzymatique sous culture de palmier dattier et d'identifier quels sont les facteurs édaphiques qui les conditionnent.

Ainsi nous avons évalué la densité bactérienne et fongique, la biomasse microbienne du sol représentée par le $C_{\text{microbien}}$ et le $N_{\text{microbien}}$, ainsi que l'activité enzymatique de la β -glucosidase.

Nous avons prélevé aseptiquement des échantillons de sols sur sol ressuyé (entre deux irrigations) à une profondeur de 0-30cm. Quatre points de prélèvement sont situés entre deux palmiers dattiers en respectant la distance 1.5 m entre chaque 02 point. Afin d'avoir un

échantillon moyen représentatif de l'état microbiologique régnant dans le sol pour chaque point nous avons effectué des répétitions dont trois secteurs (Fig. 17). Les prélèvements ont été effectués, la fin du mois de Février 2016.

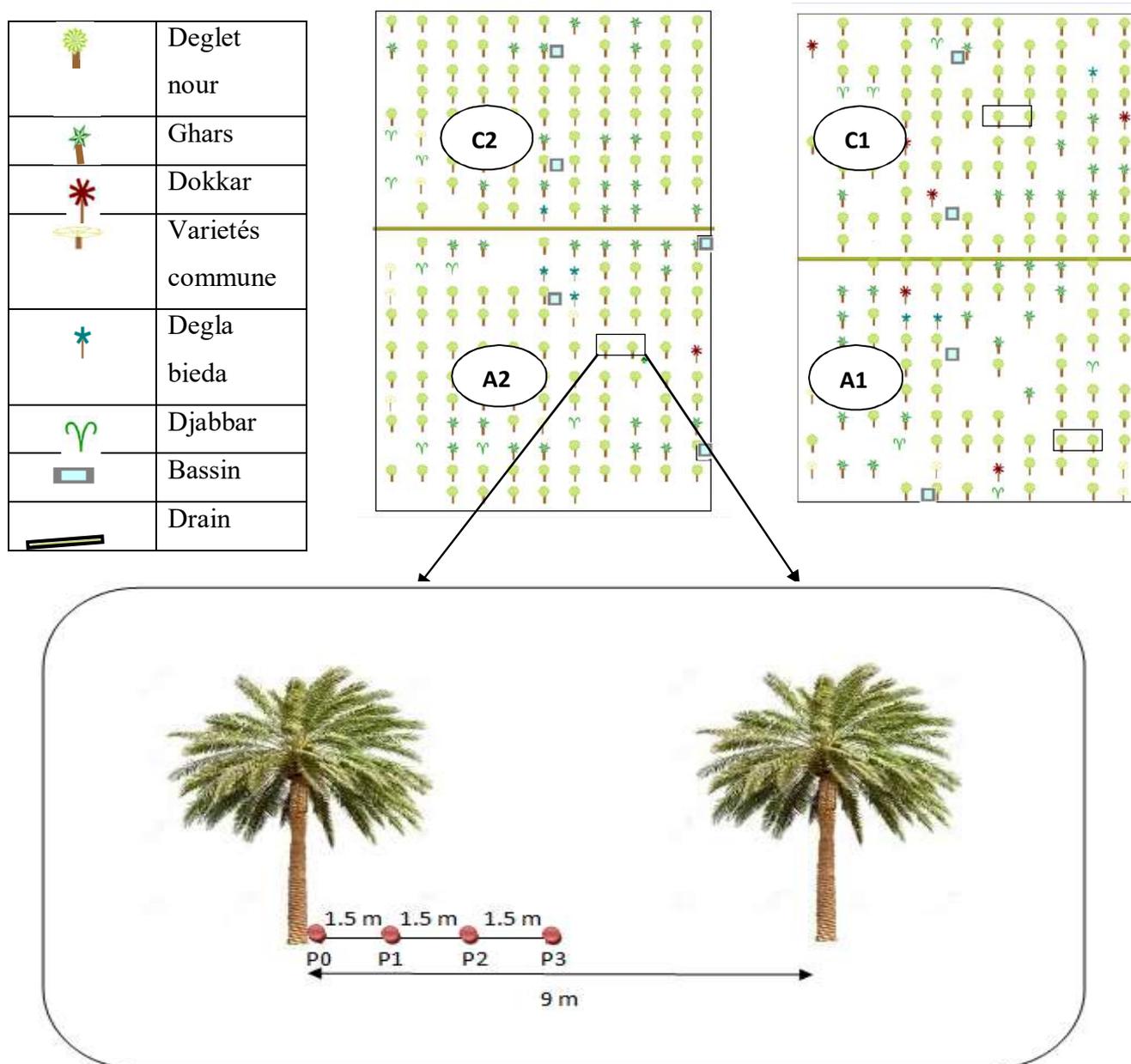


Figure 17. Schéma d'échantillonnage du sol pour l'étude de la variabilité spatiale de

VII.1.3.2. Variations saisonnières de la densité microbienne des sols des palmeraies

Dans cette phase nous avons évalué la densité des bactéries, des champignons, des actinomycètes et des algues. Des analyses physico-chimiques du sol ont été également effectuées parallèlement aux mesures microbiologiques.

Nous avons prélevé aseptiquement des échantillons de sols de 500 g chacun sur sol ressuyé (entre deux irrigations) à une profondeur de 0-30cm au long de deux diagonales dans une surface de 12 ha. Des échantillons équipondérales élémentaires ont été prélevés afin d'avoir un échantillon moyen représentatif de l'état microbiologique régnant dans le sol. Les échantillons élémentaires ont été mélangés pour former un échantillon moyen représentatif du site d'étude, passés par un tamis de 2mm, homogénéisés et débarrassés des débris végétaux. Chaque échantillon moyen été divisé en 2 partie, une partie consacrée aux analyses microbiologiques conservée à température de 4°C jusqu'à utilisation et l'autre partie consacrée aux analyses physico-chimiques est séchée à l'air libre à température ambiante.

Les prélèvements ont été effectués durant deux périodes de l'année qui correspondent à deux saisons à savoir l'automne et l'hiver. Ainsi le premier échantillonnage a été fait durant le mois d'octobre 2011 et le deuxième échantillonnage durant le mois de janvier 2012.

VII.1.4. Mise en évidence des bactéries sulfato-réductrices dans les sols oasiens

Dans cette phase consacrée à la mise en évidence de la sulfato-réduction dans un écosystème oasien, nous avons estimé, en plus de la densité des bactéries et des champignons, la densité des bactéries sulfato-réductrices. Nous avons estimé, également, la biomasse microbienne par la méthode de fumigation extraction, la demande biologique en oxygène (DBO₅) et la demande chimique en oxygène (DCO) parallèlement aux analyses physico-chimiques du sol.

Trois types de sol ont été échantillonné à savoir un sol de surface de faible profondeur 0-5cm (C1), un sol de sub-surface 5-15cm (C2) et un sol rhizosphérique (R) sous Tamarix abondante dans le site du prélèvement (Fig. 18)



C1 (sol de surface 0-5cm)



C2 (sol de sub-surface 5-15cm)



R (sol rhizosphérique)

Figure 18. Echantillons du sol pour l'étude du phénomène de sulfatoréduction dans le chott d'Ain Beida

Avant de commencer l'échantillonnage, nous avons examiné le terrain de point de vue son uniformité. Ainsi nous avons prélevé, dans les mêmes conditions et le même jour, 03 échantillons équipondérales de chaque type de sol, afin d'obtenir une image représentative de l'état microbiologique, qui règne dans notre terrain. Notre prélèvement a été réalisé la fin du mois de février 2016

Les échantillons de sols ont été conservés au frais (environ 4°C) et en anaérobiose afin de dénombrier les bactéries sulfato-réductrices.

VII.2. Méthodes d'analyses

VII.2.1. Analyses des sols

VII.2.1.1. Caractéristiques abiotiques

Les mesures biologiques complètent les mesures classiques. Elles ne peuvent s'y substituer. Au contraire, pour interpréter correctement les résultats des déterminations biologiques, il est nécessaire de disposer des résultats de l'analyse de terre classique, sur le même prélèvement.

Dans les manuels de techniques d'analyses microbiologiques du sol, on recommande tout spécialement d'effectuer les mesures de pH, d'humidité ainsi que les dosages de carbone et d'azote totaux, mais il est préférable d'opérer des analyses aussi complètes que possible et de mesurer notamment la conductivité électrique, le gypse, le calcaire total. Ces analyses chimiques sont complétées par des mesures granulométriques.

Afin de tenir compte des propriétés particulières des échantillons de sol, des amendements aux méthodes classiques sont adoptés dans certains cas.

VII.2.1.1.1. Humidité

C'est la quantité d'eau contenue dans un sol. La mesure de ce paramètre est réalisée par la méthode Boyoucos. C'est la perte de poids après séchage à 105°C exprimée en pourcentage par rapport à la terre fraîche. Cette détermination est facile à réaliser par simple pesée après un séchage à l'étuve d'une durée suffisante (vérification de poids constant).

Chapitre VII. Méthodes d'études

L'utilisation de capsule en verre à couvercles rodés permet d'éviter une réhumectation au cours du transport de l'étuve à la balance. Elle est aussi appelée "Humidité résiduelle" quantité d'eau restante. La biomasse, l'activité microbienne sont exprimés sur la base du poids sec calculé à partir des résultats de contenu en eau.

VII.2.1.1.2. Densité apparente (Da)

Cette mesure est réalisée grâce à la méthode des cylindres. Elle correspond au rapport entre la masse sèche du sol et le volume apparent.

VII.2.1.1.3. Granulométrie

La texture d'un sol est révélée par son analyse granulométrique. Son principe est basé sur la vitesse de sédimentation des particules séparées et dispersées par destruction de la matière organique par une attaque à l'eau oxygénée. Le fractionnement de ces particules se fait par l'intermédiaire de la pipette de Robinson qui permet la détermination des fractions argileuses et limoneuses fines. Ensuite les sables fins et grossiers sont mesurés par tamisage (Urbanski et *al.*, 2011).

VII.2.1.1.4. pH

La mesure du pH est effectuée sur un extrait sol / eau (1:5) par la méthode électrométrique à l'aide d'un pH-mètre de laboratoire (AFNOR, 1999 ; Mathieu et Pieltain, 2009).

VII.2.1.1.5. Calcaire total

Le taux de calcaire total est déterminé par la méthode du calcimètre de Bernard, (méthode gazométrique) (Mathieu et Pieltain, 2009). Le volume de CO₂ dégagé suite à l'action de HCl sur le sol est proportionnel à la quantité de carbonate de calcium existante dans l'échantillon analysé.

VII.2.1.1.6. Gypse

Nous avons utilisé la méthode chimique, par le dosage des ions SO₄²⁻ libérés après une attaque aux carbonates d'ammonium et précipitation sous forme de chlorure de baryum (Coutinet, 1965, Vieillefon, 1979).

VII.2.1.1.7. Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique (C.E) représente le total des sels solubles (Van Hoorn et Van Alphen, 1998 *in* Omeiri, 2016).

Mesurée par un conductimètre à une température de 25°C sur des extraits dont le rapport (terre/eau) est de 1/5. (Aubert, 1978 ; AFNOR, 1999)

VII.2.1.1.8. Dosage du carbone organique

La teneur en carbone est déterminée par la méthode ANNE qui consiste en une oxydation de la matière organique par une quantité en excès de dichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$) en milieu sulfurique à température contrôlée ou à ébullition. La quantité réduite est en principe proportionnelle à la teneur en carbone organique. On considère que l'oxygène consommé est proportionnel au carbone de l'échantillon. L'excès de bichromate est dosé par une solution de sel de MOHR, qui réduit le bichromate, en présence d'un indicateur coloré (le diphénylamine) dont la couleur passe du bleu foncé au bleu vert. La teneur en carbone organique est exprimée en élément, en pour cent ou en pou mille (Aubert, 1978).

Matière organique

Elle est estimée après le dosage de carbone organique. Il est arbitrairement admis que la matière organique des sols est le double du carbone organique dans un sol non cultivé et que dans un sol cultivé, elle est égale à 1.73 fois la teneur en carbone organique (Duchaufour, 2001).

VII.2.1.1.9. Dosage de l'azote total

Le dosage est fait par la méthode de Kjeldahl ; l'azote des composés organiques est transformé en azote ammoniacal ; sous l'action de l'acide sulfurique concentré porté à l'ébullition, se comporte comme oxydant. Les substances organiques sont décomposées : le carbone se dégage sous forme de gaz carbonique, l'hydrogène donne de l'eau et l'azote est transformé en azote ammoniacal, ce dernier est fixé immédiatement par l'acide sulfurique sous forme de sulfate d'ammonium.

Pour accentuer l'action oxydante de l'acide sulfurique, on augmente la température d'ébullition, en ajoutant du sulfate de cuivre et du sulfate de potassium qui jouent le rôle de catalyseur. La matière organique totalement oxydée, la solution contenant de sulfate

d'ammonium est récupérée. On procède ainsi à un dosage de l'azote ammoniacal par distillation après l'avoir déplacé de sa combinaison par une solution de soude en excès. Une fois doser le carbone et l'azote, on peut calculer le rapport C/N qui traduit l'intensité de l'activité microbologique du sol (Baize, 2000).

VII.2.1.1.10. Mesure de la DCO (demande chimique en oxygène)

Pour estimer la quantité d'oxygène nécessaire à un échantillon donné pour être oxydé, la méthode normalisée (NF T 90-101) prévoit l'adjonction de dichromate de potassium pour permettre l'oxydation de toutes les matières organiques ou minérales susceptibles de l'être. Cette réaction s'effectue en milieu acide et le mélange est porté à ébullition en présence d'un catalyseur (AgSO_4). A l'issue de cette réaction, il suffit de titrer le dichromate restant en solution et d'estimer, par différence, la quantité d'oxygène demandée par la réaction. Ce titrage est réalisé en réduisant le dichromate restant par une solution de sel de Mohr [$\text{FeSO}_4, (\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4, 6\text{H}_2\text{O}$].

VII.2.1.1.11. Mesure de la DBO₅ (demande biologique en oxygène pendant 5 jours)

La mesure de la DBO₅ dépendra de l'activité des micro-organismes présents dans l'eau à analyser. La méthode normalisée (NF T 90-103) utilise un oxymètre : appareil électrique équipé d'une sonde qui donnera une mesure instantanée du taux d'oxygène présent dans l'eau. En mesurant le taux d'oxygène dans une éprouvette exempte d'air au jour de la préparation et après 5 jours de culture, il est possible de connaître la part d'oxygène consommée par les micro-organismes pour leurs besoins métaboliques sur cette durée.

VII.2.1.2. Caractéristiques biotiques

L'estimation de la masse microbienne est indispensable pour étudier les flux dans le sol de certains éléments tels que le carbone et l'azote. La microflore du sol est quantifiée en utilisant deux approches : d'une part une mesure globale de la biomasse par la méthode de fumigation extraction, et d'autre part le dénombrement des bactéries, champignons et des actinomycètes par la méthode de suspension dilution.

VII.2.1.2.1. Biomasse microbienne (Fumigation-extraction)

La biomasse microbienne est déterminée par la méthode de fumigation/extraction (Vance et al., 1987). L'exposition de la biomasse microbienne du sol à une atmosphère uniquement composée de chloroforme gazeux provoque sa mort par lyse cellulaire.

La méthode de fumigation-extraction au chloroforme utilisée pour la quantification de la biomasse est présentement l'une des plus populaires : elle permet une évaluation rapide, facilement reproductible et peu coûteuse, du carbone microbien, lequel est ensuite converti en quantité de biomasse (Pelletier, 1992). Le chloroforme est utilisé comme fumigant du fait, qu'il est un biocide efficace et qu'il ne solubilise pas la matière organique non microbienne du sol, ou ne la rend pas plus facilement décomposable (Jenkinson, 1976).

VII.2.1.2.1.1. Analyses du C_{microbien}

Le carbone de la biomasse microbienne des sols adhérents et des sols non adhérents est analysé par la technique de fumigation extraction.

Cette technique repose sur la mesure du carbone organique microbien par différence entre le carbone soluble contenu dans un échantillon fumigé par du chloroforme et celui du même échantillon non fumigé (Vance et *al.*, 1987). Un facteur de correction (K_{ec}) caractéristique de la nature du sol est ensuite appliqué pour déterminer le carbone total de la biomasse microbienne.

$$C_{\text{microbien}} = (C_{\text{échantillon exposé au Chloroforme}} - C_{\text{échantillon non exposé}}) / K_{ec}$$

K_{ec} : coefficient d'efficacité d'extraction du carbone de la biomasse microbienne. Voroney et *al.* (1991) suggèrent un K_{ec} de 0.35 qui est généralement la valeur de l'efficacité de l'extraction du carbone de la biomasse microbienne.

VII.2.1.2.1.2. Analyses du N_{microbien}

L'azote microbien est déterminé par le même principe que celui du carbone microbien, en comparant la quantité en azote extraite d'un échantillon de sol fumigé et celle du même échantillon de sol non fumigé. Le dosage de l'azote est fait selon la méthode de digestion Kjeldahl (Bremner, 1965).

$$N_{\text{microbien}} = (N_{\text{échantillon exposé au Chloroforme}} - N_{\text{échantillon non exposé}}) / K_{en}$$

K_{en} : coefficient d'efficacité d'extraction de l'azote organique microbien et de l'azote inorganique du sol. La valeur 0.68 indiqué par Brookes et *al.* (1985) a été considérée dans ce calcul.

VII.2.1.2.2. Dénombrement de la microflore tellurique par la méthode de suspension-dilution

L'état du sol peut être dressé par l'analyse de l'état des divers groupes des microorganismes : bactéries, actinomycètes, champignons, algues. La microflore du sol est caractérisée par le nombre des groupes séparés de la population microbienne du sol ; cependant, l'analyse de l'état des différents microorganismes dans le sol à une grande importance.

Parmi les méthodes de dénombrement indirectes, les deux méthodes les plus utilisées sont la méthode standard de culture sur boîte de pétri et la technique de dénombrement dite « technique du nombre le plus probable » (MPN). Cette dernière est très utilisée car elle permet l'estimation des populations bactériennes ayant des fonctionnalités données comme la sulfato-réduction (Cannavo et al, 2002 in Dassonville et Renault, 2005). Les techniques de dénombrement sur milieu de culture ne mettent ainsi en évidence que les bactéries viables (les bactéries capables de croître sur un milieu de culture spécifique) qui ne sont pas forcément les bactéries responsables des processus majoritaires dans l'écosystème étudié.

Le principe de la méthode indirecte s'appuie sur des cultures en milieu liquide ou solide après ensemencement avec des suspensions dilutions du sol. La mesure des densités microbiennes par la technique des suspensions-dilutions de sol est un bon indicateur général. Cette mesure est facile à réaliser, économique, et elle donne des résultats fiables et reproductibles (Janvier, 2007). Elle comprend plusieurs étapes allant de la préparation des suspension- dilutions jusqu'à l'interprétation des résultats.

La densité de la microflore est estimée par la méthode de suspension-dilution de sol (Pochon, 1954) et étalement sur les milieux de culture (Annexe 3). Trois répétitions ont été réalisées pour chaque traitement et les valeurs exprimées sont la moyenne des trois répétitions en prenant en compte la dilution utilisée.

VII.2.1.2.2.1. Microflore bactérienne

Le milieu de culture utilisé pour le dénombrement de la microflore bactérienne du sol est un milieu de gélose nutritive (Annexe 4) à l'extrait de terre. Il présente l'avantage d'être pas trop riche en éléments nutritifs.

15g de gélose —————> 100 ml d'extrait de terre (Pochon, 1954).

La lecture des résultats par le dénombrement des colonies apparues se fait après incubation pendant 24 heures.

VII.2.1.2.2.2. Microflore fongique

La méthode des suspensions dilutions, mise au point pour l'isolement des bactéries, est également utilisable pour les champignons. On s'efforce généralement d'éviter le développement concurrentiel des bactéries en acidifiant le milieu ou en y ajoutant de l'acide citrique à pH 4 (Davet, 1996).

Les champignons sont cultivés sur un milieu de culture gélosé à base de pomme de terre (PDA) (Annexe 4), et ensemencés avec des suspensions dilutions du sol à raison de 3 gouttes de chaque dilution (10^{-1} à 10^{-6}) soit 0,2 ml sont déposées sur chaque boîte et aussi étalées avec soin sur toute la surface. Trois répétitions ont été réalisées pour chaque dilution. Les comptages des Unités Formant Colonies (UFC) ont été effectués 7 jours après incubation à 28°C à l'obscurité. La taille de la communauté cultivable totale est exprimée en UFC g⁻¹ de sol sec. Le milieu PDA est un milieu non sélectif permettant d'estimer la densité de communauté fongique totale cultivable.

VII.2.1.2.2.3. Actinobactéries

Ensemencement avec des suspensions dilutions du sol d'un milieu gélosé Krainsky (Annexe 5) favorisant particulièrement la culture des actinomycètes en inhibant la partie celle des autres micro-organismes, numération des colonies développées. L'ensemencement avec des suspensions dilutions de terre préparées selon la technique habituelle ;

- on inoculera 3 boîtes de dilutions 10^{-3} à 10^{-7}
- Incubation à 28°C en position retournée.

La lecture des résultats se fait après 7 jours d'incubation.

VII.2.1.2.2.4. Microflore algale

Parmi les travaux relatifs à l'écologie de la microflore tellurique très peu concernent le groupe des Algues et les résultats fragmentaires obtenus découlent en majeure partie d'études ayant un caractère botanique et taxonomique (Roger et Reynaud, 1977).

Culture dans un milieu liquide (Annexe 4),ensemencés avec des suspensions-dilutions de terre de 10^{-1} à 10^{-6} . Le dénombrement est effectué par la méthode du nombre le plus probable NPP (Mac Grady) (Alexander, 1982). L'utilisation des milieux liquides pour la détermination du nombre le plus probable de germes au moyen des tables de Mac Grady (Annexe 5), présente l'avantage de demander peu de manipulations et de permettre une lecture rapide (Reynaud et Roger, 1977).

Les milieuxensemencés avec 1ml de chaque dilution par tube, sont placés en pleine lumière (mais à l'abri du soleil) pendant 3 semaines, les tubes étant inclinés pour permettre une meilleure aération.

VII.2.1.2.2.5. Bactéries sulfato-réductrices (BSR)

Les milieux de culture contiennent habituellement un composé organique donneur d'électrons (lactate) et des ions ferreux. La croissance des BSR est alors détectée du fait de la formation d'un précipité noir de sulfure de fer dans le milieu. En l'absence de composés sulfatés et en présence de sources organiques appropriées (pyruvate), une croissance peut être observée.

La salinité du milieu de culture et la température optimale de croissance sont fonction de l'environnement naturel de la souche à isoler. Les souches halophiles requièrent l'adjonction de 2,5% de NaCl dans le milieu. Les souches thermophiles requièrent une incubation des milieux à une température comprise entre 40° et 80° C (Loubinoux, 2001)

La croissance des BSR est lente (temps de génération de 3 à 6 heures), notamment lors du primo-isolement. Une des raisons expliquant cette croissance lente est que la concentration en H_2S influence le taux de croissance et pourrait, à forte concentration, arrêter la croissance (Postgate, 1984 ; Reis et *al.*, 1992). Ce phénomène est lié à la toxicité intrinsèque de l' H_2S et au fait que les sulfures rendent le fer peu soluble, donc non disponible pour la bactérie, en formant un précipité de sulfure de fer. La croissance de ces bactéries est ainsi fréquemment plutôt linéaire qu'exponentielle.

Les bactéries sulfato-réductrices ont été dénombrées sur le milieu de culture cité *in* Jacq (1970), qui est une variante du milieu proposé par Starkey (1985), modifié par Abd-El-Malek (1958) et Pichinoty (1966) (Annexe 4). Le principe repose sur l'ensemencement d'un milieu liquide nutritif contenant du sulfate, un donateur d'hydrogène convenable et de l'azote minéral

; observation de la formation de sulfure de fer sur un clou placé dans le tube qui procure au milieu un potentiel redox suffisamment bas par polarisation cathodique.

A partir de la suspension bactérienne dont on veut connaître le nombre de cellules viables, on réalise une série de dilutions (10^{-1} à 10^{-7}) dans des flacons de type pénicilline contenant 9 ml de milieu lactate-sulfate en anaérobiose. L'incubation se fait à 28°C pendant 14 jours. Sont comptés positifs les tubes présentant une coloration noire, et le calcul est fait en utilisant la méthode de calcul du nombre le plus probable (Mac Crady) avec 5 répétitions (Annexe 5).

VII.2.1.2.3. Évaluation de l'activité enzymatique du sol

L'activité β -glucosidase a été dosée par mélange de 1 g d'un sol humide avec 4 ml de 0,1 M de tampon universel modifié (pH = 6), 11 ml de toluène et 1 ml de 0,05 M PNG (P-nitro-phényl- β -glucosidase) et incubées pendant 1 h à 37° C. Après incubation, 1 ml de CaCl_2 0,5 M et 4 ml de 0,1 M de tampon Tris (pH = 12) ont été ajoutés pour arrêter l'activité enzymatique. La densité optique du filtrat a été mesurée à 400 nm (Tabatabai, 1994).

VII.2.1.3. Analyses statistiques

Lorsque le problème est de savoir si la moyenne d'une variable quantitative varie significativement selon les propriétés physico-chimiques du sol, il est préconisé de réaliser une analyse de variance. Ainsi, toutes les données ont été analysées par des analyses statistiques appropriées, à savoir :

- Des analyses de variance (ANOVA).
- Le test de Fisher qui intervient après l'ANOVA. Il permet de vérifier la significativité de la variable.

Quatrième partie

Résultats et discussion

Chapitre VIII. Effets de quelques systèmes de culture sur la diversité microbienne des sols oasiens

VIII.1. Introduction

L'évaluation multicritère des systèmes de culture implique d'acquérir des connaissances sur la composante biologique des sols, notamment sur le compartiment microbien. Les microorganismes essentiels dans les cycles biogéochimiques, sont particulièrement impliqués dans la transformation de la matière organique, via les activités enzymatiques dans les sols.

La qualité du sol est un indicateur important de la durabilité agricole et environnementale (Doran, 2002 ; Arshad et Martin, 2002). Il existe de nombreuses propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, et qui peuvent être utilisés comme indicateurs pour évaluer les effets de la perturbation de l'écosystème par l'activité humaine sur la qualité du sol (Gregorich et *al.*, 1994). Parmi les propriétés du sol les plus utilisées dans les études de perturbation anthropique sont le $C_{\text{organique}}$ et le N_{total} , la biomasse microbienne, et les activités enzymatiques (Raiesi, 2007).

Le Sahara Algérien occupe 80% de la superficie du pays (Bouammar, 2000). Il se caractérise par une hétérogénéité édaphique et par une diversification de systèmes de cultures.

La phœniciculture est considérée comme la plus ancienne des systèmes de cultures oasiens. La wilaya de Ouargla dispose d'un important potentiel phœnicicole. La céréaliculture sous pivot Au Sahara, un système de culture nouveau sur lequel les pouvoirs publics ont concentré leurs efforts. La céréaliculture a introduit quelque chose de radicalement nouveau, tant dans le paysage, la technique, que la finalité. L'homme en était réduit à suivre l'eau dans le Sahara, dorénavant, c'est presque l'eau qui est contrainte de jaillir là où il désire la trouver (Ould El Hadj, 2011). La serriculture, introduite dans la wilaya au début des années 1980, a également connu un développement progressif surtout dans le cadre de la mise en valeur (Khouazem, 1998).

La conduite de ces systèmes de culture nécessite une bonne compréhension des processus en jeu et les agriculteurs doivent respecter des itinéraires techniques pour ajuster la gestion agro-écologique des écosystèmes cultivés. Les contraintes de la fertilité des sols

cultivés sont encore mal connues dans les principales régions agricoles du pays et les informations existantes restent assez périphériques.

La réhabilitation de la fertilité de ces sols nécessite, donc, la prise en compte du compartiment microbien. L'objectif de cette phase est d'apporter des éléments de réponse à cette problématique.

VIII.2. Caractéristiques abiotiques

Les caractéristiques physico-chimiques des 04 types de sol issus des systèmes de cultures : phœniciculture (PHO), céréaliculture (CER), culture légumineuse (LEG), cultures protégées sous serre (CPSS) et du sol nu (SN) de la couche superficielle (0-30 cm) sont représentées dans le Tableau 3.

Tableau 3. Caractéristiques physico-chimiques du sol sous les différents systèmes de cultures étudiés

paramètres		PHO	CER	LEG	CPSS	SN
Texture		SL	SL	SL	SL	SL
Densité apparente (g/cm³)		1.8	1.8	1.6	1.6	1.5
Humidité du sol (%)		9.90	9.33	11.06	11.33	4.43
Calcaire totale (%)		4,26	6	6.36	4,64	3.2
C.E à 25°C (dS/m)		1.10	3.1	1.6	1.12	0.6
pH		8.76	8.61	8.29	8.41	8.68
Température du sol (°C)		16.8	20.59	20.78	20.5	20.62
Caractéristiques biochimiques	C.org (%)	0,34	0.28	0.34	0,22	0,18
	N (%)	0.1	0.21	0.36	0.14	0.1
	M.O (%)	0.58	0.48	0.58	0.38	0.30
	C/N	3.4	1.33	0.94	1.57	1.8

Les résultats obtenus indiquent que les propriétés physiques et chimiques des sols cultivés diffèrent de ceux du sol non mis en culture. La mise en culture des sols a entraîné une substantielle augmentation de l'humidité du sol en comparaison au sol non cultivé, et a significativement stimulé la CE et le C_{organique}.

D'après l'analyse granulométrique, et selon les limites des classes granulométriques utilisées dans le système USDA/FAO, nos sols présentent une similitude texturale (classe texturale de type sablo-limoneuse) avec la dominance de la fraction sable grossier. En général, les sols qui comptent un pourcentage élevé de sable ont une bonne porosité, mais leur capacité de rétention en eau est faible.

En ce qui concerne la densité apparente (D_a), selon Brady et Weil (2002), les horizons A des sols cultivés ont normalement une D_a variant entre 0,9 et 1,8 $g.cm^{-3}$. Les densités apparentes des sols étudiés se situent dans la gamme citée. Les valeurs inférieures à cette gamme caractérisent les couches organiques ou des cendres volcaniques. Bien que la densité apparente, la perméabilité et la capacité de rétention en eau des sols soient en grande partie liées à la texture, les pratiques culturales (les labours mécanisés, les apports ou pertes en matière organique, etc.) influencent aussi énormément la porosité dans les horizons de surface et par voie de conséquence, ces trois propriétés (Mbonigaba Muhinda et *al.*, 2009). La densité apparente augmente ainsi avec la proportion des éléments grossiers dans le sol.

Par ailleurs, la conductivité électrique du sol sous culture de blé (CER) est de l'ordre de 3.1 (dS/m) ce qui le classe parmi les sols très salés selon (Le Clech, 2000). Tandis que celle des autres sols cultivés oscille entre 1.1 dS/m, 1.6 dS/m. Cela nous a conduit à les classer parmi les sols salés selon le même auteur.

Cette salinité enregistrée dans les sols cultivés est justifiée, d'une part, par la forte évaporation particulièrement pour le sol sous culture de blé qui est le plus exposé aux rayonnements solaires du fait qu'il est sous pivot en plein champ, et d'autre part, par les techniques d'irrigation adoptées. En plus, les vents fréquents qui soufflent dans la région de Ouargla accentuent le dessèchement. Ceci est d'autant plus important que le couvert végétal est faible.

La salure n'a rien d'exagéré pour le sol nu (la conductivité électrique est de 0.6 dS/m) par rapport aux sols cultivés est due du fait que ce sol n'est pas irrigué. En effet, la salure des eaux d'irrigation augmente la teneur en sels dans le sol. En dehors de la salinisation naturelle, la salinisation secondaire se produit fréquemment comme une conséquence de la surexploitation et de l'irrigation causée par une mauvaise gestion des installations d'irrigation, mauvais drainage interne et qualité médiocre de l'eau d'irrigation (Liang et *al.*, 2005, Munns,

2009). L'irrigation des terres cultivées conduit à la salinisation de beaucoup de sols, en particulier dans les régions arides et semi-arides (Munns, 2009).

Les eaux salées dans la région Saharienne d'Algérie constituent la majorité des eaux d'irrigation disponibles, elles sont à ranger dans les classes 3 et 4 (Dubost, 1994). 38,92 % des palmeraies sont irrigués avec des eaux fortement salées, 52,7 % sont irrigués avec des eaux très fortement salées, et enfin 8,38 % sont irrigués avec des eaux excessivement salées. Le faciès des eaux d'irrigation est de prédominance chloruré sodique (A.N.R.H., 2004). Leur effet sur le sol et les végétaux est d'autant plus nocif que leur utilisation est mal étudiée. Cependant, ces eaux conviennent au palmier dattier, plante tolérante aux sels à moyennement tolérantes entre autre le figuier, le grenadier, l'olivier (Daddi Bouhoun, 2010).

En revanche, la demande de l'eau douce est constamment en augmentation pour différentes utilisations compétitives ce qui créer une nécessité d'utilisation de l'eau salée en agriculture. Le recours à l'utilisation de l'eau salée devient de plus en plus une nécessité absolue vu l'absence ou la rareté des ressources d'eau douce dans certaines régions. Le manque d'eau de bonne qualité constitue désormais une contrainte majeure lorsque l'on veut créer de nouveaux périmètres irrigués. L'eau salée sera utilisée de plus à l'avenir à cause de développement de la demande de l'eau d'irrigation. Cependant, les eaux salées peuvent être utilisées en irrigation sur certains sols si des pratiques appropriées de gestion sont appliqués (Hamdy, 1991 *in* Masmoudi, 2011).

Toutefois , il faut signaler que l'environnement hydro-édaphique à Hassi Ben Abdallah, au versant de la cuvette de Ouargla, est moins dégradé et est caractérisé par une salinité des eaux d'irrigation et des sols pauvres en sels solubles et peu solubles, une nappe phréatique profonde, l'absence d'obstacles de croûtes gypseuses et un sol moins humide (Daddi Bouhoun, 2010)

Les valeurs de pH oscillent entre 8,29 et 8.76. Dans les régions arides, les sols sont généralement alcalins ($7,5 < \text{pH} < 8,5$) (Daoud et Halitim, 1994). Le pH augmente généralement avec les teneurs en calcaire dans le sol.

Le taux d'humidité relativement élevé dans les sols cultivés par rapport au sol nu dû essentiellement à l'irrigation (fréquence ou dose), et teneur en eau faible peut s'expliquer d'une part par : l'aridité du climat (le taux d'évaporation est supérieur à celui des

précipitations), d'autre part, la capacité de rétention en eau de ce sol est faible, et la texture contenant un faible pourcentage d'argile. La faiblesse de celui-ci diminue la capacité de stockage de l'eau qui s'infiltrerait rapidement vers le sous-sol.

Toutefois, il faut signaler que le taux d'humidité est relativement plus élevé dans le sol sous serre par rapport aux autres sols. Ceci est dû principalement à la faible évapotranspiration en sol sous serre.

D'une manière générale, et selon Daddi Bouhoun (2010), l'humidité est faible au versant de la cuvette de Ouargla, à Hassi Ben Abdallah où l'humidité de leurs sols grossiers est fonction seulement de l'irrigation, car la nappe phréatique est profonde.

Les teneurs en calcaire oscillent entre 6.36% et 3.2% pour les sols étudiés. Ces sols sont donc peu à modérément calcaires (Baize, 2000).

En ce qui concerne les caractéristiques biochimiques le taux de carbone est faible pour l'ensemble des sols étudiés. Il varie entre 0.18% et 0.34%. Ce taux est inférieur à 1 %. D'après Duchaufour (1984), la teneur en matière organique dans les zones arides ne dépasse pas 1% ce qui correspond parfaitement à nos résultats.

En effet, l'intensification des systèmes de culture et l'augmentation des rendements ont entraîné une diminution des teneurs en matière organique des sols cultivés, leur conférant ainsi une moindre fertilité et une sensibilité accrue à la dégradation (Sleutel et *al.*, 2003 ; Van-Camp et *al.*, 2004 in Annabi et *al.*, 2009).

La matière organique est la source de carbone et d'énergie pour les organismes hétérotrophes. La faible richesse en matière organique des sols des zones arides est due à la faible couverture végétale dans ces zones.

La matière organique présente un effet favorable sur le sol (U.S.S.L., 1954), améliore sa structure et agit ainsi contre l'effet du sodium (Mallouhi et Jacquin, 1988 ; Mallouhi, 1989). Elle influence la structure du sol, favorise l'établissement de bonnes conditions physiques, augmente la rétention d'eau des sols sableux (Stevenson, 1994 ; Craswell et Lefroy, 2001; Annabi et *al.*, 2007) et la capacité d'échange cationique (CEC) (Craswell et Lefroy, 2001), et surtout, constitue une source majeure d'énergie et d'éléments nutritifs pour la faune et la microflore (Pelletier, 1992). La perte de matière organique dans les sols agricoles a été

identifié comme l'un des principaux facteurs qui influent sur l'appauvrissement de la qualité des sols (Trasar-Cepeda et al., 2008).

La pauvreté organique des sols de Ouargla (Hamdi Aïssa, 2001) ne favorise pas la structuration des sols.

Le taux d'azote est relativement plus élevé dans les parcelles sous légumineuse (luzerne) et nettement plus faible dans le sol non cultivé. Ainsi, on peut dire que les cultures de luzerne favorisent la conservation de l'azote dans ce type de sol, tandis que les autres le font disparaître plus rapidement.

La carence en azote dans les autres sols indique que ces sols sont classés comme étant des sols très pauvres en azote (Henin et al., 1969) ; par ailleurs, le sol sous culture de légumineuse (LEG) est classé parmi les sols pauvres. Ceci est dû à la réduction de l'apport de matière organique et d'une dégradation rapide de celle-ci surtout en été. Tous les chercheurs qui se sont penchés sur les activités biologiques des sols des régions arides ont souligné leur faible teneur en matière organique et plus particulièrement leur taux très bas d'azote organique (Sasson, 1967 ; Oustani, 2006 ; Karabi, 2010).

Le rapport C/N qui nous renseigne sur l'activité biologique est inférieur à 8% pour l'ensemble des sols étudiés. Ceci traduit la faiblesse des deux éléments les plus importants et une tendance à une minéralisation trop rapide, perte d'éléments fertilisants (Henin et al., 1969).

VIII.3. Caractéristiques biotiques

Le statut microbiologique d'un sol, paramètre essentiel à sa fertilité, est apprécié le plus souvent de manière globale par les densités bactériennes et fongiques, les biomasses microbiennes C, N, complétées par l'évaluation de l'activité enzymatique du sol.

VIII.3.1. Densité microbienne

Dans le cas de cette étude, les valeurs de la densité bactérienne, et la densité fongique des sols cultivés sont significativement élevées par comparaison à celles du sol non cultivé.

Ainsi, les résultats des dénombrements microbiologiques (tableau 4) laissent apparaître des variations entre les sols en nombre de germes avec des valeurs maximales pour le sol PHO suivi par celui des LEG ensuite le sol de CER, le sol CPSS et enfin le SN.

On peut se rendre compte que malgré l'homogénéité de ces sols, les systèmes culturaux laissent leur empreinte sur les caractères de l'activité microbologique de ces terres.

En effet, la vie microbienne des sols est relativement limitée dans la plupart des palmeraies où l'on pratique une culture extensive sous palmiers et dans lesquelles les sols sont insuffisamment pourvus en matière organique et en eau (Arnon 1972 ; Bryssine et Toutain, 1970).

Tableau 4. Densité des microorganismes du sol sous différents systèmes de culture

UFC.g ⁻¹ .s.s	PHO	CER	LEG	CPSS	SN
Bactéries (x 10 ⁶)	140 ± 10.14	83.6 ± 4.2	131,56 ± 5.33	52.64 ± 2.11	0.22 ± 0.036
Champignons (x 10 ⁵)	13.2 ± 2.58	5.5 ± 1.15	19.04 ± 2.87	9.69 ± 1.12	0.50 ± 0.08

UFC.g.s.s⁻¹ : unité formant colonie par gramme de sol sec.

Ces variations de densité peuvent être expliquées par le fait que les microorganismes sont soumis à quelques influences surtout celles des conditions physiques et physico-chimiques du sol (taux d'humidité, salinité...etc), et aussi des variations notables au niveau des facteurs biochimiques (nutritionnels et énergétiques concernant la matière organique). Cette densité est d'autant plus faible dans les sols sahariens où les substrats énergétiques et nutritifs sont réduits, combinés aux effets des conditions pédoclimatiques extrêmes à savoir : température trop élevée, faible humidité et pH trop alcalin du sol.

Dans les sols agricoles, les cultures (principales et intermédiaires) qui se succèdent en rotation, et les modalités de gestion des résidus de culture et du travail du sol, déterminent la quantité, la nature et la localisation des litières végétales restituées au sol, ressource trophique des communautés microbiennes du sol (Recous et al., 2015).

Les résultats montrent que la densité microbienne la plus faible est enregistrée dans le sol nu. Ceci corrobore l'hypothèse selon laquelle l'absence de couvert végétal sur un sol entraîne une baisse significative de la vie du sol et donc de la biomasse microbienne (Bouthier et al., 2014). Ainsi, plusieurs études ont mis en évidence l'effet de l'utilisation des terres ou

du couvert végétal sur les communautés microbiennes (Zak et Kling, 2006 ; Kasel et *al.*, 2008; Lauber et *al.*, 2008 in Zinger, 2009).

Selon Zombre (2006) ; Ali-Haimoud (1980), de point de vue nutritionnel les sols nus sont beaucoup moins riches en microorganismes que les sols sous végétation et aux sols cultivés. En effet, le nombre et l'activité des microorganismes dépendent essentiellement de l'énergie qui peut être libéré à la suite de la décomposition de la matière organique (Boulard et Moreau, 1962).

La biomasse microbienne est considérée comme un indicateur des changements provoqués par la matière organique du sol (Powlson et Jenkinson, 1981). La microflore du sol a besoin d'un ensemble de nutriments ou métabolites, organiques ou des éléments chimiques.

Les exsudats et les débris racinaires sont la source de 30 à 40% des entrées organiques dans la grande majorité des écosystèmes terrestres. Et à cause de ces entrées, la rhizosphère constitue une zone d'activité microbienne très active (Sorensen, 1997). Cette zone du sol, située immédiatement au contact des racines, héberge une grande diversité de microorganismes (Bottner et Billes, 1987), et beaucoup d'invertébrés comme les nématodes et les protozoaires (Griffiths et *al.*, 1999).

Divers chercheurs ont signalé que les populations microbiennes ont une densité dix fois plus grande dans la rhizosphère que dans un sol dépourvu de racines. A proximité de la rhizosphère, les microorganismes sont stimulés par la fixation d'azote atmosphérique (la culture de luzerne) et les apports de carbone et d'énergie d'origine végétale et par les composés sécrétés par les racines (Clark, 1969 in Batra et Monna, 1997).

Il faut signaler, également, que la vie microbienne présente une activité réduite dans les sols sableux, le phénomène étant d'autant plus net que les terrains sont plus dégradés et pauvres en colloïdes. En effet, l'action directe des particules argileuses tient à leur effet protecteur des substances organiques par formation de complexes organo-minéraux moins accessibles à l'activité microbienne, ainsi la minéralisation de l'azote est ralentie par l'argile (Cheloufi et Jacquin, 2003).

L'importante densité microbienne enregistré dans le sol sous culture de légumineuse (LEG) est due certainement aux taux d'humidité, de matière organique relativement élevée, et à la salinité qui est moins importante par rapport aux sols cultivés par une céréale et le sol nu,

ce qui stimule la multiplication des germes microbiens (champignons et bactéries). Il est à signaler que les résultats de Mokrane et *al.* (2013), ont montré une charge microbienne légèrement plus faible dans des palmeraies abandonnées avec des sols secs, compactés et mal aérés dans la région de Ouargla.

VIII.3.1.1. Densité bactérienne

Les densités de la microflore bactérienne ont variées diversement selon les différents systèmes de culture (Fig. 19).

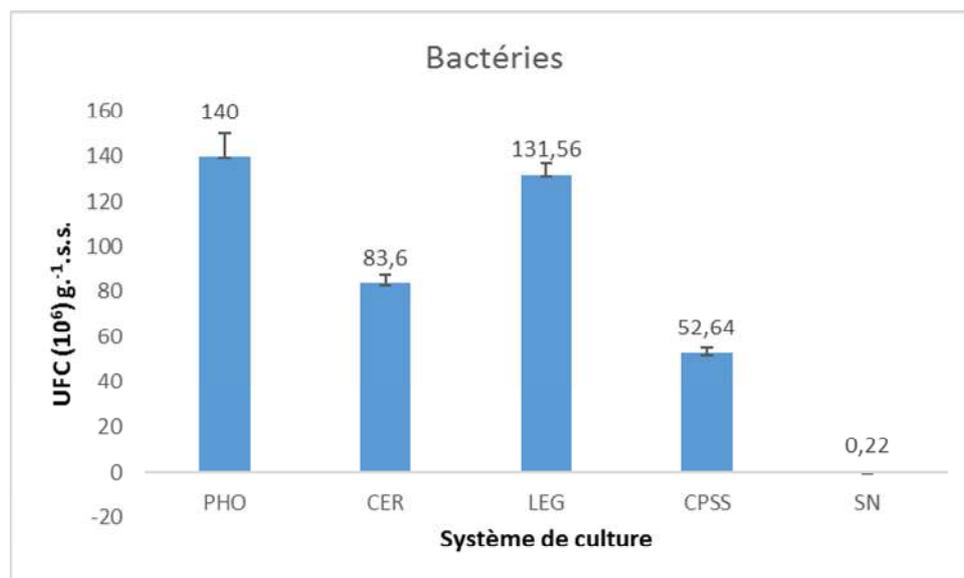


Figure 19. Représentation graphique de la densité bactérienne du sol sous différents systèmes de culture exprimée en UFC.g⁻¹.s.s

Les résultats des expérimentations témoignent de la présence de variations statistiquement très hautement significatives entre les différents systèmes de culture pour la variable Bactéries. La probabilité d'erreur est de l'ordre de 0.0001 (Tableau 5).

Tableau 5. Analyse de la variance pour la variable bactéries du sol sous différents systèmes de culture

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Système de culture	4	40114,1050	10028,52624	326,5978	< 0,0001
Erreur	10	307,0604	30,7060		
Total corrigé	14	40421,1654			

Le test de Fisher (LSD)/ Analyse des différences entre les modalités avec intervalle de confiance à 95% (Tableau 6), a montré l'existence de quatre groupes à savoir le groupe A qui regroupe les deux systèmes de cultures PHO et LEG avec un intervalle de 131.56 x 10⁶

UFC.g⁻¹.s.s à 140 x 10⁶ UFC.g⁻¹.s.s, le groupe B (CER) avec une moyenne de 83.6 x 10⁶ UFC.g⁻¹.s.s, le groupe C (CPSS) avec une moyenne de 52.65 x 10⁶ UFC.g⁻¹.s.s et le groupe D (SN) avec une moyenne de 0.22 x 10⁶ UFC.g⁻¹.s.s.

Tableau 6 .Test de Fisher (LSD)/ Analyse des différences entre les modalités avec intervalle de confiance à 95% (variable bactéries du sol sous différents systèmes de culture)

Système de culture	Moyenne estimée	Groupes			
PHO	140 x 10 ⁶	A			
LEG	131.56 x 10 ⁶	A			
CER	83.6 x 10 ⁶		B		
CPSS	52.65 x 10 ⁶			C	
SN	0.22 x 10 ⁶				D

En effet, les effets positifs des cultures de couverture sur la biomasse bactérienne ont été mis en évidence (Moreno et *al.*, 2009). Selon Duchaufour (2001), les bactéries sont surtout abondantes autour des racines de certaines plantes (graminées, légumineuses) au sein de la rhizosphère.

Campbell (1985) signale pour le rapport R/S (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. Barea et Azcon-Aguilar (1982) rapportent des travaux montrant d'importantes fluctuations chez les populations rhizosphériques et une faible activité bactérienne dans le sol nu. L'abondance des bactéries, est quant à elle liée à la teneur en Carbone organique. Les bactéries sont favorisées par le système racinaire du couvert végétal et la concentration du carbone dans l'horizon de surface.

En comparant les sols des quatre systèmes de cultures il ressort que le sol sous serre (CPSS) présente une infériorité numérique quant aux bactéries par rapport aux autres sols. Ceci est dû certainement à l'application des produits phytosanitaires (pesticides, insecticides, herbicides,..).

En effet, Une fois appliqué, les produits agrochimiques persistent dans le sol pendant de longues périodes et ont des impacts négatifs sur la flore microbienne du sol (Araujo et *al.*, 2003). Une diminution conséquente du nombre de microbes perturbe le processus spécifique effectué par un individu ou un groupe dans la chaîne trophique. Une série de modifications est déclenchée dans presque toute la flore microbienne/ faune, ce qui conduit à la modification

des modules proies-prédateurs qui peuvent causer des changements dans l'agrégation du sol, la chimie du sol, le pH et l'épuisement de la matière organique (Bossuyt et *al.*, 2001).

Dans un premier temps, l'application de pesticide diminue le nombre des microbes et l'activité microbienne, mais comme le produit chimique persiste, les microbes développent une certaine tolérance ou résistance et peuvent ainsi recoloniser le sol (Kalia et Gosal, 2011). L'application de bactéricides, en particulier des antibiotiques dans les études de laboratoire, les serres vitrées et sur le terrain, diminue le nombre de bactéries du sol (Kalia et Gosal, 2011).

L'effet de la salinité est cependant remarqué dans le sol CER qui présente une densité bactérienne également faible. En effet, La salinisation et la sodication affectent les propriétés physico-chimiques, biochimiques et biologiques du sol (Gill et *al.*, 2008;. Rietz et Haynes, 2003;. Singh et *al.*, 2013, 2013 *in* Singh, 2015). Une faible teneur en matière organique et une salinité élevée peuvent créer un environnement indésirable pour le développement de la communauté bactérienne et fongique (Yuan et *al.*, 2007), en revanche, un taux de matière organique élevée et une faible salinité peuvent favoriser la croissance fongique . Cependant, chez les bactéries, le caractère de résistance au sel varie considérablement d'une espèce à l'autre et à l'intérieur d'une même espèce. Parmi les espèces bactériennes susceptibles de croître à des concentrations en chlorure de sodium très élevées (35%), signalons une espèce mise en évidence par Meklat et *al.* (2013) dans la région de Bamendil à Ouargla (Sud-Est algérien). Il s'agit d'*Actinopolyspora algeriensis sp.*

En effet, les résultats obtenus concernant les effets de la salinité sur les espèces microbiennes, restent limités voire controversés. L'addition au sol de sels solubles a pour effet de diminuer l'activité microbienne, mais les valeurs seuils varient selon les auteurs.

La microflore totale n'est sensible que lorsque la conductivité électrique de l'extrait de pate saturée à 25 °C atteint 62 – 66 dS/m (Dommergues, 1962). Alors que l'inhibition de l'activité microbienne est constatée à moins de 22 dS/m (Frankenberger et Bingham, 1982), et qu'une diminution de l'activité microbiologique totale du sol est observée à des valeurs de salinité très faibles (moins de 1% de NaCl) (Sindhu et Cornfield, 1967 ; Laura, 1974 *in* Dellal et Halitim, 1992). D'après Sabaou (1980), la salinité n'a pas d'effet sur la flore bactérienne, ce qui laisse supposer que cette dernière soit plus résistante aux sels. L'effet de la salinité ne commence à être évident que pour des valeurs plus élevées (supérieurs à 13 dS/m).

Il ressort, également, de nos résultats que les bactéries sont les microorganismes les plus dominants dans nos cinq sols. En effet, le taux des bactéries non-mycéliennes est toujours plus élevé que celui des autres microorganismes. Ceci est confirmé par les résultats obtenus par d'autres auteurs (Sabaou et *al.*, 1992; Mokrane et *al.*, 2013). Cette dominance pourrait être attribuée à l'ubiquité des bactéries qui sont capables de coloniser des milieux différents et elles peuvent être actives pour de grands domaines de température, d'acidité, d'alcalinité, de pression, de salinité... (Dommergues et Mangenot, 1970).

En effet les bactéries constituent l'essentiel de la microflore du sol et sont extrêmement nombreuses. On estime par exemple qu'1g de sol contient entre 10^6 et 10^9 de Bactéries (Soltner, 2003). Selon Dommergues et Mangenot (1970), dans les sols soumis à des conditions écologiques très dures (région arides), les densités bactériennes sont évidemment beaucoup plus faibles ; mais elles tombent rarement au-dessous de 10^4 à 10^5 dans les horizons superficiels, des valeurs qui sont en concordance avec nos résultats. Dans des conditions exceptionnellement favorables, on a dénombré, par la méthode de culture, jusqu'à 10^{11} bactéries par gramme du sol.

VIII.3.1.2. Champignon

Pour la microflore fongique, on constate que la densité des champignons dans les sols cultivés est relativement élevée par rapport au sol nu avec une légère prédominance pour le sol LEG (Fig. 20).

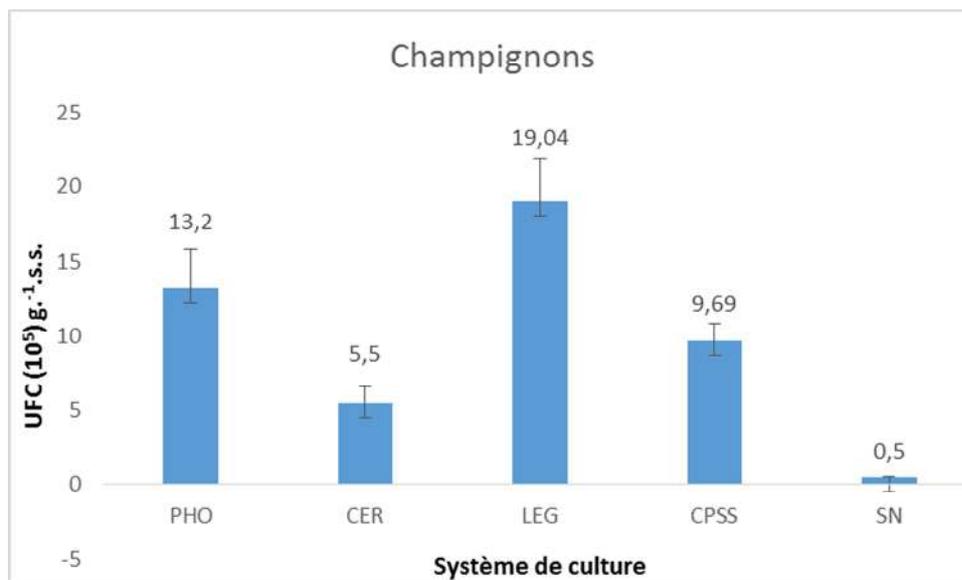


Figure 20. Représentation graphique de la densité fongique du sol sous différents systèmes de culture exprimée en UFC.g⁻¹.s.s

L'analyse de la variance au risque de 5% montre que, pour les valeurs de la microflore fongique enregistrées, la différence entre les sols est très hautement significative (tableau 7).

Tableau 7. Analyse de la variance pour la variable champignons du sol sous différents systèmes de culture

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Système de culture	4	606,0186	151,5046	43,1463	< 0,0001
Erreur	10	35,1142	3,5114		
Total corrigé	14	641,1328			

Ainsi, le test de Fisher à intervalle de confiance (95%) classe nos échantillons en quatre groupes homogènes (tableau 8).

Tableau 8. Test de Fisher (LSD)/ Analyse des différences entre les modalités avec intervalle de confiance à 95% (variable Champignons du sol sous différents systèmes de culture)

Modalité	Moyenne	Groupes			
LEG	19,0433	A			
PHO	13,2333		B		
CPSS	9,6933		B	C	
CER	5,5000			C	D
SN	0,5000				D

En effet le type du peuplement végétal agit qualitativement et quantitativement sur les champignons (Legras et *al.*, 2007).

Nos résultats se rapprochent de ceux de Oustani (2006) qui a enregistré une densité fongique de l'ordre de 3.3×10^4 UFC.g.s.⁻¹ sur un sol nu provenant de la ferme d'ERAD /AGRO SUD situé dans la zone de Hassi Ben Abdallah (même zone d'étude). Cependant des valeurs beaucoup plus faibles ont été enregistrées dans les travaux de Aloui (2014) sur les sols des mêmes systèmes de culture ainsi que sur le sol nu. Ces valeurs oscillent entre 3.73×10^3 UFC.g.s.⁻¹ pour le sol sous serre et 0.26×10^3 UFC.g.s.⁻¹ pour le sol nu. Cette faiblesse de densité fongique enregistrée lors de cette étude peut être expliquée par la micro hétérogénéité du sol.

Le contexte physicochimique est à prendre en compte notamment la teneur en matière organique, le pH, la texture du sol. L'utilisation et l'occupation du sol ainsi que le type de travail du sol pour les parcelles agricoles peuvent avoir une forte influence sur la microflore

fongique. Les études à l'échelle du référentiel BioSol (GESSOL I et II ; ADEME BIO I et II) ont démontré la prédominance des paramètres locaux (mode d'utilisation des sols, couverture des sols, types de sol, pratiques,...) par rapport aux paramètres plus globaux (localisation, climat,...) sur la gamme de variation de la biomasse fongique (Legras, SD).

Cependant, en règle générale, les champignons saprophytes pénètrent moins à l'intérieur du sol que les bactéries. Ils sont en effet le plus souvent associés à de la matière organique peu décomposée (Kilbertus et Reisinger 1975) et disparaissent pour être remplacés par les Procaryotes dès que le support nutritif est épuisé (Arpin et *al.*, 1980).

Quant à la sensibilité à la salinité, on admet que les microorganismes les plus sensibles sont les champignons, ce qui est montré par certaines études notamment celles de Ali-Haimoud et *al.* (1980). Ainsi nous avons enregistré la densité fongique la plus faible dans le sol sous céréale qui présente la conductivité électrique la plus importante. Toutefois, il faut signaler que cette règle souffre de très nombreuses exceptions ; on connaît des champignons appartenant aux genres *Penicillium* et *Aspergillus* résistant bien à des teneurs élevées en NaCl (10 à 20%), de sorte que la salinité ne joue pas toujours un rôle déterminant dans la distribution de la microflore fongique (Dommergues et Mangenot, 1970). Ceci est confirmé par les résultats obtenus par Oustani (2006) sur sol salé et sol non salé qui montrent une densité fongique plus importante en sol salé par rapport au sol non salé.

Dans ce cadre Sabaou (1988), a prouvé, également, que la population fongique énumérée dans plusieurs palmeraies du Sud Algérien, à forte teneur en sels est plus importante par rapport à des sols non salés. D'après cet auteur la population fongique ne semble pas être inhibée par la salinité. Ainsi, Muhammad et *al.* (2006) ont constaté une plus grande fraction de la biomasse fongique dans des sols plus salés par rapport à des sols moins salés. Ces diverses constatations sont confirmées par Karabi et *al.* (2016) lors d'une étude comparative entre un sol salé sableux et un sol non salé argileux. Cette étude a montré que le sol salé sableux présente une biomasse fongique relativement plus importante que le sol non salé argileux.

Ceci fait ressortir que, pour les champignons, l'effet texture prend le dessus sur l'effet salinité. En effet, Dommergues et Mangenot (1970) ont montré qu'un bacille ou une autre population mixte préfèrent une texture fine, alors qu'un *Aspergillus* préfère une texture

grossière. L'effet de ces variations de la texture peut s'exercer aussi par l'intermédiaire du facteur eau dont la dynamique est étroitement liée à la composition granulométrique du sol.

Adu et Oades (1978) *in* Oustani (2006) montrent qu'un substrat carboné apporté à un sol sablo limoneux (18% d'argile), est dégradé en premier lieu par l'activité fongique, secondée ensuite par l'activité bactérienne ; alors que dans le cas d'un sol argileux (60% d'argile) ce substrat est simultanément décomposé sous l'action des champignons et des bactéries. Selon Gawar (1999), les minéraux argileux ont un effet sur la respiration des champignons en limitant leur multiplication par la viscosité de ces minéraux. La plupart des champignons sont des microorganismes aérobies, ce qui explique la diminution de leur nombre au fur et à mesure que la texture devient fine (Robert, 1996).

Cependant, nous avons remarqué également une faible densité des champignons dans le sol CPSS qui a subi des traitements phytosanitaires. En effet, Les champignons du sol ont une plus grande capacité à résister à l'application des pesticides, mais l'application de fongicides affecte considérablement leur population et une variété de processus de minéralisation / décomposition contrôlés par eux (Kalia et Gosal, 2011).

En général, la majorité des herbicides n'ont pas un impact négatif considérable sur la population des champignons du sol, cependant, quelques insecticides peuvent avoir une inhibition initiale sur les champignons du sol, suivi par un effet stimulateur. Les champignons appartiennent au groupe des micro-organismes qui, après une réponse initiale sensible à la présence de pesticides dans le sol, peuvent rapidement établir un métabolisme normal, leur permettant même de se multiplier, en particulier dans le cas de l'application de fongicide et d'insecticide (Mandic et al . 2005).

On constate, également, que le nombre des champignons est moins important que celui des bactéries dans le sol. Ceci est dû à la particularité que possèdent les champignons vis-à-vis le pH. En effet les champignons préfèrent les milieux acides ou ils ne rencontrent pas la concurrence des bactéries (Morel, 1996). Le pH de nos sols est alcalin ce qui explique la faible densité des champignons par rapport aux bactéries. Selon Davet (1996), la densité de la microflore fongique, varie de 8×10^3 à 10^6 unités par g de sol. Les champignons ne sont pas les plus nombreux des micro-organismes du sol, mais leur poids est très important, du fait de leur grande taille, comparativement aux bactéries (Huber et Schaub, 2011).

Toutefois, il faut signaler, que la densité des champignons dans les sols cultivés est supérieure à celle dans le sol nu. En effet, la répartition et le nombre des champignons dans le sol sont affectés par nombreux facteurs du milieu, tels que : la teneur du sol en matière organique au dépend de laquelle vivent ces microorganismes hétérotrophes. Ainsi, la pauvreté de nos sol en matière organique explique la faible densité des champignons surtout au niveau du sol nu (Pendleton et al., 2003). Ce dernier, moins humide, renferme quand même une densité fongique considérable, ce qui montre une forte adaptation des champignons du sol aux conditions de stress hydrique attribuée à leur faculté de produire des spores (Sasson, 1967).

VIII.3.2. C_{microbien} et N_{microbien}

La biomasse microbienne est de plus en plus considérée comme un marqueur écologique (Smith et al., 1990 ; Davet, 1996 ; Franco et al., 2004) et un indicateur utile de l'amélioration ou de la dégradation des sols (Ros et al., 2003 ; Gil- Sotres et al., 2005). Elle est aussi considérée comme une partie de la matière organique du sol (Smith et al., 1990). La « biomasse microbienne », considérée comme le compartiment clé des transformations de la matière organique dans le sol (Cheloufi et al, 2003). La biomasse microbienne s'avère effectivement le critère biologique le plus fiable et le plus discriminant pour juger rapidement de l'état de fertilité des sols. Les paramètres les plus utilisés pour estimer la biomasse microbienne sont les C et N microbiens (Joergenson, 1995 ; Davet, 1996).

Les résultats obtenus pour le C_{microbien} et le N_{microbien}, ont montré que ces valeurs ont diversement varié selon le système de culture (Tableau 9). En général, la biomasse microbienne d'un sol agricole varie entre 0 et 800 mg C/kg (Salducci, 2007).

Tableau 9. Résultats de la biomasse microbienne (C_{microbien} et N_{microbien}) du sol sous les différents systèmes de culture étudiés

Système de culture	C _{microbien} (mg C.Kg ⁻¹ de sol sec)	N _{microbien} (mg N.kg ⁻¹ de sol sec)
PHO	209.2± 5.48	7.4 ± 0.026
CER	96.14 ± 4.258	4.48 ± 0.176
LEG	236.61 ± 2.607	13.88 ± 1.164
CPSS	135.3 ± 2.443	7.1 ± 0.291
SN	32.65 ± 0.67	2.3 ± 0.07

L'analyse de la variance montre des différences très hautement significatives entre les différents systèmes de culture pour la variable $C_{\text{microbien}}$ (tableau 10). Ainsi le test de Fisher montre la présence de 5 groupes homogènes (tableau 11).

Tableau 10. Analyse de la variance pour la variable $C_{\text{microbien}}$ du sol sous les différents systèmes de culture étudiés

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Système de culture	4	82718,9192	20679,7298	1684,2850	< 0,0001
Erreur	10	122,7805	12,2780		
Total corrigé	14	82841,6997			

Tableau 11. Test de Fisher (LSD)/ Analyse des différences entre les modalités avec intervalle de confiance à 95% (variable $C_{\text{microbien}}$ du sol sous les différents systèmes de culture étudiés)

Modalité	Moyenne	Groupes				
LEG	236,6133	A				
PHO	209,2000		B			
CPSS	135,3000			C		
CER	96,1400				D	
SN	32,6500					E

En conditions pédoclimatiques comparables, la taille du compartiment biomasse microbienne est directement fonction du carbone disponible pour satisfaire les besoins énergétiques des microorganismes.

On constate que le $C_{\text{microbien}}$ est environ deux fois plus élevé dans les sols LEG et PHO que dans les sols CER et CPSS (Fig. 21).

Il n'y a pas de différence significative entre le sol LEG et le sol PHO, bien que la première soit relativement plus riche en matière organique.

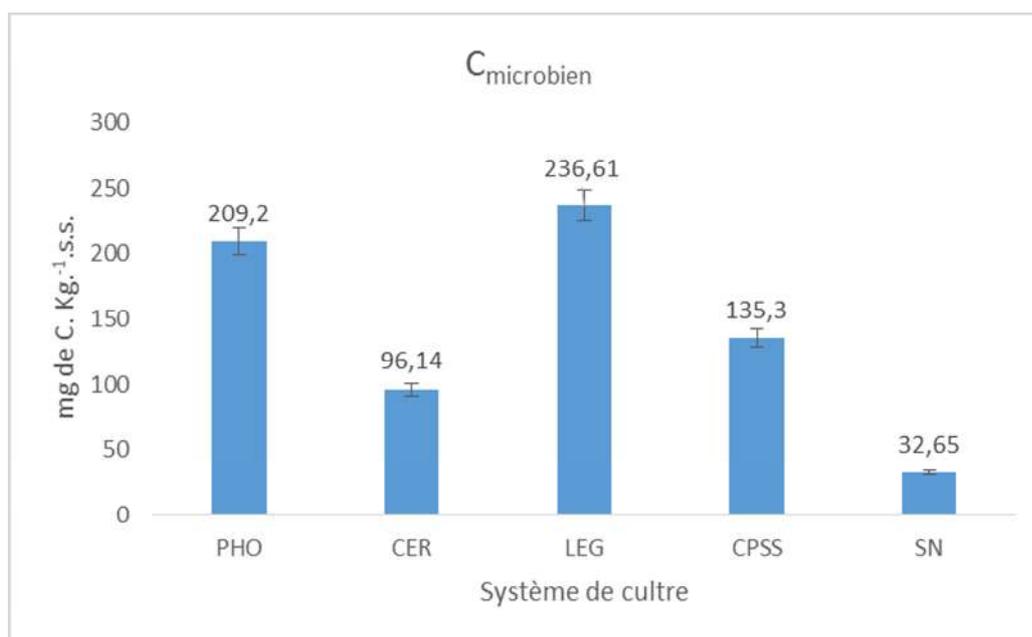


Figure 21. Représentation graphique des valeurs du C_{microbien} du sol sous les différents systèmes de culture étudiés

Le faible niveau du C_{microbien} enregistré dans le sol sous céréale et le sol sous serre par rapport aux autres sols cultivés, est dû à la teneur en carbone organique très limitée (Ilstedt et Singh, 2005), l'effet toxique des traitements phytosanitaires, et la possibilité que les microorganismes du sol ne sont pas adaptés à ces produits agrochimiques (Garcia et Nahas, 2012), ainsi qu'à la teneur en sels dans le sol sous céréale.

La faible teneur en MO du sol intensifie les effets négatifs de la salinisation (Qadir et Schubert, 2007).

Les activités biochimiques et microbienne sont très sensibles à la salinisation dans les sols alcalins (Pankhurst et *al.*, 2001). Une augmentation de la salinité et sodicité affaiblirait l'accessibilité de la MO du sol de la communauté microbienne du sol. Yuan et *al.*, (2007) ont signalé que la salinité a des impacts négatifs sur la taille et l'activité de la biomasse microbienne du sol et sur les processus biochimiques qui sont cruciaux pour le maintien de la qualité du sol.

Cependant, il est également remarqué qu'une activité microbienne considérable persiste dans les sols salins en raison de l'accumulation de osmolytes dans les bactéries halophiles (Tejada et *al.*, 2006 ; Chowdhury et *al.*, 2011;.. Asghar et *al.*, 2012 in Singh, 2015).

Les résultats ont montré que dans notre expérience, il y a une relation claire entre la $C_{\text{microbien}}$ et la teneur en carbone.

Quant à l'effet de l'humidité, Gunapala et Scow (1998) ; Geisseler et Horwath (2009) ont trouvé une corrélation positive et significative entre l'humidité du sol et la taille de la biomasse microbienne dans différents systèmes de culture. Cette constatation est en concordance parfaite avec nos résultats.

En ce qui concerne le $N_{\text{microbien}}$, il varie de 2,3, 4,48, 7,1, 7,4, 13,88 (mg N.kg^{-1} de sol sec) selon l'ordre SN < CER < CPSS < PHO < LEG (Fig. 22).

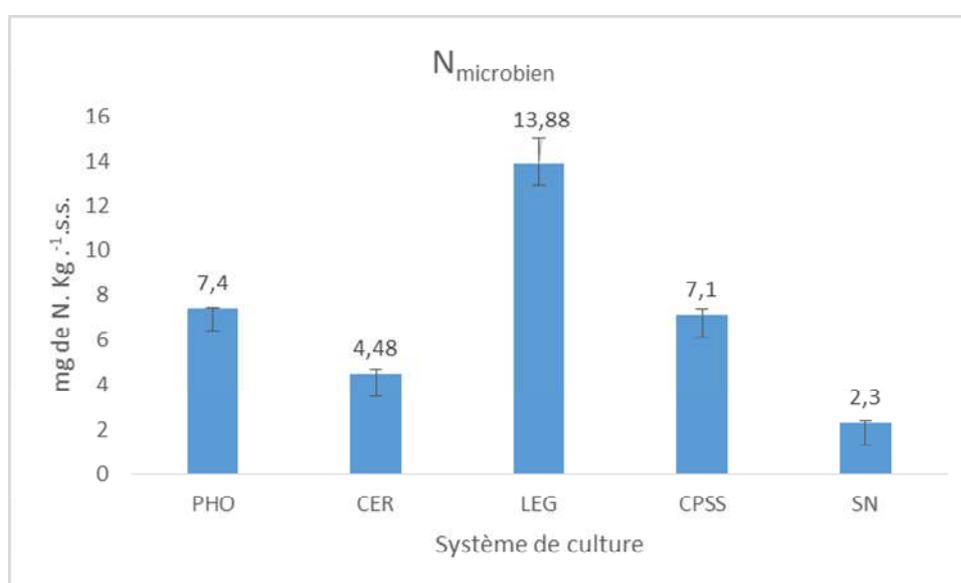


Figure 22. Représentation graphique des valeurs du $N_{\text{microbien}}$ du sol sous différents systèmes de culture

L'analyse de la variance montre des différences significatives entre les différents systèmes de culture (tableau 12).

Tableau 12. Analyse de la variance pour la variable $N_{\text{microbien}}$ du sol sous différents systèmes de culture

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Système de culture	4	227,0636	56,7659	192,0839	< 0,0001
Erreur	10	2,9553	0,2955		
Total corrigé	14	230,0189			

Le test de Fisher montre la présence de 4 groupes homogènes (tableau 13).

Tableau 13. Test de Fisher (LSD)/ Analyse des différences entre les modalités avec intervalle de confiance à 95% (variable N_{microbien} du sol sous différents systèmes de culture)

Modalité	Moyenne	Groupes			
LEG	13,8800	A			
PHO	7,4000		B		
CPSS	7,1000		B		
CER	4,4800			C	
SN	2,3267				D

Les valeurs obtenues pour N_{microbien}, montrent que l'immobilisation biologique est faible dans les sols étudiés. En effet, il est connu que les micro-organismes peuvent se montrer compétitifs vis-à-vis des plantes pour ce qui est de l'azote assimilable dans le sol. Cependant le sol de légumineuse a des valeurs plus ou moins acceptables par rapport aux autres sols. Ceci est peut être dû à la teneur de l'azote résultante de la fixation de l'azote atmosphérique par la luzerne qui a un bon potentiel de fixation d'azote. D'après Schinner et *al.* (1995) in Mbonigaba Muhinda et *al.*, (2009), entre 2 et 6 % de l'azote du sol se trouve immobilisé dans les cellules microbiennes vivantes.

VIII.3.3. L'activité enzymatique

Les différentes techniques mises au point pour la quantification des populations microbiennes ne mesurent pas toutes les mêmes composantes microbiennes. En effet, les populations microbiennes peuvent être divisées en trois composantes : 1/ la biomasse active, laquelle population est en mesure de croître et de réaliser toutes les fonctions métaboliques qui y sont reliées ; 2/ la biomasse latente qui peut se développer lorsque des conditions favorables le permettent ; et 3/ la biomasse dormante composée de spore, kyste, etc. (Smith et *al.*, 1986). Ainsi, alors que certaines techniques évaluent la quantité de biomasse microbienne en ne faisant aucune distinction sur leur état métabolique, d'autres par contre, évaluent la biomasse active et on parle alors de bioactivité ou d'activité microbienne (Pelletier, 1992).

L'activité des enzymes du sol est cruciale pour la disponibilité des nutriments, la décomposition de la matière organique et la santé du sol (Johansson *et al.*, 2000).

La β -glucosidase est une hydrolase impliquée dans le cycle du carbone ; spécifiquement, elle hydrolyse les liens β -glycosides dans les grandes chaînes glucidiques (Martinez et Tabatabai, 1997 ; Acosta-Martinez et *al.*, 2011 in Avellaneda-Torres et *al.*, 2013). La sensibilité à la gestion du sol (labour, système cultural, utilisation de fertilisant et de pesticides, rotation, etc.) et aux variations de pH en font de la β -glucosidase un excellent indicateur de la santé du sol (Acosta-Martinez et Tabatabai, 2000). La β -glucosidase est une enzyme bien étudiée de la famille des glucosidase et elle est importante dans le cycle du carbone (Yan et *al.*, 2010). Les β -glucosidases sont produits par une variété d'organismes (plantes, animaux, champignons et bactéries) (Esen, 1993 in Knight et Dick, 2004).

Les Enzymes du sol sont constamment synthétisées, accumulés, inactivés, et /ou décomposés dans le sol. Elles jouent, donc, un rôle important dans la catalyse de nombreuses réactions importantes nécessaires pour les processus de vie des micro-organismes dans le système sol, la stabilisation de la structure du sol, la décomposition des matériaux polymères (par exemple, la cellulose, la chitine, et les protéines), la formation de la matière organique, et dans les cycles nutritifs (Traser-Cepeda et *al.*, 2007 ; Nannipieri et *al.*, 2002 in Yan et *al.*, 2010). Dans les sols semi-arides, l'activité enzymatique est principalement extracellulaire, stable, et forme des complexes avec les colloïdes organiques et minéraux (Schimdt et *al.*, 2011; Nannipieri et *al.*, 2012).

L'activité de la β -glucosidase a été stimulée dans les sols cultivés comparativement à celui non encore mis en culture et a varié d'un sol à un autre (Fig. 23).

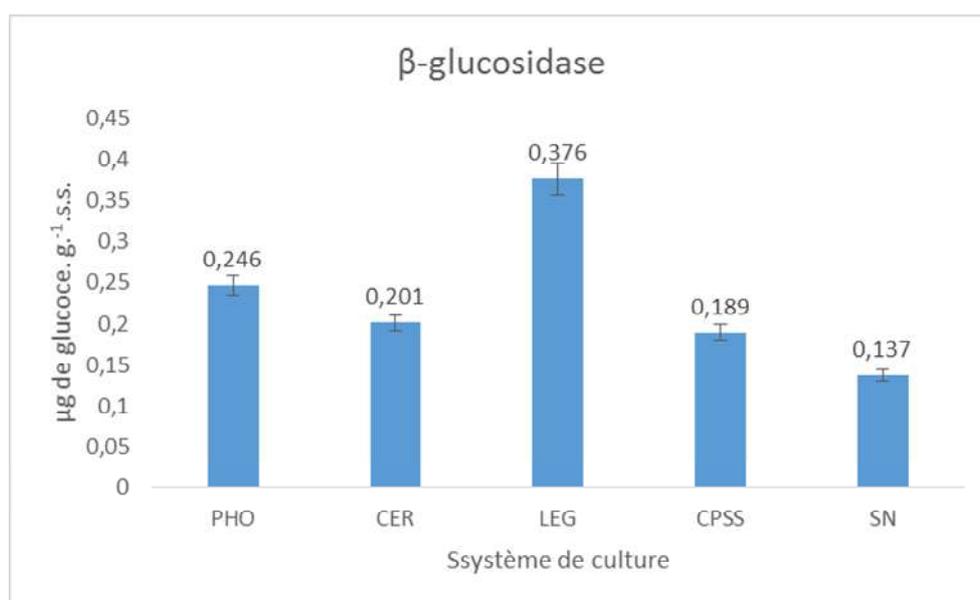


Figure 23. Représentation graphique de l'activité enzymatique de la β -glucosidase du sol sous différents systèmes de culture

Ainsi l'analyse de la variance (ANOVA) montre des différences significatives entre les échantillons du sol des différents systèmes de culture étudiés (Tableau 14). Ainsi, le test de Fisher a révélé 5 groupes homogènes (Tableau 15).

Tableau 14. Analyse de la variance pour la variable β -glucosidase du sol sous les différents systèmes de culture étudiés

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Système de culture	4	0,1059	0,0265	1181,7515	< 0,0001
Erreur	10	0,0002	0,0000		
Total corrigé	14	0,1061			

Tableau 15. Test de Fisher (LSD)/ Analyse des différences entre les modalités avec intervalle de confiance à 95% (variable β -glucosidase du sol sous les différents systèmes de culture étudiés)

Modalité	Moyenne	Groupes				
LEG	0,3767	A				
PHO	0,2453		B			
CER	0,2013			C		
CPSS	0,1890				D	
SN	0,1370					E

Les valeurs obtenues pour l'activité de la β -glucosidase sont comprises entre 0,137 - 0,376 μg de glucose.g⁻¹ de sol sec (Tableau 04). L'amplitude des réactions obtenues pour ce paramètre suit la teneur en matière organique dans les cinq sols dans l'ordre LEG > PHO > CER > CPSS > SN.

Cette relation a été observée par plusieurs autres auteurs (Garcia et al., 1997 ; Pascual et al., 1998 ; Biederbeck et al., 2005 ; Tejada et al., 2006 in Mbonigaba Muhinda et al., 2009).

La faible activité enzymatique enregistrée dans le sol sous serre (CPSS) est probablement due à l'application des pesticides. En effet, selon Kalia et Gosal (2011), plusieurs enzymes microbiennes du sol sont entravées ou touchées par l'application des pesticides dans le sol.

Le sol sous culture de céréale (CER) présente, également, une activité enzymatique relativement faible. En effet une augmentation de la salinité ou la teneur en sodium du sol inhibe l'activité de plusieurs activités enzymatiques dans le sol (Frankenberger & Bingham, 1982; Chander *et al.*, 1994; Garcia & Hernandez, 1996; Rietz & Haynes, 2003; Tejada *et al.*, 2006; Tripathi *et al.*, 2007 *in* Singh, 2015). Le stress salin induit des changements dans les activités enzymatiques du sol ; cet effet négatif est encore plus grand sur les hydrolases (phosphatase et β -glucosidase) (Singh, 2015).

La baisse de l'activité enzymatique avec l'augmentation de la salinité semble également être lié au changement dans le potentiel osmotique du sol en raison des concentrations plus élevées de sel et la toxicité spécifique d'ions (Zahir *et al.*, 2001).

L'activité β -glucosidase est forte dans le sol sous légumineuse (LEG) suivi par le sol sous culture de palmier dattier (PHO) par rapport aux autres sols cultivés et est presque nulle dans le sol nu (SN). Ceci peut être attribué au $C_{\text{microbien}}$ élevé en raison de la teneur en matière organique susceptible de promouvoir la croissance et l'activité des micro-organismes. Les résultats obtenus montrent que cette activité est effectivement corrélée positivement avec le rapport $C_{\text{microbien}}$.

Comme pour la biomasse microbienne du sol (Groffman *et al.*, 2001 ; ;Pérez-de-Mora *et al.*, 2006) et la respiration du sol (Borken *et al.*, 2002 ; Wang *et al.*, 2003), plusieurs auteurs démontrent que les activités enzymatiques sont positivement corrélées avec la teneur en matière organique (Garcia-Gil *et al.*, 2000).

VIII.4. Conclusion

L'application de diverses mesures physico-chimiques et microbiologiques et à des échantillons d'un même type de sol mais provenant de parcelles sous différents systèmes de culture permet de tirer quelques premiers enseignements quant aux critères les plus pertinents pour juger de l'état microbiologique des sols oasiens.

La numération des groupes microbiens dans l'ensemble des sols étudiés révèle que les bactéries présentent une supériorité numérique par rapport aux champignons à cause de leur grand pouvoir d'adaptation et de multiplication.

Les résultats des dénombrements microbiologiques laissent apparaître des variations entre les sols en nombre de germes avec des valeurs maximales pour le sol sous culture de luzerne suivi par le sol sous culture de palmier dattier ensuite le sol sous serre et le sol sous culture de céréale et enfin le sol nu. Les sols cultivés renferment un potentiel riche en microorganismes par rapport au sol nu.

L'application des traitements phytosanitaires sous serre a probablement affectée la flore microbienne du sol, ce qui affecte indirectement la fertilité microbiologique du sol. Une diminution de la densité des microbes se produit par l'application des pesticides. En particulier, une diminution des bactéries plus évidente. Cependant, certains microbes tels que des champignons sont mieux capables de développer une certaine adaptation à l'application des pesticides, et ainsi avoir la capacité de se développer et de se multiplier. Il s'ajoute à ça l'effet de la salinité qui a marqué la faible densité microbienne dans le sol sous céréale.

Quant à la biomasse microbienne, les valeurs relatives au $C_{\text{microbien}}$ et au $N_{\text{microbien}}$, montrent que ces paramètres sont plus élevés en sol cultivés par rapport au sol nu avec une prédominance pour le sol sous culture de luzerne ce qui est confirmé par le dénombrement microbien.

Pour ce qui est de l'activité enzymatique, les valeurs obtenues pour l'activité de la β -glucosidase sont comprises entre 0,137 et 0,376 μg de glucose. g^{-1} de sol sec. L'amplitude des réactions obtenues pour ce paramètre suit la teneur en matière organique dans les sols étudiés.

Chapitre IX. Effets de quelques pratiques culturales sur la densité microbienne de quelques sols oasiens

IX.1. Effet du travail du sol

IX.1.1. Introduction

Les sols agricoles, et particulièrement les sols cultivés, constituent des écosystèmes particulièrement perturbés par les pratiques agricoles (Legras et *al.*, 2007)

L'étude des effets des pratiques culturales tels que le travail du sol sur les organismes vivants est complexe compte tenu des nombreuses interactions et de la variabilité de ces effets dans l'espace et dans le temps (Bouthier et *al.*, 2014). Étant donné l'importance des interactions entre l'agriculture et l'environnement, il est de plus en plus manifeste que les pratiques culturales tiennent compte du rôle des populations biologiques du sol.

Les caractéristiques microbiennes du sol représentent une clé pour la compréhension des impacts de facteurs environnementaux et anthropiques. La diversité microbienne des sols peut représenter la capacité d'un sol à résister aux perturbations. A ce titre, elle a été proposée comme indicateur de la qualité des sols (Karlen et *al.*, 1997).

La biomasse microbienne renseigne sur le fonctionnement biologique du sol et répond rapidement aux changements des pratiques culturales (Haynes, 2003).

Le travail du sol peut modifier le contenu et la distribution de matière organique du sol par enfouissement des résidus de culture et par perturbation du sol, ce qui aurait un impact sur les propriétés microbiennes du sol (Legras et *al.*, 2007 ; Sun et *al.*, 2016).

Le travail du sol agit sur l'environnement physique et biotique des microorganismes du sol (température, aération, humidité, répartition des résidus de culture) et modifie en retour la quantité, l'activité et la répartition de la biomasse microbienne dans le profil de sol (Klikocka et *al.*, 2012). De nombreuses références sont disponibles sur ce thème et montrent que dans les systèmes de travail du sol de conservation, la biomasse microbienne présente une forte stratification verticale tandis qu'elle est répartie de façon homogène sur la profondeur de la couche de sol labourée (Andrade et *al.*, 2003; Meyer et *al.*, 1996).

Ainsi, la structure d'un sol labouré est composée de l'assemblage de sol fin, de mottes décimétriques (compactées ou non), de résidus de cultures répartis le long de la bande de labour, de vides issus de l'action de retournement, de déplacement et de fragmentation de la charrue sur la couche de sol labourée (Roger-Estrade et *al.*, 2004). La structure d'un sol non labouré est caractérisée par une structure plus homogène et les résidus de culture sont concentrés dans les premiers centimètres du sol. Ces structurations différentes influencent les caractéristiques biologiques du sol et notamment la répartition et l'activité de la biomasse microbienne du sol (Andrade et *al.* 2003). C'est dans ce contexte que s'inscrit l'objectif de cette phase d'étude.

IX.1.2. Caractéristiques abiotiques

Les caractéristiques physico-chimiques de la couche superficielle (0-30 cm) des deux sols (déterminées au laboratoire) sont représentées dans le tableau 16.

Tableau 16. Analyses physico-chimiques du sol labouré et du sol non labouré

		sol labouré	sol non labouré
Classe texturale		SL	
Densité apparente (g/cm³)		1.5	1.6
Porosité totale (%)		35	30
Humidité du sol (%)		9.26	12.62
Calcaire total(%)		2.95	2.48
Salinité globale CE à 25° (dS/m) 1/5		3.61	4.22
Réaction du sol (pH eau : 1/5)		7.97	7.86
Caractéristiques biochimiques	C.org (%)	0.7	0.8
	MO (%)	1.20	1.37
	N (%)	0.097	0.077
	C/N	7.21	10.38

L'analyse granulométrique nous a conduit à classer ce sol parmi les sols de texture sablo-limoneuse selon le diagramme textural américain. En ce qui concerne la porosité totale ; on remarque que la porosité au niveau du sol labouré est supérieure à celle du sol non labouré. En effet, de nombreux travaux montrent que le remplacement du labour par un travail simplifié entraîne une augmentation de la densité du sol. En conséquence, la porosité totale diminue en non travail du sol dès les premières années de la mise en place du système (Guerif, 1994 ;

Rasmussen, 1999). Eynarda et *al.* (2004) pensent que c'est un indicateur d'une augmentation du rôle de l'activité biologique dans la formation des pores. Tebrügge et Düring (1999) montrent que le labour crée artificiellement une grande proportion (50%) de pores supérieurs à 120 µm dont le volume diminue rapidement durant la période hivernale, ce qui fait baisser la porosité totale. Le non travail conserve une porosité totale plutôt constante voire en légère augmentation. Des résultats en zone semi-aride marocaine ont montré que la qualité physique et chimique des horizons superficiels du sol est nettement améliorée sous le système de non travail du sol par rapport au labour conventionnel (Mrabet *et al.* 2001).

Le travail du sol a pour rôle de créer une fissuration en vue d'augmenter la porosité totale des horizons superficiels du sol (Mando *et al.*, 2000 *in* Zangré, 2000). La porosité totale nous permet d'avoir ainsi une estimation des conditions de vie des microorganismes du sol : saturation de la porosité, circulation de l'air (Vian, 2009).

L'humidité du sol assignée affirme que le non labour permet une meilleure rétention en eau (12.62%) par rapport au labour (9.26%). cette supériorité est due à l'absence de perturbation du sol (labour) qui provoque un remaniement et un retournement de la terre, ce qui crée un nouvel arrangement des mottes de terre et par conséquent des vides qui facilitent l'évaporation. Autrement dit ; la présence de résidu cultural dans le sol, permet de limiter l'évaporation du sol. Ce qui permet une meilleure conservation de l'eau en limitant l'effet des facteurs abiotiques à savoir, les hautes températures et les vents. Cette particularité du non labour offre à la culture un meilleur comportement en situation de déficit hydrique notamment au stade de formation du grain (Bouchenafa *et al.*, 2014).

Par ailleurs, la conductivité électrique du sol labouré est de l'ordre de 3.16 (dS/m), et celle du sol non labouré est de l'ordre de 4.22 (dS/m). Cela nous a conduit à classer nos sols parmi les sols très salés selon Aubert (1978). Il est à signaler que la salinité des sols de l'exploitation agricole de l'université de Ouargla est plus élevée que ceux de hassi ben abdallah. En effet, les sols de l'oasis de Ouargla sont à prédominance sableuse, présentant des degrés de salinités variables dus aux contraintes hydro-mécaniques, et probablement à la conduite culturale et la gestion de l'irrigation-drainage (Daddi Bouhoun, 2010).

La forte teneur en sels s'explique par les fortes évaporations dues aux températures élevées de la région, ainsi qu'aux eaux d'irrigation, il s'ajoute aussi le phénomène de la remontée des eaux de la nappe phréatique.

Selon Dubost (1994), au Sahara les eaux contenant moins de 0.5g / l de sels peuvent être considérées comme exceptionnelles et celles de moins de 1g sont parfaites pour la consommation humaine. Jusqu'à une concentration de 2g/l ce sont des eaux d'irrigation de qualité excellente pour l'irrigation. Entre 2 et 5g, il s'agit d'eaux salées et au-dessus de 5g on peut dire qu'elles sont très salées. Le seuil de la salinité des eaux d'irrigation est de 3 dS/m (2g/l) (Ayers et Westcot, 1985). Mais compte tenu de la forte évaporation, même cette concentration saline cause parfois de sévères problèmes aux plantes, surtout dans les sols à texture fine ou irrigués par intermittence (Daoud et Halitim 1994).

Le pH est inférieur à 8. Il est de l'ordre de 7.96 et 7.29 pour le sol labouré et le sol non labouré respectivement. D'après les classe de pH de l'extrait 1/5 (Morand, 2001) nos sols sont neutres a moyennement alcalins.

Les teneurs en calcaire sont de l'ordre de 2.95%, 2.48% pour le sol labouré et le sol non labouré respectivement. Ces sols sont donc peu calcaires.

En ce qui concerne les caractéristiques biochimiques le taux de carbone est faible pour les deux sols (0.7%, 0.8%). Ce taux est inférieur à 1%, selon Duchaufour(1984), ce sol est pauvre en matière organique.

Deen et Kataki (2003) *in* Poirier (2007), ont également démontré que l'absence de labour contribue à augmenter la concentration en carbone organique dans les couches superficielles du sol, mais non dans le profil en entier.

La carence en azote dans les deux sols labouré et non labouré est particulièrement nette de l'ordre de 0.097% et 0.077% respectivement. Ceci est dû à la réduction de l'apport de matière organique végétale et d'une dégradation rapide de celle-ci surtout en été.

Quand on rapporte les teneurs du C et N à l'ensemble de la couche de sol, peu de différences, voire aucune, sont observées entre les systèmes de conservation et les systèmes labourés (Oorts *et al*, 2007) . Au-delà de 10 cm de profondeur, le travail du sol, notamment le labour, augmente la surface de contact entre les substances organiques et les particules minérales du sol (Balesdent *et al*, 2000 *in* Poirier , 2007) , il favorise l'aération et le réchauffement du sol (Pekrun *et al*, 2003) et stimule ainsi la minéralisation des résidus de cultures.

Le rapport C/N qui nous renseigne sur l'activité biologique varie de 7.21 et 10.38, ce taux est inférieur ou égal à 10. Ceci traduit la faiblesse des deux éléments biogènes les plus importants et une tendance à la minéralisation des quantités réduites d'azote au profit d'une humification poussée.

IX.1.3. Caractéristiques biotiques

La densité des principaux groupes microbiens ainsi que la densité de la microflore totale du sol labouré et du sol non labouré sont représentées dans le tableau 17.

Tableau 17. Densité des microorganismes dans le sol labouré et le sol non labouré

UFC g ⁻¹ .s.s	Sols	
	Sol labouré	Sol non labouré
Bactéries x 10 ⁶	16 ± 1.802	15 ± 3.04
Champignons x 10 ⁵	4.4 ± 0.6	10.26 ± 1.06
Actinomycètes x 10 ⁵	37.4 ± 4.2	45.6 ± 2.96
Microflore totale x 10 ⁵	201.8 ± 4.68	205.86 ± 3.48

UFC g⁻¹.s.s : unité formant colonies par gramme du sol sec

IX.1.3.1. Microflore totale

À partir des résultats représentés dans la figure 24, on s'aperçoit qu'il n'y a pas de différences significatives entre les deux sols (sol labouré et sol non labouré) avec une légère supériorité numérique dans le sol non labouré de point de vue microflore totale (F= 1.451, P= 0.294). En effet Ahl et *al.*, 1999; Aon et *al.*, 2001; Meyer et *al.*, 1996) ont montré que la différence de biomasse microbienne devient faible voire nulle sur 0-30 cm entre les systèmes de conservation et les systèmes labourés. Le bilan global en termes quantitatifs, sur l'ensemble de la couche cultivée, est sensiblement identique en situation labourée et en situation non labourée (Chaussod, 1996). Cela est confirmé par nos résultats.

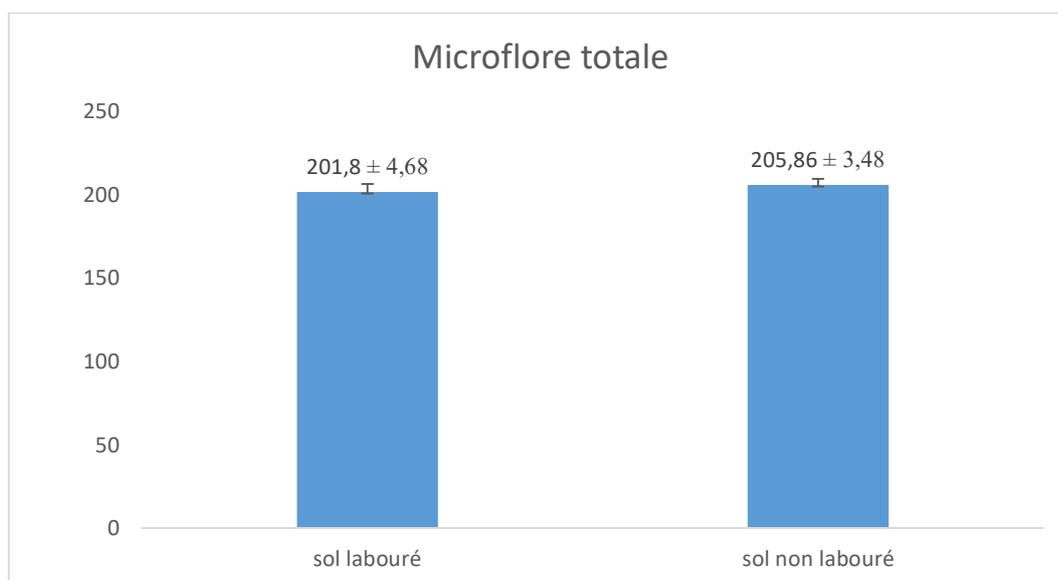


Figure 24. Représentation graphique de la densité de la microflore totale dans le sol labouré et le sol non labouré

Le travail du sol, par l'enfouissement des résidus de cultures, crée des conditions favorables à la croissance microbienne et stimule l'activité de minéralisation des résidus de culture et de la matière organique du sol (Grigera et *al.*, 2007; Pekrun et *al.*, 2003). Ainsi, lorsqu'on rapporte les activités de minéralisation du carbone et de l'azote à l'ensemble de la couche du sol, peu ou aucune différence est observée entre les régimes de travail du sol (Oorts et *al.*, 2007; Pekrun et *al.*, 2003). La quantité et l'activité des microorganismes suivent en règle générale la stratification de la matière organique dans les sols (Bouthier et *al.*, 2014).

L'élévation de la biomasse microbienne dans le sol non labouré par rapport au sol labouré est due certainement aux taux d'humidité et probablement aux taux de matière organique légèrement élevé, ce qui stimule la prolifération des germes microbiens. Ainsi, Doran, 1980, 1987; Angers et *al.*, 1993; Bissonnette et *al.*, 2001; Green et *al.*, 2007 in Poirier, 2007 montrent que l'absence du labour permet de conserver des résidus de culture à la surface du sol et favorise le développement de l'activité biologique.

Ceci confirme l'effet négatif du travail du sol sur l'abondance des microorganismes qui s'explique notamment par une altération des habitats microbiens (notamment les macroagrégats qui représentent des habitats pour les champignons) et/ou du statut trophique du sol (teneur et qualité de la matière organique) (Bouthier et *al.*, 2014).

Par ailleurs, la légère différence de biomasse microbienne dans les deux sols peut être expliquée, également, par le rapport C/N qui est légèrement plus bas en sol labouré par rapport au sol non labouré, ce qui traduit une bonne minéralisation de la matière organique et donc une bonne activité microbienne.

En effet cette différence de densité de communautés microbiennes reflète les influences opposées de labour sur la structure du sol et l'adaptation des communautés à leur environnement proche.

La biomasse microbienne est significativement supérieure dans les premiers centimètres du sol (0-10 cm) dans les systèmes de conservation par rapport aux systèmes labourés (Andrade et al., 2003; Kandeler et al., 1998; Mc Carty et al., 1998; Meyer et al., 1996; Wright et al., 2005) et devient inférieure (Ahl et al., 1999; Meyer et al., 1996) ou égale (Mc Carty et al., 1998) dans les horizons sous-jacents. En revanche, sur l'ensemble de la couche arable (0-30 cm) l'augmentation de la biomasse microbienne dans les premiers centimètres du sol ne compense pas sa diminution en profondeur.

Les techniques de travail du sol de conservation entraînent donc une stratification verticale de la biomasse microbienne au sein du profil de sol. Mais les résultats des différentes études restent contradictoires quand on compare la quantité de biomasse microbienne totale sur 0-30 cm entre un labour et une technique de conservation

IX.1.3.2. Densité bactérienne

Les résultats relatives à la densité bactérienne montrent une légère supériorité numérique dans le sol labouré par rapport au sol non labouré (Fig. 25).

L'analyse de la variance montre l'absence d'une différence significative entre les deux sols pour ce variable ($F=0.24$, $P= 0.6499$). Ainsi le test de Fisher (5%) classe nos échantillons en un seul groupe homogène.

La présence d'une quantité différente des bactéries dans les deux sols peut être expliquée par la diversité entre les espèces bactériennes (aérobies, anaérobies et nitrifiantes) dans chaque sol qui s'adaptent plus au moins bien selon la pratique du travail du sol ou non. En effet, la communauté des bactéries nitrifiantes est plus diversifiée dans les systèmes de conservation (Ibekwe et al., 2002). Il semblerait que les systèmes de conservation favorisent le

développement des espèces anaérobies dans les couches de sol qui ne sont plus fragmentées par les outils (Drijber et *al.*, 2000; Feng et *al.*, 2003) tandis que les sols labourés sont dominés par des espèces microbiennes aérobies avec une haute activité métabolique (Spedding et *al.*, 2004).

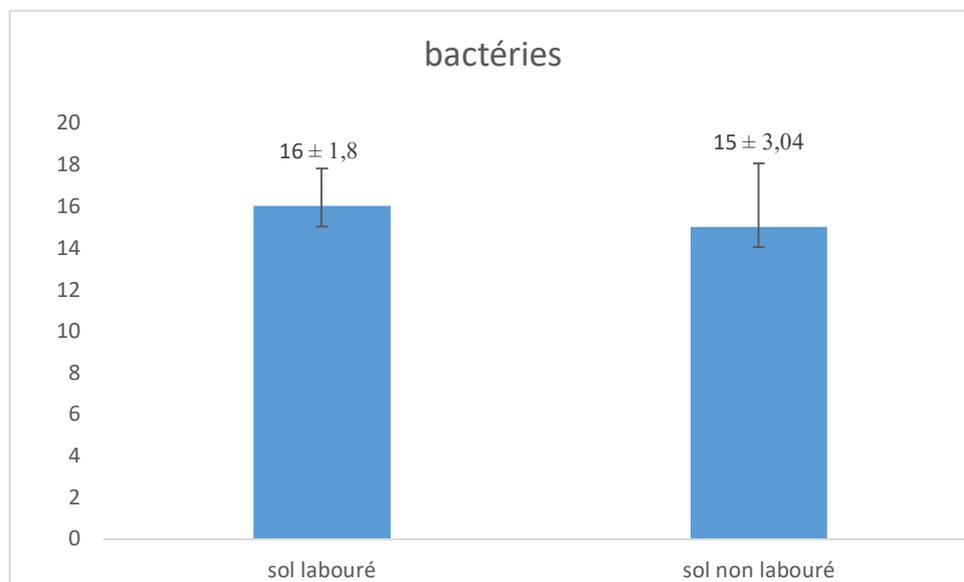


Figure 25. Représentation graphique de la densité de la microflore bactérienne dans le sol labouré et le sol non labouré

Le nombre sensiblement élevé des bactéries dans le sol labouré par rapport au sol non labouré est probablement dû à la quantité d'azote plus élevée présente dans le sol labouré et au travail du sol. En effet, les bactéries prolifèrent mieux dans des milieux riches en azote et dans des sols plus aérés.

IX.1.3.3. Densité fongique

Pour la microflore fongique, on constate que la densité des champignons dans le sol non labouré est importante par rapport à celle du sol labouré, 4.4×10^5 et 10.26×10^5 UFC g^{-1} .s.s respectivement (Fig. 26). Ainsi, l'analyse de la variance montre une différence très hautement significative entre les deux sols pour ce variable ($F = 69,34$ $P = 0.0011$). Ainsi le test de Fisher classe nos échantillons en deux groupes homogènes.

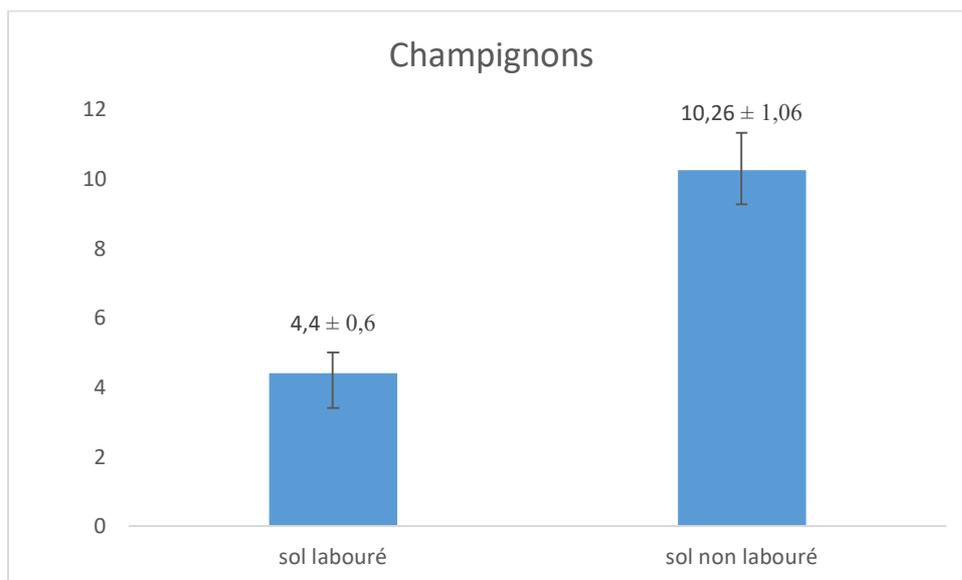


Figure 26. Représentation graphique de la densité des champignons dans le sol labouré et le sol non labouré

On constate également que la densité des champignons est moins importante que celle des bactéries dans les deux sols.

En effet, Le travail du sol modifie également la structure des communautés microbiennes du sol (Andrade et *al.*, 2003). C'est ainsi que dans les systèmes les moins perturbés mécaniquement, l'augmentation de la biomasse microbienne en surface serait majoritairement due à l'expansion de la biomasse fongique, favorisée par l'humidité du sol (maintenue grâce à la présence d'un mulch) et non affectée par les perturbations mécaniques qui réduisent la longueur des hyphes mycéliens et le nombre de propagules dans les premiers horizons de sol (Spedding et *al.*, 2004). Le type d'outil utilisé pour le travail du sol a également une influence sur les populations microbiennes : il semblerait que les outils animés (herse rotative) aient un effet encore plus délétère pour les populations fongiques qu'un labour (Cookson et *al.*, 2008) car ils seraient plus à même d'entraîner des dommages tissulaires importants sur les communautés fongiques (Helgason et *al.*, 2009). Les sols travaillés intensivement seraient donc dominés par des espèces bactériennes tandis que ceux dans lesquels le travail du sol est limité favoriseraient le développement de populations fongiques (Kladivko, 2001; Young et Ritz, 2000). Ces constatations diverses concordent parfaitement avec nos résultats.

En plus du mode d'occupation des sols, les pratiques agricoles influencent significativement la biomasse fongique comparativement à la biomasse bactérienne (Bardgett

et *al.*, 1996). Ainsi, le travail du sol et en particulier le labour conduit à détruire les réseaux d'hyphes fongiques (Helgason et *al.*, 1998). En conséquence, les ratio champignons / bactéries sont généralement plus faibles dans les sols agricoles comparativement à des sols plus faiblement anthropisés (Bailey et *al.*, 2002).

La comparaison de la densité microbienne entre les modalités de travail du sol révèle une plus grande densité bactérienne en labour et une plus grande densité de champignons en non-labour. Cette réponse différentielle de la densité bactérienne et de champignons au travail du sol peut s'expliquer notamment par des sensibilités différentes à cette pratique. Les champignons sont connus pour être sensibles aux agressions physiques du labour. En effet, cette technique peut altérer directement l'intégrité de leur mycélium mais aussi modifier l'état structural du sol et notamment mener à la destruction des macroagrégats qui représentent leur habitat physique dans le sol. Le labour représente donc une perturbation forte pour les champignons. Pour les bactéries, le fait qu'elles soient plus résistantes aux perturbations mécaniques (car plus petites et unicellulaires) et majoritairement localisées dans les microagrégats (qui restent intègres même après un labour), permet d'émettre l'hypothèse que le labour représente, non pas une perturbation forte comme pour les champignons, mais une perturbation intermédiaire (ou moyenne). Selon le postulat écologique que la diversité d'une communauté est maximum pour une perturbation intermédiaire et minimum pour une perturbation forte (par sélection) ou faible (par exclusion compétitive) (Giller et *al.*, 1978), le labour représente donc une perturbation forte pour les champignons et intermédiaire pour les bactéries. A l'inverse et selon le même postulat, le semis direct représente une perturbation intermédiaire pour les champignons (synonyme de forte diversité) et faible pour les bactéries (synonyme de faible diversité) (Bouthier et *al.*, 2014).

Les champignons ne sont pas les plus nombreux des micro-organismes du sol, mais leur poids est très important, du fait de leur grande taille, comparativement aux bactéries (Huber et Schaub, 2011). Il est estimé qu'1g de sol contient plus de 200 mètres d'hyphes de champignons (Curtis et *al.* 2002). Dans certains sols, leur biomasse qui constitue une portion importante du pool de nutriment, peut-être plus importante que celle de tous les autres microorganismes, plantes et animaux réunis (Anderson et *al.*, 1978; Nannipieri et *al.*, 1978). Ainsi, on peut avoir d'une à deux tonnes de champignons par hectare de sol agricole. Ils représentent les deux tiers de la biomasse microbienne du sol.

Ainsi, l'utilisation d'inhibiteurs sélectifs des bactéries (streptomycine) ou des champignons (cycloheximide) a permis d'évaluer la contribution de ces deux groupes microbiens à la biomasse microbienne totale du sol (Anderson et Domsch, 1973 ; Landi *et al.*, 1993 in Hamdan, 2010). Il a ainsi été estimé que les champignons représentent de 11 à 90% de cette biomasse microbienne (Kjoller *et al.*, 1982), soit de 37 à 184 g de mycélium par m² (Thorn, 1997). Les champignons sont donc, d'un point de vue biomasse, souvent considérés comme dominants dans les sols.

D'après Frey *et al.*, 1999, en situation de non labour, les conditions du milieu à la surface du sol favorisent le développement d'une importante biomasse fongique. Ainsi que l'absence de perturbation physique en situation de non labour permet aux hyphes fongiques de croître en longueur, leur taille pouvant être deux fois plus importante qu'en sol labouré.

Dans les systèmes les moins perturbés mécaniquement, l'augmentation de la biomasse microbienne en surface serait majoritairement due à l'expansion de la biomasse fongique, favorisée par l'humidité du sol (maintenue grâce à la présence d'un mulch) et non affectée par les perturbations mécaniques qui réduisent la longueur des hyphes mycéliens et le nombre de propagules dans les premiers horizons de sol (Frey *et al.*, 1999; Kennedy, 1999; Spedding *et al.*, 2004).

En effet, d'autres auteurs ont montré que les systèmes de conservation, notamment les techniques de semis direct, favorisaient le développement des champignons du sol en surface par rapport au labour (Drijber *et al.*, 2000; Feng *et al.*, 2003) notamment en raison de l'accumulation plus importante de matière organique particulière grossière (Simmons et Coleman, 2008).

Une étude réalisée en 2005 dans le site du Thil en France dont l'objectif était de comparer l'effet de 4 techniques de travail du sol en Agriculture Biologique. Les labours se caractérisent par un retournement de la couche de sol travaillée : ThLT (Labour Traditionnel 30cm), ThLA (Labour Agronomique 18cm), le travail du sol réduit à l'inverse se traduit par un non-retournement : ThTR (Travail du sol réduit 15 cm avec un outil à dent), ThTS (Travail superficiel à 7cm avec un outil à dent) (Fig. 27).

Sur le site de Thil, les différences significatives s'observent en fonction de l'intensité du travail du sol. Les quantités faibles sont mesurées dans la parcelle subissant un labour

traditionnel. Le labour agronomique et le travail réduit présentent des situations intermédiaires ; le travail superficiel offre les densités fongiques les plus importantes (Vian, 2009).

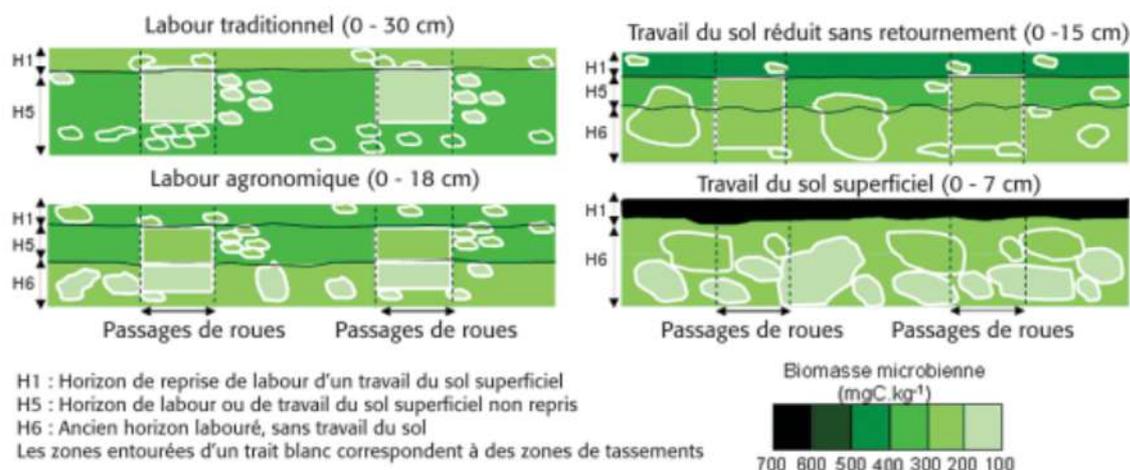


Figure 27. Influence de la profondeur et du type de travail du sol sur la biomasse microbienne et sa répartition au sein du profil cultural (0-30 cm). Site expérimental de Thil où sont comparées différentes régimes de travail du sol en agriculture biologique – ISARA-Lyon (Vian, 2009).

Logiquement, moins les sols sont travaillés plus les communautés fongiques sont abondantes sur l'horizon étudié.

IX.1.3.4. Actinomycètes

En ce qui concerne les valeurs relatives à la densité des actinomycètes dans les deux sols, nous avons enregistré les valeurs suivantes : 37.4×10^5 et 45.6×10^5 UFC.g⁻¹.s.s dans le sol labouré et le sol non labouré respectivement (Fig. 28). L'analyse de la variance montre l'absence d'une différence significative entre les deux sols pour ce variable ($F=7.56$, $P=0.051$). Ainsi le test de Fisher classe nos échantillons en un seul groupe homogène. En effet, selon Ji et *al.* (2014), l'impact du labour sur la densité des actinomycètes et des bactéries dans un sol de texture limoneuse est faible par rapport à celui dans un sol argileux.

En effet, la répartition quantitative des actinomycètes dans les sols des palmeraies est très hétérogène. Dans le cas des sols cultivés (et non abandonnés), la salinité est le principal facteur qui affecte la densité des actinomycètes. Dans les sols salins, la population des actinomycètes et son pourcentage par rapport à la microflore totale est extrêmement faible (Mokrane et *al.*, 2013).

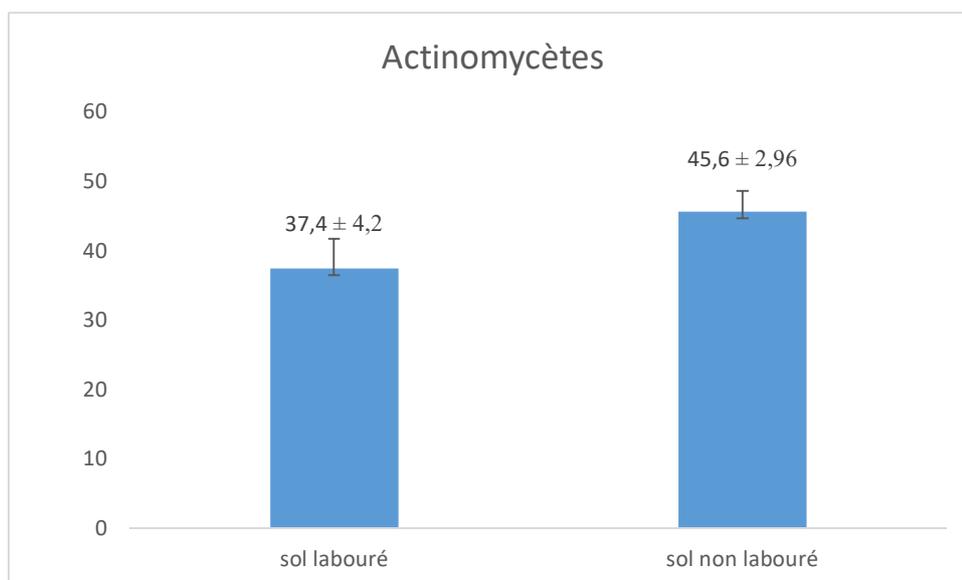


Figure 28. Représentation graphique de la densité des actinomycète dans le sol labouré et le sol non labouré

Comparativement aux autres groupes microbiens, les actinomycètes sont numériquement plus faibles dans nos échantillons de sol. La plupart des auteurs estiment que dans les sols fertiles le nombre des Actinomycètes est généralement plus faible par rapport à des bactéries (le ratio Bactéries : Actinomycètes est de 60:40) (Klikocka et *al.*, 2012). La densité des Actinomycètes est en général 3 à 15 fois plus faible que celle des bactéries (Dommergues, et Manganot, 1970). Selon les mêmes auteurs, cette faiblesse est due à leur faible pouvoir de multiplication ainsi qu'à leur faible pouvoir compétitif par rapport aux autres microorganismes.

IX.1.4. Conclusion

A l'issue de cette phase de travail nous avons pu mettre en évidence l'impact du travail du sol sur la densité des communautés microbiennes présentes dans un sol oasien. Ainsi, les résultats du dénombrement des différents groupes microbiens montrent que la différence de biomasse microbienne devient faible voire nulle entre un sol labouré et un sol non labouré avec une légère prédominance en sol non labouré généralement, due principalement à l'absence de perturbation provoquée par le labour. L'absence de ce dernier laisse une quantité significative des résidus de culture à la surface du sol et un taux important d'humidité et de matière organique, celle-ci favorise une bonne activité microbienne.

Le dénombrement des germes montre que les bactéries sont les microorganismes les plus abondants dans les deux sols à cause de leur grand pouvoir d'adaptation et de multiplication ; suivie par les actinomycètes et enfin par les champignons qui se trouvent les plus sensibles à l'effet du travail du sol.

D'une manière générale le travail du sol agit sur l'environnement physique et biotique des microorganismes du sol (aération, humidité, répartition des résidus de culture) et modifie en retour la quantité et la répartition de la biomasse microbienne dans le profil de sol.

Il ressort d'après les résultats exposés que la réduction voire l'abandon du travail du sol a, le plus souvent, un effet positif sur l'abondance, l'activité et la diversité des organismes du sol, en lien avec une perturbation moindre de leurs habitats et de leurs ressources nutritives.

IX.2. Effet de l'humidité du sol sur la densité microbienne

IX.2.1. Introduction

L'Algérie est classée comme étant une zone semi- aride à aride du fait de l'importance de l'évapotranspiration par rapport aux précipitations.

Dans les régions arides, l'eau est le facteur le plus limitant pour la production agricole et la gestion des sols et principalement dans les zones oasiennes (Mlih et *al.*, 2015).

Le contenu en eau du sol est fonction des précipitations et /ou de l'irrigation, du ruissellement, de l'évapotranspiration, de la température, du couvert végétal mais aussi du type de sol qui conditionne l'infiltration (Pelletier, 1992).

Dans les régions à faible pluviométrie, c'est l'irrigation qui apporte au sol l'eau qui sera mise à la disposition de la plante (Arnon, 1972). Toutes les techniques visant à la conservation des sols et à son amélioration devront par conséquent se soucier de leur porosité, de leur perméabilité et de leur pouvoir de rétention. L'évapotranspiration dans les palmeraies est très importante ce qui nécessite des fréquences d'irrigation importantes sur le complexe végétal «Palmiers dattiers et cultures sous-jacentes ».

En général, les sols cultivables sont nombreux au Sahara, mais ils sont liés à la présence de l'eau. La possibilité de leur assurer un bon assainissement et une protection efficace contre les vents de sable et l'ensablement (Toutain, 1974).

L'activité microbienne dans le sol participe activement à l'édification de sa fertilité ; « bactéries, algues, champignons, Protozoaires » ont besoin pour mener leur action et proliférer, d'humidité, de chaleur, d'oxygène et d'apports nutritifs comme les plantes (Bryssine et Toutain, 1970 ; Arnon, 1972). Toutefois, il est difficile d'établir une relation entre le taux de l'humidité des sols et l'activité des micro-organismes, sauf dans les écosystèmes sec (Wardle, 1992) ou très humide (Waring et Schlesinger, 1985) où l'activité des micro-organismes est limitée par l'humidité du sol.

De nombreuses études ont rapporté une diminution de la biomasse microbienne due à la dessiccation du sol (Ladd et *al.*, 1986;. Wardle et Parkinson, 1990;. Van Gestel et *al.*, 1992 ; Gunapala et Scow, 1998).

Différents groupes décomposent la matière organique (fumier) et la minéralisent d'autant plus vite que le sol est humide et que la température est élevée ; ceci explique la rapidité de consommation du fumier dans les sols sous climat saharien, et la faiblesse de son arrière-action d'une année sur l'autre (Toutain, 1974).

Cette phase d'étude vise à mettre en évidence l'effet de la fréquence d'irrigation (humidité du sol) sur la densité des principaux groupes microbiens dans trois jardins phoenicicoles différemment entretenues de point de vue agronomiques présentant ainsi des sols avec des taux d'humidité différentes.

IX.2.2. Caractéristiques abiotiques

Station1 : palmeraie bien entretenue

Les caractéristiques physico-chimiques de la couche superficielle (0-30 cm) du sol de la station 1 sont représentées dans le tableau 18.

Tableau 18. Caractéristiques physico- chimiques (Station1 : palmeraie bien entretenue)

Paramètres physico-chimique		Sol prélevé en hiver	Sol prélevé en printemps
Granulométrie	A		9%
	LF		2%
	LG		10%
	SF		54%
	SG		25%
Humidité du sol (%)		14.52	12.33
Gypse (%)		5.52	5.63
Calcaire totale (%)		5.3	5.2
Salinité globale CE (dS/m)		5.59	4.14
Réaction du sol pH		7.86	7.72
Carbone organique C %		1.3	1.66
Azote N%		0.14	0.10
Matière organique MO %		2.23	2.85
C/N		9.3	16.6

Selon le triangle textural Américain, le sol de la station 1 est un sol de texture sablo-limoneuse, laquelle texture est favorable à l'infiltration de l'eau et au transfert des solutés (Askri, 2002 *in* Omeiri, 2016). Le sol présente un taux d'humidité relativement élevé dans les deux saisons par rapport aux sols des autres stations. Ceci est dû à une irrigation régulière et durable. Le taux du gypse est dans les environs de 5.5% ce qui classe ce sol parmi les sols légèrement gypseux d'après l'échelle de Barzanji (1973). Le sol est moyennement calcaire (taux du calcaire supérieur à 5%). Le pH est inférieur à 8 (7.86 et 7.72) et d'après les classes de pH (Morand, 2001) il est donc légèrement alcalin. Selon Dekkiche (1974) ceci est dû probablement à la faible teneur de la fraction fine et la présence des sels alcalins.

La conductivité électrique mesurée dans l'extrait au 1/5 du sol de cette station est de (5.59 dS/m et 4.14 dS/m). Selon l'échelle de salinité (Aubert, 1978) ce sol est extrêmement salé. Ces valeurs peuvent être expliquées par la salure des eaux d'irrigation qui augmente la salinité du sol après l'évaporation de ces eaux. En effet, le mauvais drainage (Djerbi, 1994), la remontée des eaux de la nappe phréatique ainsi que la salure des eaux d'irrigation augmentent la teneur en sels dans le sol (Djerbi, 1994 ; Rousk *et al.*, 2011 ; Iwai *et al.*, 2012). Selon (Shrivastava et Kumar, 2015) les zones salinisées augmentent à un taux de 10 % par année pour diverses raisons, y compris les faibles précipitations, l'évaporation de surface élevée, l'érosion des roches autochtones, l'irrigation avec de l'eau salée et de mauvaises méthodes culturales. Les sols affectés par les sels, sont généralement présentes dans les régions arides et semi-arides (Pandey *et al.*, 2011 ; Ferreira *et al.*, 2015) et leur diffusion est progressive dans diverses régions du monde (Lambers, 2003).

En effet selon Daddi Bouhoun (2010), quelques palmeraies du Ksar souffrent d'un problème de remontée de nappe, à cause de la mauvaise gestion des eaux d'irrigation et de drainage.

Les teneurs en $C_{\text{organique}}$ et N_{total} sont relativement considérables. Selon Duchaufour (1984) et d'après le taux du $C_{\text{organique}}$ qui dépasse 1%, ce sol est moyennement riche en matière organique. Le rapport C/N est relativement élevé (9.3 à 16.6). Ceci correspond à un taux de C élevé et non à une faible teneur en N qui se trouve sous forme organique, donc non directement utilisable. Le contenu en azote et le C/N sont importants de point de vue fertilité du sol et leur disponibilité aux êtres vivants.

Station 2 : palmeraie moyennement entretenue

Les caractéristiques physico-chimiques de la couche superficielle (0-30 cm) du sol de la station 2 sont représentées dans le tableau 19.

Tableau 19. Caractéristiques physico-chimiques (Station 2 : palmeraie moyennement entretenue)

Paramètres physico-chimiques		Sol prélevé en hiver	Sol prélevé en printemps
Granulométrie	A		7%
	LF		2%
	LG		13%
	SF		60%
	SG		18%
Humidité du sol (%)		11.5	10.1
Gypse (%)		11.05	12.3
Calcaire totale (%)		4.8	4.96
Salinité globale CE (dS/m)		7.06	5.45
Réaction du sol pH		7.62	7.50
Carbone organique C %		0.65	0.82
Azote N%		0.11	0.3
Matière organique MO %		1.11	1.41
C/N		6	2.7

Le sol est de texture sablo-limoneuse avec une prédominance de la fraction sable (SF 60% et LG 13%). Le taux d'humidité dans cette station est moyen par rapport à la station 1. Ceci est dû à une diminution de la fréquence d'irrigation. Le taux du gypse est de l'ordre de 11.05%. D'après l'échelle de Barzanji (1973) ce sol est Modérément gypseux. Le sol est moyennement pourvu en calcaire (4.8%), ce qui nous permet de le classer comme sol légèrement calcaire. Le pH est inférieur à 8 (7.62 et 7.50) comme pour celui des autres stations.

La conductivité électrique est de l'ordre de 7.06 dS/m et 5.45 dS/m en hiver et au printemps respectivement. Ces valeurs sont relativement plus importantes par rapport à celles de la station 1, et selon l'échelle de salinité (Aubert, 1978) ce sol est extrêmement salé. D'une

manière générale, l'évaporation dans la région de Ouargla favorise les accumulations salines (Daddi Bouhoun et Brinis, 2006).

D'après les valeurs de matière organique enregistrées en hiver et au printemps (1.11% et 1.41% respectivement), ce sol est relativement moins riche en matière organique que le sol de la station 1. Le rapport C/N est bas (6 à 2.7). Il est inférieur à 10, ce qui traduit une minéralisation rapide au dépend d'une humification poussée.

Station3 : palmeraie mal entretenue

Les caractéristiques physico-chimiques de la couche superficielle (0-30 cm) du sol de la station 3 sont représentées dans le tableau 20.

Tableau 20. Caractéristiques physico-chimiques (Station3 : palmeraie mal entretenue)

Paramètres physico-chimiques		Sol prélevé en hiver	Sol prélevé en printemps
Granulométrie	A		2%
	LF		2%
	LG		6%
	SF		52%
	SG		38%
Humidité du sol (%)		8.32	6.98
Gypse (%)		18.42	20.35
Calcaire totale (%)		2.14	3.21
Salinité globale CE (dS/m)		8.77	6.76
Réaction du sol pH		7.52	7.43
Carbone organique C %		0.5	0.71
Azote N%		0.083	0.072
Matière organique MO %		0.86	1.22
C/N		6.02	9.86

Le sol est de texture sablo-limoneuse. Le taux d'humidité dans ce sol est relativement faible en hiver qu'en printemps (8.32% et 6.98%) par rapport aux autres stations. Ceci est dû à l'absence de l'irrigation. La faible teneur en eau du sol est particulièrement importante du fait que les sables ont un faible pouvoir de rétention d'eau (Papendick et Campbell, 1981 *in* Pelletier,

1992) comparativement aux autres de sol. Les teneurs en eau de ces sols proviennent de la nappe phréatique par capillarité. Le taux du gypse est aux alentours de 20%. D'après l'échelle de Barzanji (1973) ce sol est modérément gypseux. Le sol est faiblement pourvu en calcaire (2.14% à 3.2%), ce qui le classe parmi les sols légèrement calcaires. Le pH est toujours inférieur à 8 dans les deux saisons. D'après les classes de pH (Morand, 2001) ce sol est légèrement alcalin.

La conductivité électrique est de l'ordre de 8.77 dS/m et 6.76 dS/m en hivers et au printemps respectivement. Selon l'échelle de salinité (Aubert, 1978) ce sol est extrêmement salé ce qui est remarqué par des importantes efflorescences salines en surface. Cette salinité est amplifiée par le manque d'irrigation. Selon Kirida et Baytoru (2000), l'augmentation de la fréquence d'irrigation peut empêcher l'accumulation des sels dans la zone racinaire, cependant l'augmentation de l'intervalle d'irrigation même avec des fortes quantités d'eau provoque l'accumulation des sels. Ainsi, Durand et Renty (1983) ont montré que plus la fréquence d'irrigation est grande plus la solution du sol est diluée et plus l'enlèvement des sels solubles est facile.

La teneur en matière organique est plus faible dans ce sol comparativement aux sols des autres stations. Le rapport C/N est toujours inférieur à 10, synonyme d'une minéralisation intense.

IX.2.3. Caractéristiques biotiques

Les densités des principaux groupes microbiens enregistrées dans sols des trois stations d'études et durant les deux saisons sont récapitulées dans le tableau 21.

Tableau 21. Densité des microorganismes dans les sols des 3 stations étudiés

UFC.g ⁻¹ .s.s	Station1		Station2		Station3	
	Hiver	Printemps	Hiver	Printemps	Hiver	Printemps
Bactéries (×10 ⁵)	64.34	193.8	31.63	55.61	20.72	48.15
Champignons (×10 ⁴)	172.5	319.2	160.12	287.5	151.77	238.4
Actinomycètes (×10 ⁴)	134.55	199.5	91.6	148.75	69.62	92.03

IX.2.3.1. Station1 (palmeraie bien entretenue)

Les densités microbiennes les plus élevées ont été enregistrées au niveau du sol de cette station (Fig. 29).

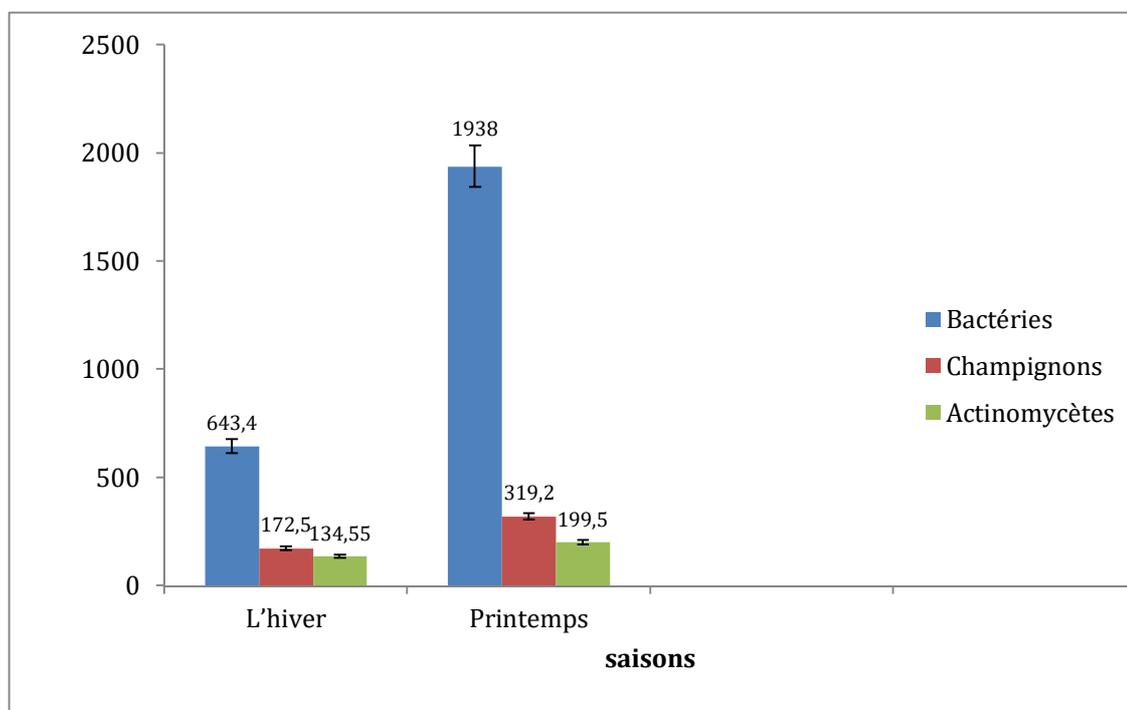


Figure 29. Représentation graphique de la densité des différents groupes microbiens dans la Station1 (palmeraie bien entretenue)

L'importante biomasse microbienne enregistrée dans le sol de cette station peut être expliquée par plusieurs facteurs. Tout d'abord, les irrigations plus fréquentes produisent des conditions plus favorables au développement microbien. L'influence du contenu en eau sur les communautés microbiennes du sol est bien connue dans la littérature (Cook *et al.*, 1985 ; Olson et Lindwall, 1991; Santrůckovů et Straskraba, 1991 *in* Pelletier, 1992).

En effet, la population microbienne du sol peut varier de façon spectaculaire selon les conditions d'humidité du sol (Shrestha *et al.*, 2015). L'eau conditionne l'activité biologique et la plupart des processus physico-chimiques qui se produisent dans le sol (Stotzky, 1997 ; Lavelle et Spain, 2001). C'est aussi le facteur physicochimique le plus important qui affecte les organismes dans le sol. La présence d'une couche d'eau est nécessaire à la survie des bactéries. Comme les composants majeurs des constituants du sol, l'eau est considérée comme une ressource. Sa disponibilité dans le temps et dans l'espace, les compétitions qui surviennent entre les organismes et l'énergie déployés par les plantes et les autres organismes pour l'absorber dans les pores du sol, sont des caractéristiques importantes, contrôlant l'activité dans le sol (Lavelle et Spain, 2002).

En effet, l'humidité règle l'activité biologique de plusieurs manières : elle intervient directement puisque l'eau est indispensable au développement des organismes vivants ; ou indirectement en modifiant les échanges gazeux et en transportant verticalement ou latéralement diverses substances, dont les substrats énergétiques ou certains éléments de la microflore (Morel, 1989). La teneur en matière organique a également favorisée la prolifération microbienne dans ce sol. En général, un sol plus riche en matière organique constitue un substrat favorable à l'activité microbiologique.

Il ressort de ces résultats également, que les bactéries sont le groupe microbien le plus dominant. En effet, les bactéries sont les organismes les plus nombreux et représentent en moyenne $6 \cdot 10^8$ cellules par gramme de sol et un poids de 10000 kg/ha équivalant à 5% du poids sec des composés organiques du sol (Cherif, 2014).

IX.2.3.2. Station 2 (palmeraie moyennement entretenue)

Les résultats microbiologiques de cette station montrent que la densité des bactéries est remarquablement plus faible par rapport à la station 1, suivie par les actinobactéries, cependant celle des champignons est sensiblement plus faible (Fig. 30).

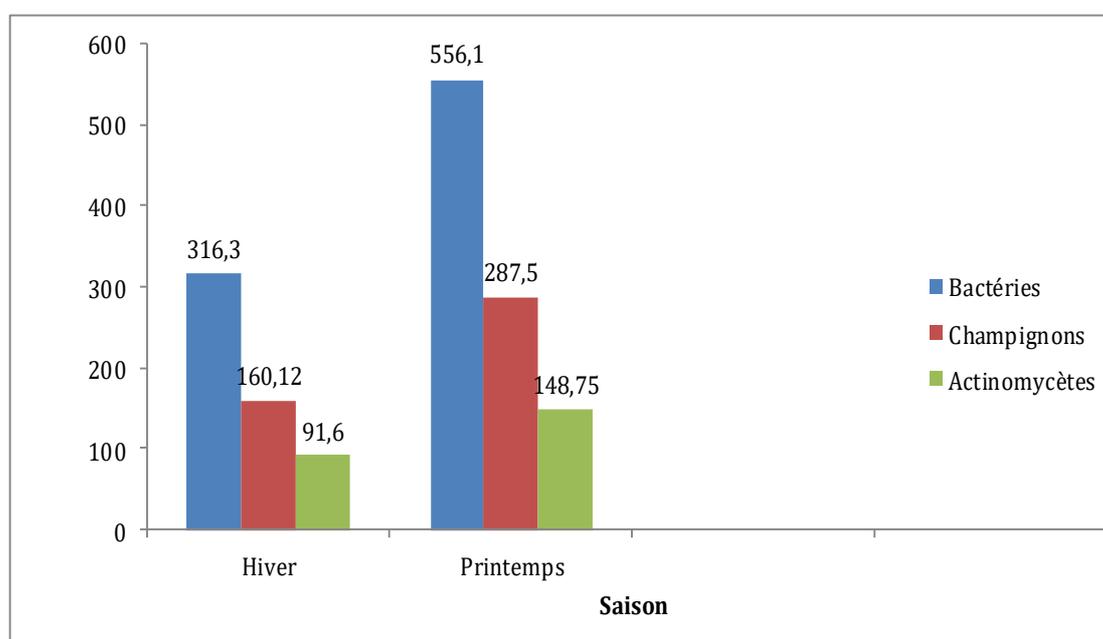


Figure 30. Représentation graphique de la densité des différents groupes microbiens dans la Station 2 (palmeraie moyennement entretenue)

Ces résultats sont justifiés par la teneur en eau relativement plus faible par rapport au sol de la station 1 induite par la diminution de la fréquence d'irrigation. Lorsque la teneur en eau diminue, le nombre des bactéries diminue aussi, très rapidement. En effet, toutes les espèces qui ne sont pas capables de s'enkyster, telles que les bactéries asporogènes, diminuent rapidement en saison sèche. D'autres parts, les espèces anaérobies, capable de sporuler, augmentent rapidement leur nombre avec la diminution de la teneur en eau (Killian et Feher, 1939).

Toutefois, un certain nombre d'études a démontré de quelle manière la biomasse est stimulée par la réhumidification d'un sol partiellement sec (Bottner, 1985), et comment la dynamique des populations microbiennes et la fréquence des irrigations sont souvent corrélées (Schnurer et *al.*, 1986). Jenkinson (1966) a d'ailleurs résumé les théories proposées pour expliquer la stimulation biologique rapide résultant de la réhumidification d'un sol suivant une période sèche. Birch (1960) considérait que cette stimulation était principalement, due à l'effet physique de dessiccation sur la matière organique : les surfaces des colloïdes organiques ou organominérales, auparavant inaccessibles aux enzymes, se retrouvent exposées à l'activité enzymatique grâce à la fragmentation des agrégats ou à l'augmentation de la porosité. Mais le substrat utilisé pour redévelopper la population microbienne est également constitué par des organismes tués par dessiccation (Bottner, 1985). Ainsi, l'augmentation de la biomasse après les 50 premiers jours peut provenir de l'influence de la réhumidification du sol, mais aussi de la perturbation que le sol a subi lors du labour et du semis. En effet, ces travaux détruisent les agrégats du sol, rendant ainsi disponible une certaine proportion de matière organique pour l'assimilation microbienne (Powlson, 1980).

Cependant, si une dessiccation suivie d'une réhumidification provoque une augmentation notable de la minéralisation du carbone et de l'azote organique du sol (Birch et Friend, 1956), elle ne semble pas entraîner, lorsque l'opération est menée à 30°C au moins, une élévation notable du nombre de microorganismes (Jäger, 1967; Kilbertus et *al.*, 1976). Par contre lorsque le sol est préalablement desséché à 105°C, on assiste à un accroissement sensible de la population tellurique (Kilbertus et *al.*, 1976). Le traitement, dans ce dernier cas, a fait apparaître une quantité appréciable de substrats énergétiques résultant de la mort des organismes végétaux, animaux et microbiens.

La recolonisation des échantillons de sol, replacés dans leur contexte naturel, s'opère rapidement. Après deux semaines seulement, la composition qualitative et quantitative de la microflore bactérienne est redevenue normale (Arpin et al, 1980).

La densité des actinobactéries est relativement faible dans les deux saisons par rapport aux autres microorganismes. Des densités similaires ont été rapportés par d'autres auteurs dans les sols salins de différentes régions géographiques (Hashem et El Gounaim, 1973 ; Cai et al., 2009 in Mokrane et al., 2013). De manière générale, les bactéries non-mycéliennes et surtout les champignons sont plus résistant à la salinité. Peu d'études concernant la relation entre la salinité des sols et la densité des actinobactéries ont été menées. En Californie, Killham et Firestone (1984) in Mokrane et al. (2013), n'ont trouvé aucune corrélation entre les deux facteurs. En revanche, Amir et al. (1989) ont noté que les sols salins de la région de Timimoun contenaient un très faible pourcentage d'actinobactéries (par rapport aux bactéries non-mycéliennes) si la conductivité électrique dépasse 8 dS /m. La variabilité observée dans les résultats de plusieurs auteurs peut être dû au fait que la salinité ne sont pas le seul facteur affectant la composition microbienne des sols (Mokrane et al, 2013). En effet, le nombre de micro-organismes dans un sol donné dépend aussi de la capacité d'adaptation de ces micro-organismes aux sels présents dans ce sol.

IX.2.3.3. Station 3 (palmeraie mal entretenue)

La faible densité microbienne observée dans le sol de cette station (Fig. 31), semble principalement reliée au stress provoqué par le déficit en eau du sol.

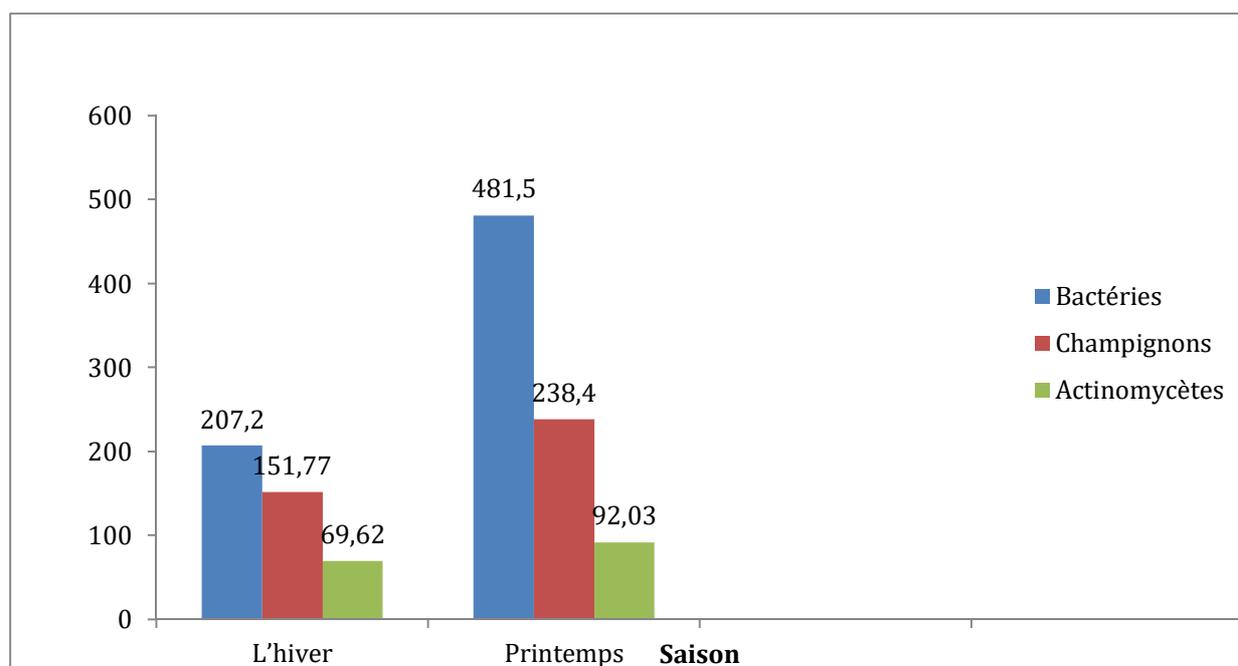


Figure 31. Représentation graphique de la densité des différents groupes microbiens dans la station 3 (palmeraie mal entretenue)

En effet, le contact entre les microorganismes et le substrat disponible, et les performances physiologiques des microorganismes, sont limités à des teneurs faibles en eau du sol (Mlih *et al.*, 2015).

Une des raisons qui explique les changements de la composante biologique dans un système de culture en irrigué du sol est la présence de ressources nutritionnelles différentes en quantité et en qualité par rapport à un système de culture sans irrigation du sol (Khelif, 2010).

Toutefois, il faut signaler que si la dessiccation entraîne la mort d'une fraction importante de la microflore tellurique, elle n'aboutit jamais à une stérilisation complète du sol. Une densité microbienne considérable est enregistrée pour les principaux groupes microbiens dans le sol de cette station. C'est ainsi que Kilbertus *et al.* (1978) in Arpin *et al.*, (1980) ont montré qu'un sol contenant de nombreuses colonies procaryotiques, voit, après un mois de dessiccation, sa population diminuer et le contenu cytoplasmique des bactéries devenir diffus, sans qu'il y ait altération apparente de la paroi. Après 6 mois, le contact entre les germes et le polymère n'est plus aussi intime ; cela tendrait à prouver que les bactéries réutilisent une partie de ces substances.

Comme l'ont prouvé les travaux de Chen et Alexander (1973), le nombre de germes chute très rapidement dès les premiers jours de la dessiccation pour se maintenir constant du 15^{ème} au 210^{ème} jour de l'expérience.

La dessiccation modifie certaines propriétés physiques du sol : augmentation de la porosité, fragmentation de la matière organique, ce qui provoque une augmentation des surfaces exposées aux attaques microbiennes (Birch 1960), tout en favorisant le déplacement des germes. Elle entraîne également la mort d'un certain nombre d'organismes animaux et végétaux, ce qui occasionne une augmentation de la teneur en composés organiques de ce biotope. Toutes ces modifications créent des conditions très favorables au redémarrage de la microflore (Pelletier, 1992). Ce phénomène est appelé « croissance cryptique ».

Cette faible teneur en eau est, donc, certainement liée à la texture du sol. En effet West *et al.* (1988), dans une étude sur les relations existant entre le $C_{\text{microbien}}$, le flux d'azote libéré, le contenu en ATP, l'activité enzymatique et le contenu en eau gravimétrique de trois sols de textures différentes, ont d'ailleurs constaté que tous ces paramètres biologiques et biochimiques diminuaient avec le contenu en eau du sol. Cependant, ils ont aussi observé que la relation entre

la biomasse microbienne et le contenu en eau apparaissait être influencée par la texture du sol. Mais, l'affirmation de Sparling et *al.* (1987), selon laquelle la résistance microbienne à la dessiccation est fortement reliée à la moyenne annuelle du déficit en eau, et non simplement à la texture du sol, leur a inspiré une seconde étude. Ils ont aussi étudié les relations existant entre ces paramètres biologiques et biochimiques et, le contenu en eau gravimétrique de trois sols de texture similaire, mais avec des régimes de précipitation différents (1000 – 2700 mm.an⁻¹). Cette étude leur a permis de démontrer que les sols sableux sont davantage susceptibles au déficit en eau, et que les populations microbiennes, qui les habitent, peuvent ainsi inclure une proportion importante de microorganismes adaptés aux conditions extrêmes d'humidité du sol.

Certains auteurs (Sparling et *al.*, 1987) ont, en effet, démontré que les populations microbiennes des régions arides sont plus résistantes à la dessiccation. La principale caractéristique qui permet aux microorganismes de résister à la dessiccation consiste en leur capacité à préserver leur eau intracellulaire. Il est essentiel que ces organismes ne procèdent pas par simple osmose (équilibre passif) pour le contrôle de leur contenu en eau intracellulaire. Ainsi, l'un des mécanismes reconnu pour contrer l'impact de la diminution du potentiel en eau de l'environnement extérieur est l'accumulation intracellulaire de solutés organiques et inorganiques ou osmoprotecteurs, lesquels sont compatibles à divers degrés avec les processus métaboliques cellulaires (Yancey et *al.*, 1982; Le Rudulier et *al.*, 1984). Harris (1981) a aussi émis l'hypothèse que le facteur déterminant dans la capacité à résister au changement rapide de contenu en eau était l'épaisseur de la membrane cellulaire.

Plusieurs microorganismes du sol sont connus comme étant intolérants aux faibles contenus en eau (Harris, 1981; Paul et Clark, 1989). Plusieurs auteurs ont constaté qu'une stérilisation partielle, due à la dessiccation d'une partie de la biomasse présente, survenait lorsque le sol était contraint à une période de sécheresse (Bottner, 1985 ; Sparling et *al.*, 1987). Mais il semblerait que l'impact de la dessiccation a aussi un effet sélectif. Bottner (1985) suggère que la biomasse tuée par la dessiccation est principalement constituée de la fraction active, la fraction survivante étant sous une forme qui la protège des conditions drastiques extérieures.

Parmi les bactéries isolées au niveau de sites extrêmes, certaines présentent des capacités de résistance à la dessiccation et ont développé des mécanismes moléculaires de résistance

adéquats, comme certaines bactéries appartenant au phylum des *Deinococcus Thermus* (Paulino-Lima et al., 2013, Rainey et al., 2005 in Theodorakopoulos, 2013).

Lorsque le sol se dessèche à une humidité inférieure à celle qui correspond au point de flétrissement permanent, c'est-à-dire lorsque le pF dépasse 4,2, certaines espèces de la microflore tellurique manifestent encore une activité parfois importante. Mais cette activité tend à s'annuler lorsque l'on se rapproche du pF 5,5. Au niveau et au-delà de ce seuil, certaines cellules microbiennes commencent à subir l'action létale d'un pF excessif : on quitte alors le domaine des faibles humidités ($4.2 < pF < 5.5$) pour entrer dans celui de la dessiccation ($pF > 5.5$) (Dommergues, 1965).

En effet, les facteurs permettant la survie des germes et la recolonisation du biotope par les microorganismes sont :

- En premier lieu, les organes de résistance : sclérotes, chlamydozoospores, endospores, etc.
- La protection offerte par les tissus végétaux, dans le cas des nodules ou des mycorhizes par exemple.
- L'effet protecteur de la gangue argileuse et polysaccharidique entourant les colonies bactériennes des agrégats.
- La recolonisation est facilitée par la survie de certaines espèces ainsi que par le déplacement des germes (croissance mycélienne, organes locomoteurs, déplacement dû à des courants de convection de l'eau, etc.) (Arpin et al., 1980).

Quant à la résistance des différents groupes microbiens au stress hydrique, nous avons constaté d'après nos résultats que champignons sont les microorganismes les plus adaptés au stress hydriques suivis par les actinomycètes et enfin les bactéries. En effet selon Malinowski et al., (2000), les champignons sont généralement plus adaptés à la sécheresse que des bactéries ou la faune du sol. Certains mycètes du sol peuvent survivre pendant les périodes de sécheresse par la formation des spores. Ces derniers sont des cellules de résistance et leur formation nécessite une concentration, plus au moins, importante de matière carbonée.

Le seuil limite pour les champignons est de l'ordre de -20 MPa, avec de large variabilité suivant les espèces. Les *Aspergillus* et les *Penicillium* sont très résistantes à la sécheresse : leurs spores sont capables de germer à des potentiels hydriques de -30MPa. Certains champignons sont encore plus résistants : le champion dans ce domaine paraît être *Xeromyces biosporus*, capable de se développer jusqu'à une tension de -65 à -69 MPa .Les bactéries sont en moyenne

plus sensibles que les champignons. Leur activité est faible, aux alentours du point de flétrissement (-1.5MPa), s'arrête vers (-6 à 18 MPa), mais il existe de fortes variations selon le groupe taxonomique. Les bactéries à Gram négatif, aux parois minces sont en général moins résistantes que les bactéries à Gram positif à l'abri de parois épaisses. La finesse de la paroi peut être compensée dans certains cas par la présence d'une capsule polysaccharidique protectrice (Gobat et al, 2003).

Pour ce qui est des actinobactéries, Mokrane et al., (2013), ont constaté, qu'en général, leur densité est moins importante dans les sols secs, mal aérés et pauvre en sources de carbone et d'azote. Des résultats similaires ont été obtenus dans un sol sablonneux de la Chine (Lin et al., 2007). Cependant, les actinobactéries, en raison de leur forme mycelienne, sont moins sensibles au stress hydrique par rapport aux bactéries. Selon Arpin et al. (1980), les actinobactéries résistent mieux à la dessiccation. En effet ces germes produisent des conidies supposées être résistantes à la dessiccation (Meiklejohn, 1957) et capables de survivre durant de longues périodes dans des sols desséchés (Gray et Williams, 1974 ; Chen et Alexander, 1973). Szabo et al. (1964) ont prouvé que les conidies des actinobactéries étaient plus résistantes que le mycélium et qu'elles étaient susceptibles de résister à une stérilisation partielle du sol.

IX.2.4. Discussion et conclusion

Nos résultats obtenus durant cette phase nous montrent qu'il est clairement constaté que le maximum de l'activité microbienne est enregistré dans le sol le plus humide (palmeraie bien entretenue). Il ressort, également, des représentations graphiques récapitulatives (Fig. 32 et Fig. 33), que la dominance de la microflore bactérienne est enregistrée dans les sols des trois stations étudiés à cause de leur grand pouvoir de multiplication, suivies par les champignons et enfin les par les actinobactéries.

Cependant, le groupe microbien le plus touché par l'effet du stress hydrique du sol est celui des bactéries suivi par les actinomycètes et enfin les champignons. Cela montre que les champignons s'adaptent bien aux conditions arides contrairement aux autres groupes microbiens.

Le déficit hydrique, qu'il soit prolongé ou de courte durée, affecte inéluctablement, d'une manière négative, la densité des groupes microbiens. Néanmoins les résultats obtenus ne

peuvent pas être exclusivement attribués à l'humidité du sol car elle a été étudiée conjointement à d'autres facteurs édaphiques.

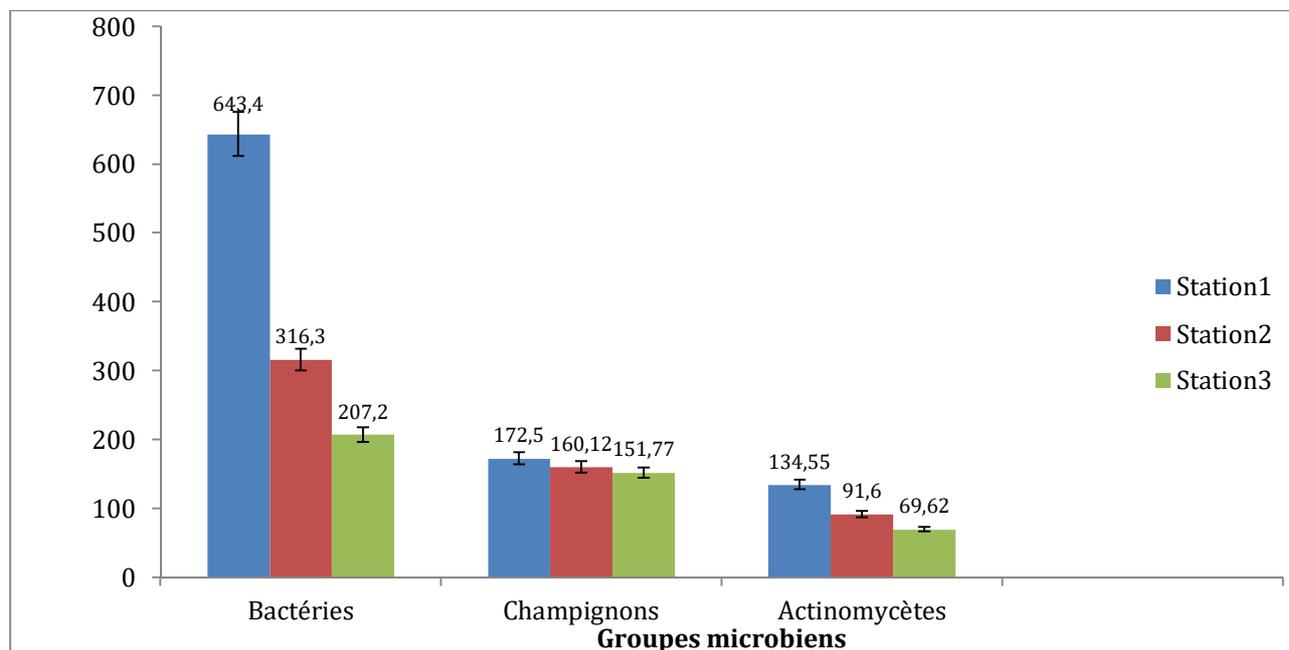


Figure 32. Représentation graphique de la densité des différents groupes microbiens dans les trois stations en hiver

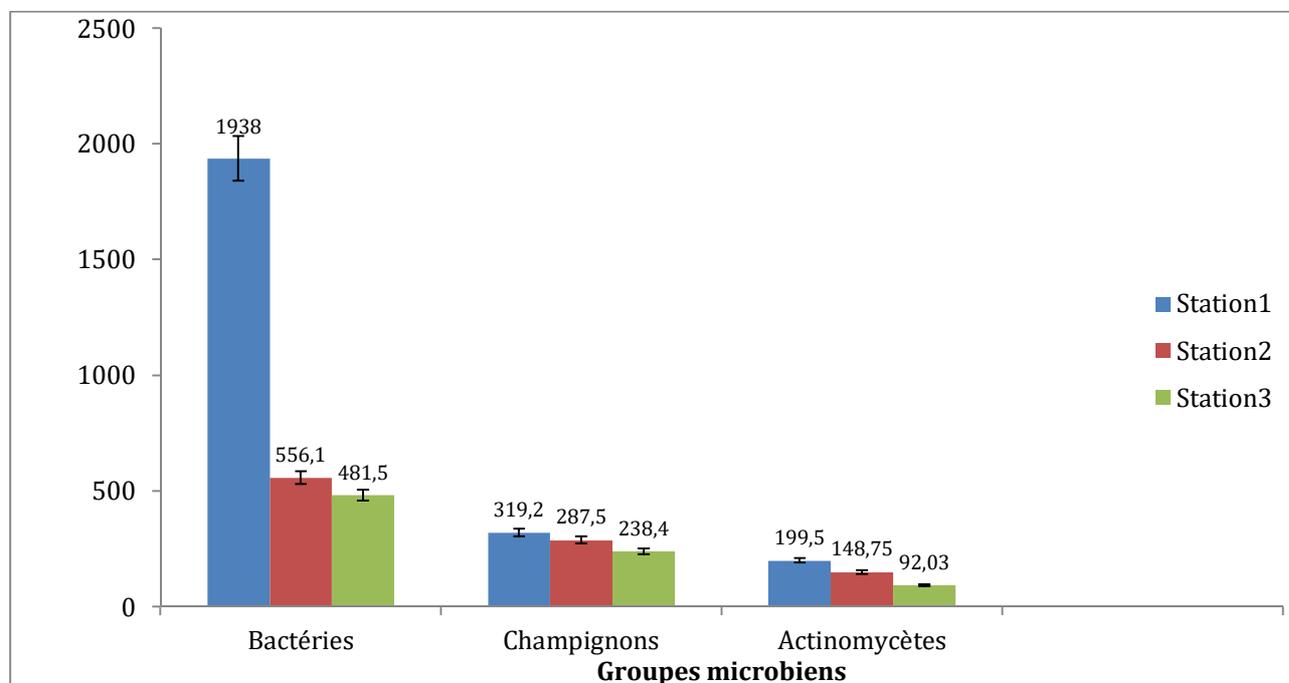


Figure 33. Représentation graphique de la densité des différents groupes microbiens dans les trois stations au printemps

Pour ce qui est de l'effet saisonnier, le nombre des microorganismes dans les trois stations est élevé au printemps par rapport à l'hiver. Dans les pays à saisons contrastées, les maxima d'activité se situent au printemps et à l'automne où l'humidité et la température sont favorables (Morel, 1989), par contre l'activité est moins importante en hiver. C'est le cas de nos sols étudiés où les conditions climatiques sont favorables au printemps ce qui permet une bonne prolifération microbienne. D'une manière générale la quantité de biomasse augmente à la sortie de l'hiver suite à un flush de minéralisation similaire à un effet de stérilisation partielle constaté par plusieurs auteurs (Nicolardot, 1983).

La différence du nombre microbien en hiver et en printemps est, peut être expliquée donc, par le degré de température, tandis que la différence de densité microbienne dans les stations est expliquée par le taux d'humidité qui est très élevé dans la station 1, moyen dans les stations 2 et faible dans la station 3.

Ces résultats montrent, également, qu'il existe une variation saisonnière de la biomasse microbienne caractérisée par des baisses en saison hivernale et des hausses en saison printanière. Cette variation saisonnière montre la présence de différents types de microorganismes dans le sol à chaque époque de l'année.

Les analyses microbiologiques montrent que tous les sols étudiés sont peuplés par une microflore diversifiée et adaptée aux conditions difficiles du milieu saharien, la biomasse microbienne varie considérablement d'un sol à un autre, cette variation est due aux effets de type du sol.

Chapitre X. Variations spatio-temporelles de la biomasse microbienne dans les sols oasiens

Les écosystèmes oasiens sont des écosystèmes complexes et très hétérogènes dont les fonctions varient dans le temps et dans l'espace.

L'étude de la variation spatio-temporelle des bio-indicateurs du sol s'avère complexe en conditions environnementales, puisque les espèces biologiques sont en étroite relation avec leur environnement. Ainsi, le type de sol, les conditions climatiques, les traitements appliqués au sol, la flore et les populations microbiennes elles-mêmes, conditionnent la vie et le développement, de la biomasse. C'est pourquoi des mesures des paramètres physico-chimiques du sol, réalisées en parallèle avec celles des bio-indicateurs, pourront être utiles lors de l'interprétation des variations de ces paramètres biologiques (Pelletier, 1992).

X.1. Variabilité spatiale de l'activité microbienne sous culture de palmier dattier

X.1.1. Introduction

La distribution spatiale à petite échelle des substrats organiques et de la biomasse et l'activité microbienne dans le sol, est un facteur déterminant dans le cycle des éléments nutritifs et la stabilisation de la matière organique du sol (Ladd et *al.*, 1993).

Dans une parcelle cultivée, le sol présente une grande hétérogénéité spatiale des conditions locales de circulation d'eau, d'aération et d'activités biologiques (Boizard et *al.* 2004). Les informations sur l'étendue de cette hétérogénéité à petite échelle et de ses conséquences sur l'abondance microbienne et la décomposition sont rares (Baldrian et *al.*, 2010). Selon Peigne et *al.* (2009), une forte hétérogénéité spatiale des propriétés du sol, en particulier microbiologiques, peut masquer les effets des différents traitements de gestion des sols.

Par conséquent, la biogéographie écologique suggère que les différences dans l'abondance et la fonction microbienne sont entraînés principalement par des interactions entre les organismes ainsi qu'avec leurs environnements physiques et biotiques immédiats.

Généralement, l'abondance et la fonction microbienne peuvent être déterminées localement (au sein de l'habitat), ainsi que par des facteurs régionaux qui s'opèrent à des échelles plus grandes que l'habitat (Boeddinghaus et al., 2015). Pour la plupart des déterminations biologiques, la variabilité spatiale observée est de même ordre de grandeur que celle liée aux caractéristiques physico-chimiques classiques. Les deux types de déterminations sont d'ailleurs en parfaite cohérence et la même stratégie d'échantillonnage peut être appliquée (Baize, 2000).

la compréhension de la variabilité spatiale des propriétés du sol est importante dans la détermination des contraintes du sol pour la nutrition des plantes et de la gestion appropriée des ressources du sol (Couto et al., 1997). Cette variabilité peut être affectée par deux facteurs : internes de formation du sol, tels que les matériaux parentaux, et les facteurs externes de gestion des sols, comme la fertilisation (Liu et al., 2009).

La variabilité spatiale se manifeste à plusieurs échelles. Généralement on distingue plusieurs niveaux de variabilité spatiale allant de l'échelle du microsite à l'échelle de variabilité régionale : variété des types de sols à échelle Kilométrique, mais aussi variations intra-parcellaire décamétriques, voire métriques.

Plusieurs études ont porté sur la mesure des activités enzymatiques et de la biomasse microbienne dans les sols (Caldwell, 2005). Cependant, ceux-ci ont largement négligé la variabilité spatiale à petite échelle (par exemple < 10 m) de la distribution verticale des principaux groupes microbiens, la biomasse microbienne et l'activité enzymatique engendrée par ces microorganismes. Ainsi, nous nous sommes intéressés à la variabilité spatiale à l'échelle métrique car c'est à cette échelle que l'étude de l'impact des perturbations est généralement étudiée.

Dans cette phase nous essaierons, donc, d'étudier les patrons de variabilité spatiale à petite échelle de deux indicateurs de la qualité des sols à savoir la biomasse microbienne et l'activité enzymatique sous culture de palmier dattier et d'identifier quels sont les facteurs édaphiques qui les conditionnent.

X.1.2. Caractéristiques abiotiques

Les caractéristiques physico-chimiques de la couche superficielle (0 – 30 cm) des différents points du sol étudié sont représentées dans le tableau 22.

Tableau 22. Caractéristiques des analyses physico-chimiques des différents points du sol étudié (0-30cm)

Paramètres		P ₀	P ₁	P ₂	P ₃
Classe texturale		SL	SL	SL	SL
Densité apparente (g/cm ³)		1.03	1.14	1.27	1
Humidité du sol (%)		11.35	12.86	13.50	11.35
Calcaire total (%)		4.7	5.1	6.2	4.8
CE à 25°C (dS/m)		5.93	7.27	6.5	6.27
pH		6.39	8.16	8.24	9.10
Température du sol (°C)		17	18.2	18.8	20.5
Caractéristiques biochimiques	C.org (%)	1	0.6	0.4	0.3
	N (%)	0.8	0.4	0.07	0.07
	M.O (%)	1.72	1.03	0.68	0.51
	C/N	1.25	1.5	5.7	4.2

D'après l'analyse granulométrique, et selon les limites des classes granulométriques utilisées dans le système USDA/FAO, le sol étudié rentre dans la classe « sablo-limoneuse ».

Les valeurs de pH des différents points du sol oscillent entre 6.39 et 9.10. Le pH au P₀ situé en zone rhizosphérique est sensiblement plus faible par rapport aux autres points suite aux exsudats acides sécrétés par les racines. L'activité du sol, tout comme la disponibilité de la majeure partie des éléments nutritifs dépend du pH (Bertschinger *et al.*, 2003). Selon l'échelle d'interprétation du pH signalé par (Le Clech, 2000), le sol étudié a une réaction alcaline dans les 04 points.

Le taux d'humidité est assez élevé pour les 04 points. Ce taux varie de 11.35% et 13.5%. Ceci est dû à l'irrigation. Les teneurs en calcaire total sont de l'ordre de 4.7%, 5.1% 6.2%, 4.8% dans les points P₀, P₁, P₂, P₃ respectivement. En comparant les valeurs obtenues à celles signalées par Baize (1988), nous constatons que le sol étudié est peu à modérément calcaire. En ce qui concerne la densité apparente et selon Brai (1994), les horizons A des sols cultivés

ont normalement une D_a variant entre 0,9 et 1,8 g.cm⁻³. La densité apparente des différents points du sol étudié se situe dans la gamme citée.

Les résultats obtenus concernant la conductivité électrique varient de 5.93 à 7.25 dS/cm³ montrent que le sol étudié est très salé à extrêmement salé selon Le Clech, 2000). Cette forte salinité est justifiée d'une part par la forte évaporation due aux températures élevées et d'autre part, par la faible précipitation qui caractérisent le climat des régions arides. En plus, les vents fréquents qui soufflent dans la région de Ouargla accentuent le dessèchement. Ceci est d'autant plus important que le couvert végétal est faible. Il s'ajoute aussi le phénomène de la remontée des eaux de la nappe phréatique très salée ainsi que la salure des eaux d'irrigation d'origine souterraine qui augmentent la teneur en sels dans le sol. Selon Halilat (1993), dans les climats arides, les pluies sont rares et elles ne pénètrent pas suffisamment dans le sol pour provoquer le lessivage des sels vers les profondeurs.

Une variabilité marquante a été enregistrée concernant le carbone organique sachant que le taux du carbone est d'une diminution importante lorsqu'on passe du P₀ au P₃ loin du palmier dattier. La forte variabilité qui affecte les teneurs en carbone organique est certainement due à la distribution des résidus de récolte qui diminuent plus on s'éloigne du palmier dattier. Ainsi, nous avons enregistré des teneurs en matière organique de l'ordre de 1.72%, 1.03%, 0.68% et 0.51% pour les points P₀, P₁, P₂ et P₃ respectivement.

D'après Duchaufour (1984), la teneur en matière organique dans les zones arides ne dépasse pas 1%. Cette faible richesse en matière organique dans les sols des zones arides est due à la faible couverture végétale dans ces zones. La matière organique exerce un rôle très important sur le sol, elle améliore ses propriétés physiques (stabilité structurale, capacité de rétention en eau,...) et chimiques par la libération progressif des éléments nutritifs et l'augmentation de leur pouvoir absorbant en éléments minéraux apportés par les engrais (Callot et *al.*, 1982).

En ce qui concerne les teneurs en azote dans les différents points et en les comparant aux normes (Henin, 1969), le sol étudié présente des teneurs en azote très bas. Le rapport C/N est un indicateur de qualité biochimique souvent utilisé comme variable environnementale dans les études écologiques. Dans le contexte sol, cet indice permet de caractériser le niveau de fertilité (Soltner, 2003). Dans les sols cultivés, le rapport C/N s'abaisse davantage et traduit soit

une bonne activité biologique qui conduit à la minéralisation de la matière organique (C/N inférieur à 10), soit une activité biologique réduite ce qui conduit à une humification de la matière organique (C/N supérieur à 10). Le rapport C/N dans les différents points du sol étudié varie de 1.25 à 5.7.

X.1.3. Caractéristiques biotiques

X.1.3.1. Densité microbienne

Les résultats des dénombrements microbiologiques laissent apparaître des variations en nombre de germes pour les quatre points du sol étudié : P₀, P₁, P₂, P₃ (tableau, 23).

Tableau 23. Résultats de la densité des microorganismes dans les différents points du sol étudié

Germes UFC.g⁻¹.s.s	P₀	P₁	P₂	P₃
Bactéries (x10⁶)	36.96 ± 1.152	15.96 ± 0.67	9.2 ± 0.3	5.6 ± 0.415
Champignons(x10⁴)	38.08 ± 3.83	18.24 ± 0.408	4.6 ± 0.23	2.24 ± 0.06

Les densités microbiennes sont positivement corrélées aux propriétés physico-chimiques du sol telles que la teneur en matière organique, l'humidité du sol, des valeurs de pH ou la texture (Sebai et *al.*, 2007). Cette densité est d'autant plus faible dans les sols sahariens où les substrats énergétiques et nutritifs sont réduits, combinés aux effets des conditions pédoclimatiques extrêmes à savoir : température trop élevée, faible humidité et pH trop alcalin du sol.

Le facteur le plus limitant de la masse microbienne dans le sol est l'insuffisance des substrats énergétiques pour la microflore, que ce soit le carbone pour les hétérotrophes ou des substances minérales réduites pour les chimioolithotrophes

La biomasse et la population microbienne augmentent avec l'augmentation du carbone du sol et des réserves en azote, ce qui met en évidence que la disponibilité des ressources conditionnent les communautés microbiennes (Devries et *al.*, 2012). La disponibilité en azote minéral dans le sol est importante. Les micro-organismes ont un ratio C/N relativement faible (C/N entre 8 et 12) et ont souvent besoin d'une source d'azote minérale extérieure pour utiliser le substrat C du produit organique de façon optimale (Abiven, 2004).

X.1.3.1.1. Densité bactérienne

La densité bactérienne varie diversement dans le sol en allant du P₀ au P₃ (Fig. 34).

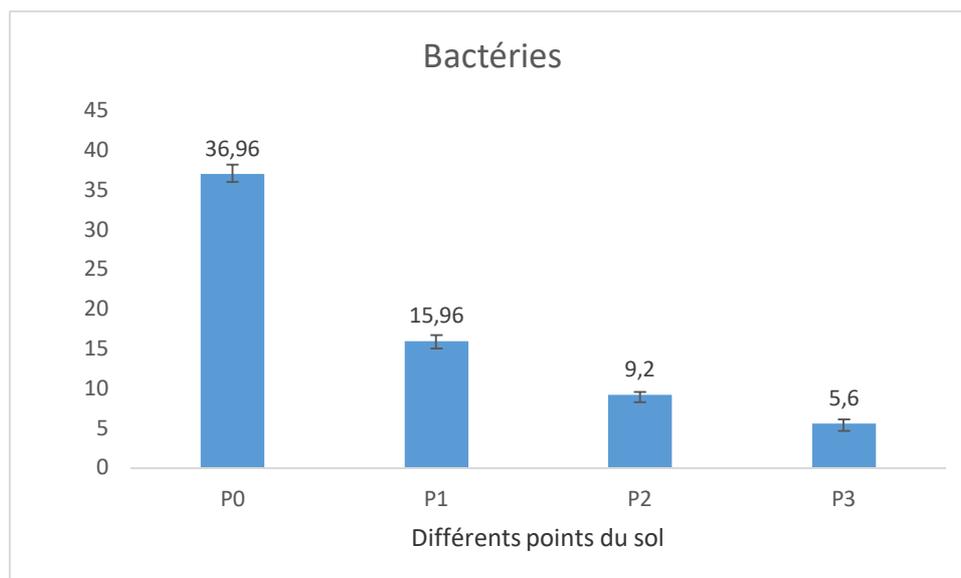


Figure 34. Représentation graphique de la variabilité spatiale des densités bactériennes dans les différents points du sol étudié exprimée en UFC.g⁻¹.s

Ainsi, l'analyse de la variance a révélé, pour la variable bactérie, des différences très hautement significatives entre les différents points du sol (tableau 24).

Tableau 24. Analyse de la variance de la variabilité spatiale des Bactéries dans les différents points du sol

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Points du sol	3	1770,7908	590,2636	1157,7201	< 0,0001
Erreur	8	4,0788	0,5099		
Total corrigé	11	1774,8696			

Le test de Fisher a classé nos échantillons en 4 groupes homogènes (tableau 25).

Tableau 25. Test de Fisher (LSD)/ Analyse des différences entre les modalités avec intervalle de confiance à 95% (variabilité spatiale des bactéries)

Modalité	Moyenne estimée	Groupes			
P ₀	36,9600	A			
P ₁	15,9600		B		
P ₂	9,2000			C	
P ₃	5,6000				D

La densité bactérienne au niveau du P₀ est beaucoup plus élevée par rapport aux autres points. Ceci est dû à l'effet rhizosphérique (racines respiratoires du palmier dattier) (Fig. 35).

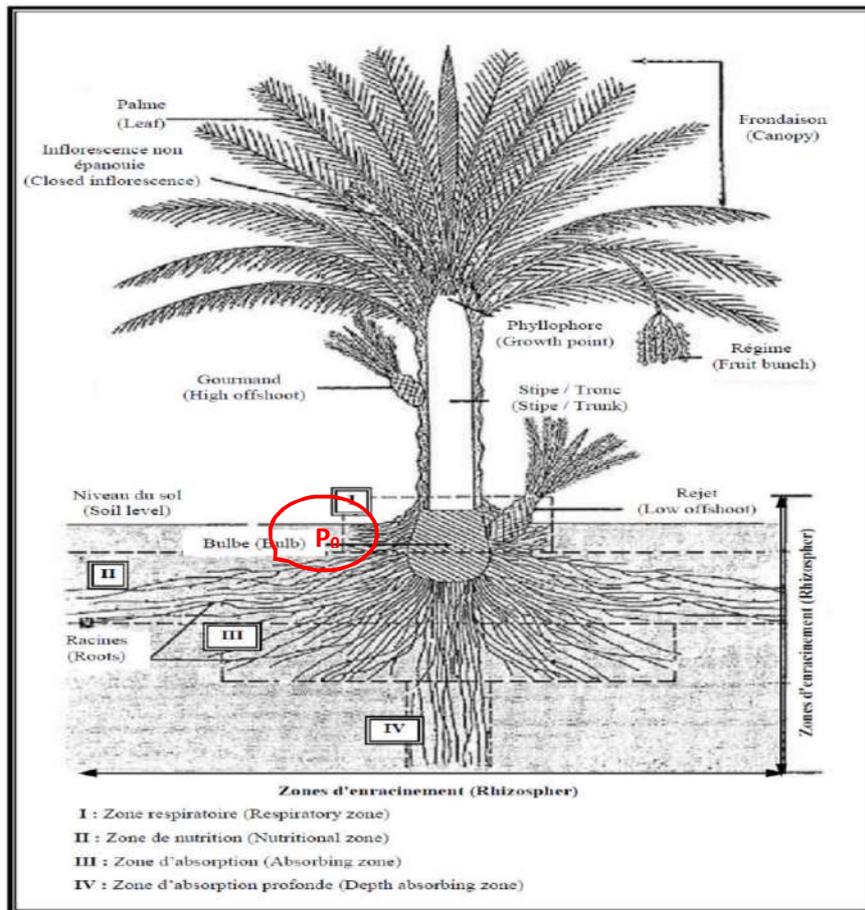


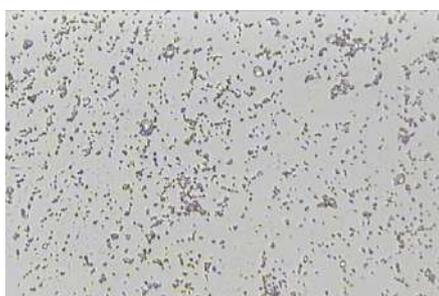
Figure 35. Morphologie du palmier dattier sur schéma de Munier (1973)

Dans un sol en équilibre, la population microbienne tend vers un «climax». Dans ces conditions elle ne varie guère car la quantité d'aliments disponibles est faible (Brown, 1975). Cependant cet état est éphémère et les microassociations de ce biotope évoluent très rapidement sous l'influence des sources trophiques, en particulier celles constituées par les racines elles-mêmes et leurs exsudats. La présence de racines modifie de façon qualitative et quantitative la population microbienne du sol. L'effet rhizosphère se traduit par une augmentation (de 20 à 40, et parfois plus) du nombre des microorganismes (Dommergues et Mangenot, 1970 ; Gray et Williams, 1975).

Il s'ajoute à l'effet rhizosphérique, la forte teneur en matière organique au niveau du P₀ due essentiellement aux retombées des résidus organiques de la partie aérienne du palmier dattier (datte, hchef, régime, palmes,...etc.) au pied du palmier. Les résidus de récolte lorsqu'ils retournent au sol représentent donc un apport nutritif essentiel pour les microorganismes comme

c'est d'ailleurs le cas pour les autres êtres vivants (vers de terre, insectes,..etc.). Les microorganismes se développent au contact des résidus de récolte. La localisation de ces derniers influence directement la localisation des activités microbiennes (Chaussod et *al.*, 1992).

Toutefois, il faut signaler que l'observation microscopique nous a montré la présence des bactéries Gram négatives dans les échantillons du sol au contact des racines (Fig. 36). Ces résultats sont identiques à ceux de Vagnerova et *al.* (1960) qui ont observé essentiellement des Bactéries Gram négatives à croissance rapide à la surface des racines, alors que les coques et les bâtonnets sporulés se retrouvent surtout dans le sol non soumis à l'action des plantes.



A. Bactéries Gram-

B. Bacilles Gram+

Figure 36. Microphotographie observée au microscope optique présentant des bactéries d'une colonie sur milieu solide inoculée par des dilutions provenant du P₀ (A) et des autres points du sol (B). (Gross x10 x 100).

Comparativement aux champignons, les bactéries constituent l'essentiel de la microflore du sol et sont extrêmement nombreuses. Il est estimé, par exemple, que dans des conditions exceptionnellement favorables, un gramme de sol contient environ 10^{10} à 10^{11} bactéries (Horner-Devine et *al.* 2003). Cette dominance pourrait être attribuée également à l'ubiquité des bactéries qui sont capables de coloniser des milieux différents, et elles peuvent être actives pour de grands domaines de température, d'acidité, d'alcalinité, de pression et de salinité (Dommergues et Mangenot, 1970).

Selon (Dommergues et Mangenot, 1970), dans les sols soumis à des conditions écologiques très dures (région arides), les densités bactériennes sont évidemment beaucoup plus faibles, mais elles tombent rarement au-dessous de 10^4 à 10^5 dans les horizons superficiels ce qui correspond à nos résultats. En effet, parmi les microorganismes du sol, les bactéries sont de loin les plus abondantes à la fois en termes de biomasse et de diversité taxonomique (Buckley et Schmidt 2002 *in* Theodorakopoulos, 2013). Elles sont plus favorisées par des milieux proches

de la neutralité, alors que les champignons s'accoutument de pH bas (Boullard et Moureau, 1962).

Les bactéries prolifèrent dans les milieux les plus riches en N et peu acides, un milieu aéré à pH supérieur à 6 (Duchaufour, 2001). De nombreuses enquêtes ont démontré que la structure de la communauté microbienne du sol est entraîné principalement par le pH du sol et le rapport C / N (Wu et *al.*, 2009 ; Fierer et *al.*, 2011; Shen et *al.*, 2014; Zhang et *al.*, 2013).

Un pH accrue entraîne une augmentation de la diversité bactérienne (Wu et *al.*, 2009 ; Shen et *al.*, 2013). Les proportions fongiques de la biomasse microbienne sont tous positivement liés au rapport C/N (Nilsson et *al.*, 2012). Toutefois, il faut signaler que les valeurs enregistrées pour la densité bactérienne sont moins importantes que celles rapportées pour les sols à texture fine. En effet, les sols à texture fine sont connus pour être plus favorable pour la croissance bactérienne en raison de leur plus grande capacité de rétention en eau et la disponibilité des nutriments, ainsi que le fait qu'ils sont mieux protégés contre les brouteurs bactériennes (Carson et *al.*, 2010).

X.1.3.1.2. Densité fongique

Les résultats montrent que la densité des champignons est très importante à proximité du palmier dattier P₀ et diminuent au fur et à mesure qu'on s'éloigne de celui-ci. (Fig. 37). Selon Davet (1996), la densité de la microflore fongique, varie de 8×10^3 à 10^6 UFC.g⁻¹.s.s

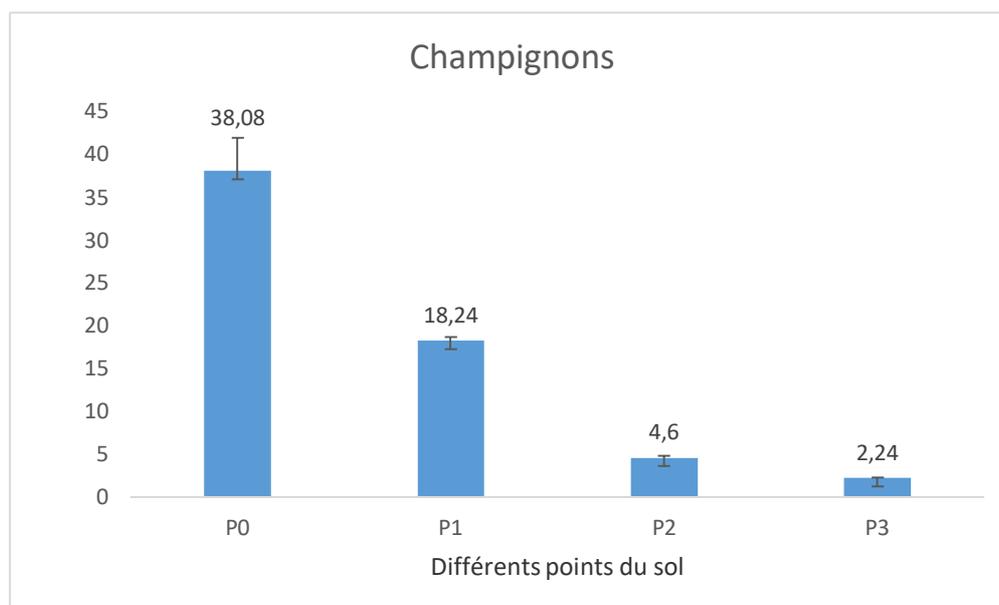


Figure 37. Représentation graphique de la variabilité spatiale des densités fongiques dans les différents points du sol étudié exprimée en UFC.g⁻¹.s.s

L'analyse de la variance a montré des différences très hautement significatives entre les différents points du sol pour la variable Champignons (tableau 26)

Tableau 26. Analyse de la variance de la variabilité spatiale des champignons dans les différents points du sol

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Points du sol	3	2433,3046	811,1015	217,8511	< 0,0001
Erreur	8	29,7855	3,7232		
Total corrigé	11	2463,0902			

Ainsi, le test de Fisher classe nos échantillons du sol en 3 groupes homogènes (tableau 27). Le groupe C regroupe les deux points P₂ et P₃ avec un intervalle de 4.62 x10⁴ UFC.g⁻¹.s.s à 2.24 x10⁴ UFC.g⁻¹.s.s

Tableau 27. Test de Fisher (LSD)/ Analyse des différences entre les modalités avec intervalle de confiance à 95% (variabilité spatiale des champignons)

Modalité	Moyenne estimée	Groupes		
P ₀	38,0800	A		
P ₁	18,2467		B	
P ₂	4,6267			C
P ₃	2,2400			C

La forte densité fongique au niveau du P₀ peut être justifiée par plusieurs facteurs. En effet, la répartition et le nombre des champignons dans le sol sont affectés par nombreux facteurs du milieu, tels que : la teneur du sol en matière organique au dépend de laquelle vivent ces microorganismes hétérotrophes. L'étude de (Liu et al., 2014) a révélé que la répartition biogéographique des communautés fongiques a été tirée principalement par la teneur en carbone des sols noirs dans le nord de la Chine. Ainsi, Burges (1963) in Sasson, (1967) a insisté sur le rôle capital du substrat carboné disponible comme source d'énergie pour les champignons.

Il faut signaler, également que la valeur du pH au P₀ est relativement plus faible par rapport aux autres points ce qui a probablement favorisé une densité fongique plus importante.

X.1.3.2. C_{microbien} et N_{microbien}

La biomasse microbienne hétérotrophe du sol, bien que représentant quelques pour cent du carbone total d'un sol, joue un rôle crucial car elle représente le « chas de l'aiguille à travers lequel tout le carbone et les nutriments du sol sont transformés » (Recous *et al*, 2015).

Les résultats obtenus pour le C_{microbien} et le N_{microbien}, ont montré que ces valeurs ont diversement varié d'un point à un autre (tableau 28).

Tableau 28. Variabilité spatiale des valeurs du C_{microbien} et du N_{microbien} dans les différents points du sol

Points du sol	C _{microbien} (mg de C . Kg ⁻¹ s.s.)	N _{microbien} (mg de N . Kg ⁻¹ s.s.)
P ₀	234.21 ± 4.74	24.44 ± 0.54
P ₁	182.63 ± 2.353	12.22 ± 0.63
P ₂	156.84 ± 1.662	9.12 ± 0.351
P ₃	78.15 ± 2.14	3.87 ± 0.06

Ainsi l'analyse de la variance montre des différences très hautement significatives entre les différents points du sol (tableaux 29 et 30).

Tableau 29. Analyse de la variance de la variabilité spatiale du C_{microbien} dans les différents points du sol

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Points du sol	3	38080,4700	12693,4900	1432,5027	< 0,0001
Erreur	8	70,8885	8,8611		
Total corrigé	11	38151,3585			

Tableau 30. Analyse de la variance de la variabilité spatiale du N_{microbien} dans les différents points du sol

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Points du sol	3	685,3629	228,4543	1119,9198	< 0,0001
Erreur	8	1,6319	0,2040		
Total corrigé	11	686,9948			

La taille du compartiment « biomasse microbienne » est directement fonction du carbone disponible pour satisfaire les besoins énergétiques des microorganismes (carbone du sol, plus ou moins biodégradable, et surtout carbone des « entrées » par les végétaux : résidus de culture (Chaussod et *al.*, 1992). En ce qui concerne le $N_{\text{microbien}}$, il varie de 3.87, 9.12, 12.22, 24.44, (mg N.kg^{-1} de sol sec) selon l'ordre $P_3 < P_2 < P_1 < P_0$ (Fig. 38).

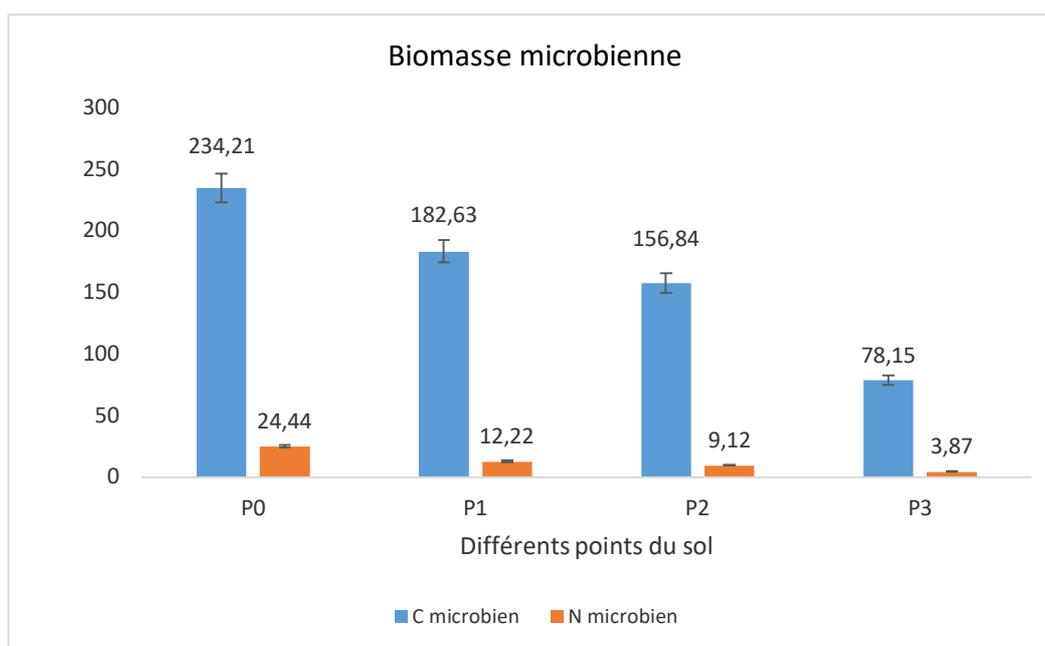


Figure 38. Représentation graphique de la variabilité spatiale du $C_{\text{microbien}}$ et du $N_{\text{microbien}}$ dans les différents points du sol étudié.

Cet azote immobilisé par les micro-organismes peut cependant être reminéralisé et devenir rapidement disponible pour les plantes car, selon Smith et Paul. (1990), la transformation du $N_{\text{microbien}}$ se fait 10 fois plus rapidement que celui immobilisé dans les résidus des plantes. Pour cela, une population microbienne plus active est nécessaire pour la synchronisation de la libération des éléments contenus dans la matière organique du sol (Tu et *al.*, 2006).

Piotrowska et Dlugosz (2012), trouvent que les changements locaux de l'humidité du sol, la concentration des éléments nutritifs du sol et la disponibilité du substrat, la biomasse racinaire, la composition et l'activité des micro-organismes du sol sont les facteurs les plus importants qui affectent le $C_{\text{microbien}}$ et le $N_{\text{microbien}}$ du sol. Ainsi, la biomasse microbienne du sol est en corrélation positive avec la teneur totale en carbone organique et des résidus de récolte mis à la disposition des microorganismes du sol (Shen et *al.*, 2014).

Quant à l'effet de la salinité, Wong *et al.* (2008) ont trouvé qu'une biomasse microbienne élevée dans les sols à haute salinité est due à une plus grande disponibilité du substrat, des concentrations élevées de sel, une forte dispersion des agrégats, et une grande solubilité de la matière organique. Ceci est en concordance parfaite avec nos résultats, de sorte que la salinité n'a pas joué un rôle déterminant.

Rendement microbien

La mesure de la biomasse (BM) peut servir à calculer d'autres indicateurs comme le rendement microbien, défini comme le rapport $C_{\text{microbien}} / C_{\text{organique}}$ et exprimé en %. C'est le pourcentage de biomasse microbienne par rapport à la quantité globale de carbone du sol. Plus cette valeur est forte et plus l'environnement physico-chimique et la qualité de la matière organique sont favorables à la production de biomasse microbienne. En ce sens on peut parler d'indicateur d'efficacité de la matière organique à produire de la biomasse microbienne (Chaussod *et al.*, 1992). La fraction vivante microscopique d'un sol a un taux de renouvellement important.

Cependant le rendement microbien ($C_{\text{microbien}} / C_{\text{organique}}$) varie de 1 à 5 % de la matière organique du sol (Smith et Paul, 1990). Les valeurs du rendement microbien obtenues dans cette étude ont varié diversement selon les différents points du sol étudié. Ces valeurs de rendement microbien sont, en général moyenne. Ainsi nous avons enregistré des valeurs qui oscillent entre 2,34 et 3,9. Des rendements microbiens beaucoup plus faibles ont été enregistrés pour des sols acides dans l'ouest du Cameroun (0.80% à 1.60%). Ces faibles rendements sont justifiés par un environnement physique défavorable à la vie microbienne (drainage insuffisant, tassement, labour excessif et en profondeur) ou un environnement chimique défavorable à la vie microbienne (pH acide, toxicité des produits agrochimiques et en particulier des herbicides) ce qui n'est pas le cas dans la présente étude.

X.1.3.3. Activité enzymatique

Les enzymes du sol catalysent un certain nombre de processus impliqués dans les fonctions du sol et sont considérés comme les indicateurs les plus probables pour déterminer les premières réponses aux changements dans la gestion des sols (Dick *et al.*, 1996). Comme les micro-organismes sont la principale source d'enzymes dans le sol, les activités

enzymatiques augmenteront en réponse à l'augmentation des populations microbiennes du sol (Tabatabai, 1994).

Les activités enzymatiques de la communauté microbienne du sol peuvent être utilisées comme indicateurs du potentiel de décomposition de matière organique du sol et de la disponibilité des éléments nutritifs (Waldrop et Firestone, 2004) et pour mesurer le degré des stress édaphiques (Schimdt et *al.*, 2011; Nannipieri et *al.*, 2012).

L'activité de la β -glucosidase est un indicateur important de la capacité d'un sol donné à dégrader la matière végétale et de fournir des sucres simples pour la population microbienne. Les activités enzymatiques du sol, y compris la β -glucosidase, sont généralement simples, des mesures peu coûteuses à réaliser par rapport à d'autres mesures biochimiques (Stott et *al.*, 2009).

Selon Singh (2015), la β -glucosidase et la phosphatase alcaline peuvent être utilisés comme indicateurs de la qualité des sols salés, le cas de notre sol.

Les valeurs obtenues pour l'activité de la β -glucosidase sont comprises entre 0,672 - 0,336 μg de glucose. g^{-1} de sol sec et montrent, statistiquement des différences très hautement significatives (tableau 31).

Tableau 31. Analyse de la variance de la variabilité spatiale de l'activité de la β -glucosidase dans les différents points du sol

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Points du sol	3	0,1969	0,0656	399,6591	< 0,0001
Erreur	8	0,0013	0,0002		
Total corrigé	11	0,1982			

L'amplitude des réactions obtenues pour ce paramètre suit la teneur en matière organique dans les quatre points dans l'ordre $P_0 > P_1 > P_2 > P_3$ (Fig. 39).

En effet, les enzymes du sol voient leurs activités perturbées par une altération de la quantité de matière organique des sols. En général, l'activité enzymatique des sols est directement proportionnelle au contenu en matière organique des sols (Frankenberger et Dick, 1983) elle est plus importante en surface qu'en profondeur et elle suit la distribution du carbone organique.

Il a été observé que l'activité des enzymes du sol dépend de la croissance microbienne et la disponibilité des ressources et des nutriments (Sinsabaugh & Moorhead, 1994).

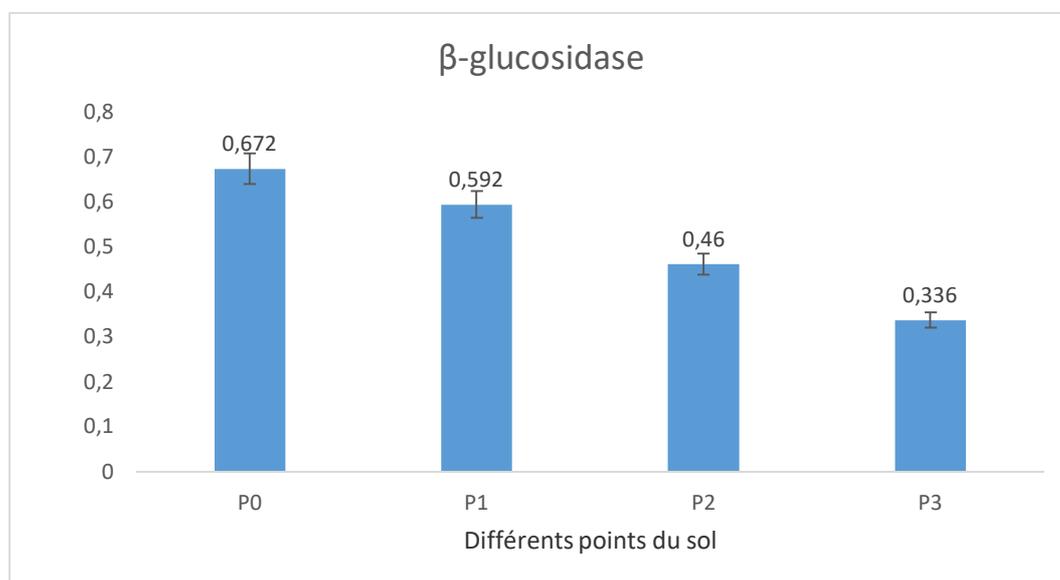


Figure 39. Représentation graphique de la variabilité spatiale de l'activité enzymatique de la β-glucosidase dans les différents points du sol étudié

Selon Yan *et al.*, (2010), la teneur en carbone d'un sol est significativement corrélée à l'activité enzymatique β-glucosidase, puisque l'enzyme joue un rôle dans la décomposition de la cellulose et est produite par des bactéries et des champignons. En accord avec d'autres travaux, des corrélations positives ont été observées entre la teneur en matière organique et les activités de β-glucosidase, la phosphatase acide, la phosphatase alcaline, et l'uréase (Dick *et al.*, 1988 ; Eivazi et Tabatabai, 1988; Santrucková *et al.*, 2004 ; Turner *et al.*, 2002 *in* Avellaneda-Torres *et al.*, 2013).

Wang *et al.*, (2013) ont également indiqué que les activités enzymatiques du sol étaient significativement liés au fractions du carbone organique du sol et au $C_{\text{microbien}}$. Cependant, il y a encore une certaine confusion sur les facteurs de conduite des activités enzymatiques du sol. L'activité enzymatique mesurée est corrélée aux biomasses microbiennes carbonée et azotée ce qui semble logique puisque ces activités sont d'origine microbienne (Sinsabaugh *et al.*, 2002).

L'activité enzymatique reflète la biomasse microbienne seulement métaboliquement active tandis que le nombre de microorganismes reflètent à la fois la population active et inactive de micro-organismes (Roget et Garcia, 2001).

En effet, les oxydoréductases (par exemple la β -glucosidase) agissent sur le processus de base de la décomposition de la matière organique du sol, ce qui leur confère une forte relation avec la quantité et la qualité de celle-ci. Particulièrement, la β -glucosidase est une enzyme intracellulaire qui est impliquée dans le métabolisme oxydoréductase des micro-organismes. Étant donné qu'elle agit uniquement dans les cellules vivantes, son activité dépend de l'état métabolique de la biomasse microbienne du sol (Mbonigaba Muhinda et al., 2009).

X.1.3.4. Conclusion

Au terme de cette phase, nous avons constaté qu'il existe une des dissimilitudes en ce qui concerne les caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques entre deux pieds de palmiers dattiers. Ainsi, Les résultats obtenus à partir des analyses physico-chimiques des 04 point du sol de la couche superficielle (0-30cm) montrent que ce sol se caractérise par une texture sablo-limoneuse, un pH alcalin, une conductivité électrique variant de 5.93 pour le P₀ à 7.25 dS/cm³ pour le P₃. Le taux de la matière organique est de l'ordre de 1.72%, 1.03%, 0.68% et 0.51%, une faible richesse en azote de l'ordre de 0.8%, 0.4%, 0.07% et 0.07% pour les points P₀, P₁, P₂ et P₃ respectivement, et un rapport C/N faible.

Nous avons constaté, également, que des facteurs biotiques comme la quantité de la matière organique, mais également des facteurs abiotiques comme le taux d'humidité des sols influencent la quantité et l'activité des micro-organismes du sol. Les résultats du dénombrement des différents groupes microbiens montrent une variation de la biomasse microbienne en fonction des caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés. Ces résultats révèlent que les bactéries sont les plus nombreuses, suivies par les champignons, avec une diminution des densités bactériennes et fongiques en allant du P₀ au P₃. Cette variabilité est également justifiée par l'effet rhizosphérique et les résidus de récoltes (dattes,...) mis à la disposition des microorganismes. En ce qui concerne le C_{microbien} et N_{microbien}, nous avons enregistré les valeurs suivantes : 234,21 mg de C. Kg⁻¹ s.s. à 78,15 mg de C. Kg⁻¹ s.s. pour le C_{microbien} et 24,44 mg de N. Kg⁻¹ s.s. à 3.87 mg de N. Kg⁻¹ s.s. pour le N_{microbien}. Pour ce qui est de l'activité enzymatique, les valeurs obtenues pour l'activité de la β -glucosidase sont comprises entre 0,672 et 0,363 μ g de glucose.g⁻¹ s.s. L'amplitude des réactions obtenues pour ce paramètre suit la teneur en matière organique.

Enfin, d'une manière générale, la biomasse et l'activité microbienne au niveau des 04 points du sol diminue proportionnellement lorsqu'on s'éloigne de la zone rhizosphérique du palmier dattier.

X.2. Effet des variations saisonnières sur la densité microbienne des sols oasiens

X.2.1. Introduction

La réponse de la biomasse microbienne aux variations saisonnières est importante pour comprendre le renouvellement microbien, qui affecte à son tour la disponibilité des nutriments et la nutrition des plantes (Liu et *al.*, 2014). Les variations saisonnières de température et d'humidité du sol contrôlent directement les fluctuations temporelles de la biomasse et l'activité microbienne dans les écosystèmes (Bell et *al.*, 2008). De nombreuses études ont montré que la biomasse microbienne du sol est élevée au printemps et à l'automne, mais faible en été et en hiver (Luizao et *al.*, 1992 ; Sarathchandra et *al.*, 1984).

X.2.2. Caractéristiques abiotiques

Les Caractéristiques physico-chimiques de la couche superficielle (0-30cm) du sol étudié prélevé en automne et en hiver sont reportées dans le tableau 32.

Tableau 32. Caractéristiques physico-chimiques de la couche superficielle (0-30cm) du sol prélevé dans les deux saisons

Caractéristiques physico-chimiques		Saison	
		Automne	Hiver
Classe texturale		SL	SL
Humidité du sol (%)		9.7	12.4
Calcaire Total (%)		04.75	4.37
CE à 25°C (dS/m) 1/5		3.91	3.8
pH _{eau} (1/5)		7.9	8.1
Caractéristiques biochimiques	C _{organique} (%)	0.43	0.52
	N _{total} (%)	0.07	0.065
	MO (%)	0.73	0.89
	C/N	6.14	8

L'analyse granulométrique montre que ce sol est de texture limono-sableuse (tableau 32). L'humidité du sol est relativement élevée en hiver (12,4) par rapport à l'automne (9,7).

Cela est dû à une faible évaporation des quantités d'eau du fait des faibles températures enregistrées en hiver (12,01 ° C) par rapport à l'automne (25,9 ° C). Le pH du sol est modérément alcalin (7,9 et 8,1 en automne et en hiver, respectivement). En outre, la conductivité électrique du sol est de 3,91 dS / m en automne et 3,80 dS /m en hiver. Cette salinité élevée est expliquée par la forte évaporation due à des températures élevées et de faibles précipitations qui caractérisent le climat des régions arides. En outre, les vents fréquents accentuent la sécheresse du sol. Ceci est d'autant plus important lorsque le couvert végétal est faible. Les eaux d'irrigation chargées en sels ainsi que la remontée des eaux de la nappe phréatique par capillarité amplifient la teneur en sels dans le sol.

La teneur en carbone est inférieure à l'automne (0,43%) par rapport à celle enregistrée en hiver (0,52%). Ce taux est inférieur à 1%; selon Duchaufour (1984), le sol est pauvre en matière organique. La faible teneur en azote des échantillons est particulièrement nette ; elle est de 0,07% et 0,065% en automne et en hiver respectivement. Le rapport C / N, qui nous renseigne sur l'activité biologique, est d'environ 6,14 à l'automne et 8 en hiver. Il est inférieur à 10. Cela reflète la faiblesse des deux éléments "biogènes" les plus importants et une tendance à une minéralisation intense des quantités réduites d'azote, ce qui n'est guère en faveur d'une humification poussée (Bessedik et *al.*, 2000).

X.2.3. Caractéristiques biotiques

La variabilité de la densité microbienne au cours du temps montre que le nombre de micro-organismes est légèrement supérieur en automne (tableau 33).

Tableau 33. Densité des principaux groupes microbiens du sol prélevé dans les deux saisons exprimée en (UFC g⁻¹ s.s.)

Groupes microbiens	Saison	
	Automne	Hiver
Bactéries ($\times 10^6$)	11.6 \pm 1.8	8 \pm 2.97
Champignons ($\times 10^4$)	23.9 \pm 2.15	6.5 \pm 1.3
Actinomycètes ($\times 10^4$)	8 \pm 2	6.3 \pm 0.4
Algues ($\times 10^2$)	0.7 \pm 0.3	0.3 \pm 0.1

Cette variabilité est liée à l'augmentation des amendements organiques suite à la préparation des terres pour la mise en culture en période automnale, ainsi qu'à la chute des feuilles et les résidus de cultures suite à la mort des plantes annuelles. En effet, La croissance des germes est liée à des restrictions très sévères (en particulier la pauvreté en aliments) (Arpin et al., 1980). En effet, la qualité et la quantité des fractions de la matière organique labile du sol (enzymes du sol, biomasse microbienne, hydrates de carbone du sol) montrent des variations saisonnières et leur statut peuvent être considérés comme un indicateur de la qualité de la matière organique du sol (Murata et al., 1999).

X.2.3.1. Densité bactérienne

Les résultats du dénombrement microbien montrent que la densité des bactéries est de $11,6 \times 10^6$ UFC g^{-1} s.s. et 8×10^6 UFC g^{-1} s.s. en automne et en hiver respectivement. Cette observation montre qu'il existe une légère variation de la biomasse bactérienne entre les deux saisons. Ainsi l'analyse de la variance montre l'absence d'une différence significative dans les valeurs rapportées à l'automne par rapport à ceux en hiver ($F = 0,68$, $P = 0,47$). Cela correspond à une réduction de 14,65% de la biomasse bactérienne en hiver que l'automne (Fig. 40).

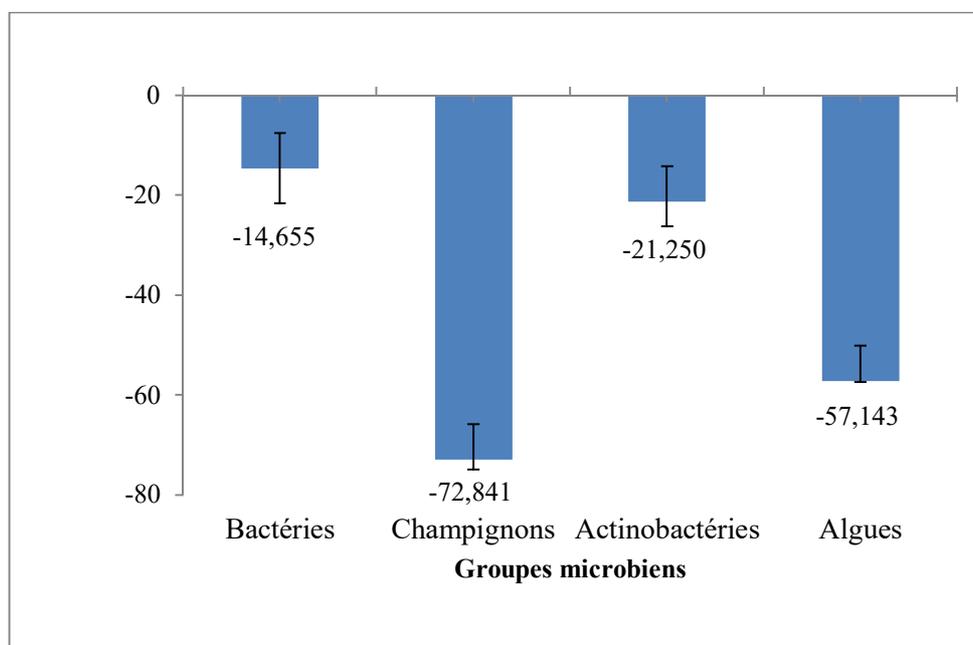


Figure 40. Représentation graphique de la régression de la densité des différents groupes microbiens en hiver par rapport à l'automne

Selon Bouchenafa et *al.* (2014), la flore bactérienne ne présente pas de variations saisonnières significatives. Cela peut s'expliquer par les températures hivernales basses qui n'ont pas un grand effet sur l'évolution de ces germes. En période automnale, leur taux présente une croissance moyenne où les températures sont plus clémentes au développement des microorganismes.

La variation de la température en automne (28 ° C, la température moyenne par jour) pour l'hiver (17 ° C de la température moyenne du jour) diminue probablement la densité de la biomasse bactérienne. Selon Alexander (1982), la majorité des espèces bactériennes sont mésophiles (la température se situe entre 25 et 35°C). Le rapport C / N, légèrement inférieur à l'automne qu'en hiver (6,14 et 8, respectivement), reflète une bonne minéralisation de la matière organique et donc une bonne activité microbienne.

Cependant, Bauzon et *al.* (1974) ont, constaté pour les numérations bactériennes, une grande variation saisonnière. Leurs résultats ont été confirmés par Kilbertus et Proth (1978). En effet, en utilisant un microscope électronique à transmission, ces auteurs ont mis en évidence des variations saisonnières au sein des populations microbiennes. Les parois et les nucléotides ne sont que peu visibles durant la période hivernale ; les réserves intracellulaires deviennent très importantes en janvier et peuvent occuper jusqu'aux 2/3 de la cellule. Elles disparaissent totalement en mai et sont rares de septembre à novembre. Le mucilage englobant les colonies bactériennes est progressivement lysé ou modifié au cours du printemps. Il correspond peut-être à une source trophique permettant le redémarrage de la microflore à cette époque. Les Bactéries isolées en janvier, représentent environ 30% de la population en mai et de 5 à 10% en septembre et novembre.

Cette distribution est essentiellement conditionnée par les facteurs édaphiques et les sources trophiques (Arpin et *al.*, 1980).

La présence de formes bactériennes sphériques ou subsphériques doit être abordée (Fig. 41). Au cours de l'observation en microscopie optique de différents échantillons du sol nous avons pu constater que la plupart des germes possédaient cette forme. Selon Kilbertus et Kiffer (1977), Proth (1978) qui ont observé les mêmes formes bactériennes, ces résultats sont certainement en relation avec le caractère pléomorphique de nombreux procaryotes. Cette hypothèse est confirmée par les travaux de Goodfellow (1969) qui a trouvé dans le sol d'une

pinède, des quantités très importantes de *cocci* libérant des pigments jaunes insolubles dans l'eau. Cependant, dans ces numérations, les vraies *cocci* ne correspondaient qu'à un pourcentage égal ou inférieur à 11%. Holding *et al.* (1965) et Proth (1978) ont prouvé que les vrais *cocci* ne sont rencontrés qu'exceptionnellement et ne représentent qu'une fraction insignifiante de la microflore tellurique.

Nous avons constaté également l'absence des *Micrococcus* dans nos échantillons du sol. Selon Proth (1978), la présence des *Micrococcus* semble épisodique, car il ne les a retrouvés en abondance qu'en septembre. Ce ne sont donc apparemment que les *Arthrobacter* qui doivent être considérés comme des formes caractéristiques ou indigènes des sols (Mulder et Antheniss, 1963 ; Jensen et Felumb, 1962 ; Casida, 1965; Kilbertus, Vannier et Verdier, 1976 *in* Arpin *et al.*, 1980).

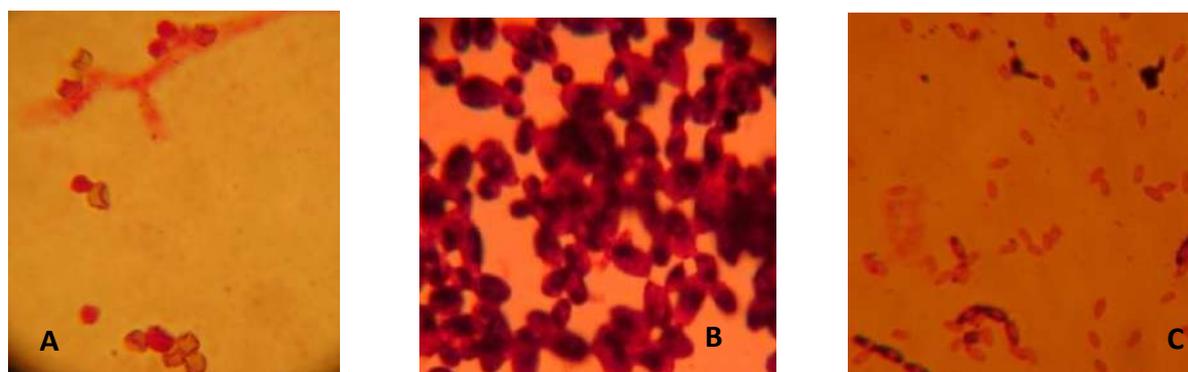


Figure 41. Microphotographies observées au microscope optique présentant les différents groupements microbiens d'une culture microbienne sur milieu solide (gélose à l'extrait de terre) inoculée par des dilutions provenant des sols échantillonnés (Gross x10 x 400)

- A. Bactéries, isolées, en amas
- B. Staphylocoques en grappe, diplocoques
- C. Bactéries en chaîne, diplocoques, coques

X.2.3. 2. Densité fongique

Une différence très hautement significative a été constatée entre la biomasse fongique enregistrée au cours de l'automne par rapport à celle enregistrée au cours de l'hiver ($F = 144,42$; $P = 0,0001$). Les valeurs de la biomasse fongique enregistrées sont de $6,5 \times 10^4$ UFC g^{-1} s.s. et $23,9 \times 10^4$ UFC g^{-1} s.s. en hiver et en automne respectivement. Cela correspond à une réduction de la biomasse fongique de 72,81% en hiver par rapport à l'automne. Cette diminution n'est pas attribuée au facteur température car l'intervalle de développement des champignons est situé dans la gamme 10 à 40°C (Sablonnier, 2002). Ces constatations sont en concordance avec

celles de Oulbachir (2010), qui a remarqué une variation saisonnière drastique des champignons en hiver par rapport au printemps et en été. En effet, les conditions climatiques et saisonnières ont une influence prépondérante sur la biomasse fongique. Le maximum est enregistré au printemps à distance d'une période de froid ou à l'automne à distance d'une période de sécheresse (Legras, SD).

Il est également constaté que la densité des champignons est plus faible que les bactéries pendant les deux saisons. Cette diminution peut être expliquée par la performance des champignons pour des conditions acides. En effet, basé sur la technique de PLFA (Phospho Lipid Fatty acid), l'étude de Hogberg et *al.*, (2007) le long d'un gradient de pH a mis en évidence une corrélation entre le pH et la biomasse microbienne, positive chez les bactéries, et négative chez les champignons.

Pour ce qui est des formes de colonies de la microflore fongique observé dans nos échantillons, nous avons pu observer des espèces du genre *Alternaria*, *Penicillium*, *Aspergillus* (Fig. 42). Selon certains auteurs on rencontre essentiellement ce dernier dans les sols alcalins ce qui est notre cas (Taber, 1951 ; Thornton, 1960 ; Baht, 1970 *in* Arpin et *al.*, 1980).

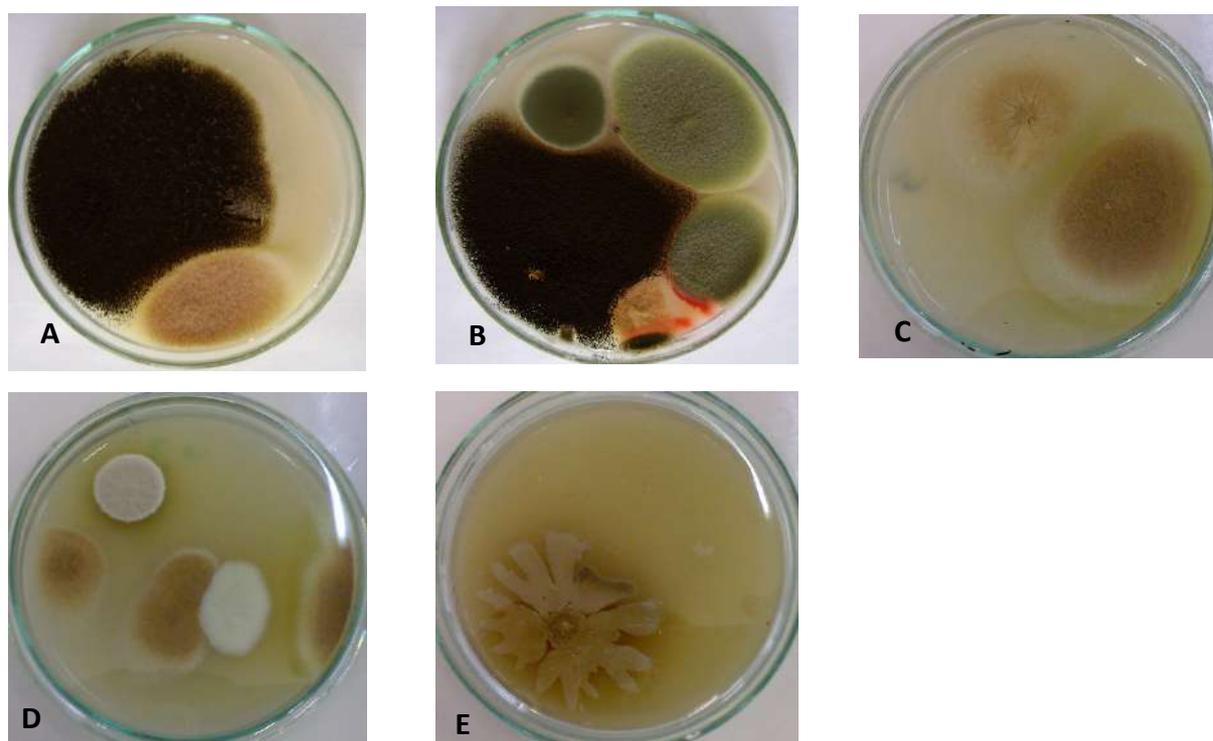


Figure 42. Les différentes formes de colonies de la microflore fongique, développées sur milieu solide PDA

- A et B. Colonies d'*Alternaria*
- C. *Penicillium*
- D. *Aspergillus*
- E. Levure

X.2.3.3. Densité des actinobactéries

L'énumération des actinobactéries a montré qu'ils sont relativement faibles au cours des deux saisons. Nous avons enregistré 80×10^3 UFC.g⁻¹.s.s. et 63×10^3 UFC.g⁻¹.s.s. en automne et en hiver respectivement ce qui correspond à une diminution de 21,25% en hiver par rapport à l'automne. Ainsi l'analyse de la variance n'a montré aucune différence significative ($F = 2,07$; $P = 0,224$). Cette faible régression est due à une diminution de température. En effet, les actinobactéries ont une croissance optimale qui se situe entre 28 et 37 ° C (Alexander, 1982), tandis nous avons enregistré une température de 17 °C en hiver. Cela montre que les actinobactéries ont une grande capacité d'adaptation aux variations climatiques. Les sols des oasis algériennes, bien que soumis à un climat aride, sont relativement riches en actinobactéries (Sabaou et *al.*, 1998; Saker et *al.*, 2014). Selon Dommergues et Mangenot (1979), la sobriété des actinobactéries explique une grande extension, la prolifération relative de ces organismes est liée à leur résistance aux conditions arides et leur capacité à dégrader les substances organiques difficilement dégradables. Selon Ben Soltane et *al.* (1999), la faible densité des actinobactéries par rapport aux bactéries est due à leurs temps de régénération long.

X.2.3.4. Densité Algale

Pour ce qui est de la microflore algale cultivée sur milieu liquide, des faibles densités ont été enregistré en automne qu'en hiver ($0,7 \times 10^2$ UFC g⁻¹ s.s. et $0,3 \times 10^2$ UFC g⁻¹ s.s. respectivement). Ces résultats sont en concordance parfaite avec ceux de Dommergues et Mangenot (1970), où ils ont noté que les algues sont moins fréquentes que les bactéries et les champignons dans la plupart des sols. Les algues se rencontrent seulement à des faibles profondeurs de sol car ils sont adaptés aux sols humides superficiels et non à des sols arides secs ou à des profondeurs importantes. Ainsi, nous avons constaté une diminution de 57,15% en hiver par rapport à l'automne ; ceci est dû une diminution de température qui caractérise la saison hivernale. Une analyse de variance a montré que la différence entre les deux saisons est non significative ($F = 4,8$; $P = 0,094$).

X.2.4. Discussion

L'humidité du sol est étroitement liée à la température. Il est difficile d'isoler l'influence de chacune de ces variables sur les communautés microbiennes (Gunapala et Scow, 1998). L'effet de la température sur les communautés microbiennes du sol est fortement modifié par

l'humidité du sol. L'eau est nécessaire pour pratiquement toutes les réactions métaboliques des organismes vivants (Klimek, 2013). Dans les pays où les saisons contrastées, les maxima d'activité sont au printemps et à l'automne (humidité et température favorable) (Morel, 1996). La diminution de la densité des différents groupes microbiens en hiver peut être due à des changements dans les conditions environnementales, en particulier la température (température moyenne en hiver est 12,01° C) qui n'est pas propice à une activité microbienne significative. Les variations saisonnières de température et d'humidité du sol contrôlent directement les fluctuations temporelles de la biomasse et l'activité microbienne dans certains écosystèmes (Corre et al., 2002, Bell et al., 2008). La température en automne (25,9 ° C) accompagnée d'une humidité adéquate résultant de l'irrigation, favorise l'activité microbienne dans le sol, en particulier la biodégradation de la matière organique. La température optimale pour l'activité microbienne du sol est d'environ 25 °C - 35 °C (Li et al., 2014).

Aux faibles températures, de l'ordre de 5°C, se manifeste une nette tendance à l'accumulation d'azote ammoniacal car la microflore nitrifiante, relativement plus exigeante sur le plan thermique, est presque à l'état de repos. Les températures basses, inférieures à 0°C, exercent une action létale sur certaines espèces de la microflore du sol ; mais cette action est beaucoup moins marquée que celle de la dessiccation (Dommergues, 1977 ; Alexander, 1982).

X.2.5. Conclusion

Les résultats obtenus au cours de cette phase de recherche montrent que pendant la période automnale, la densité microbienne est élevée traduisant les conditions favorables de croissance du fait que les températures automnale stimulent la prolifération des microorganismes. Par suite, une diminution drastique du taux microbien qui atteint son minimum en période hivernale c'est la stérilisation partielle par le froid. On s'aperçoit que les groupes microbiens évoluent différemment selon les conditions auxquelles ils sont liés. Les conditions climatiques et édaphiques ont fortement influencé la densité des différents groupes microbiens. Les bactéries sont les organismes les plus abondants suivis par des champignons, des actinomycètes et des algues. Cependant, le groupe microbien le plus touché par les variations saisonnières est celui des champignons, suivi par les algues, ensuite les bactéries et les actinomycètes, qui semblent bien s'adapter aux variations climatiques.

Chapitre XI. Mise en évidence du phénomène de sulfato-réduction dans les sols oasiens

XI.I. Introduction

Comme beaucoup de pays, certaines zones humides algériennes sont menacées par plusieurs facteurs, dont le plus important est l'utilisation des zones humides comme une décharge publique et lieux de rejets des eaux usées, décharge de matériaux ferreux, débris, gravats et ordures (Zaafour, 2012).

Les zones humides en Algérie sont composées de lacs, de marais, de cours d'eau, de barrages, de chotts, de sebkha et de gueltas. La région de Ouargla comprend plusieurs zones humides tel que chott Ain El Beïda, situé au cœur des palmerais de la cuvette. Il est à rappeler que le chott de Ain El Beïda est classé zone humide par la convention de Ramsar

La sulfato-réduction est un processus mixte qui affecte certains sols caractérisés à la fois par une salinité plus ou moins élevés et par un cycle particulier de soufre. Les sols salés apparaissent comme particulièrement favorables aux développements des processus de réduction des sulfates dans les sols des zones humides. La réduction de soufre est souvent localisée à un horizon du profil dont l'épaisseur est faible (quelque cm) et nécessite le concours des 4 facteurs suivants : anaérobiose, présence d'ions SO_4 , présence de la matière organique et présence des bactéries très souvent anaérobies stricts dites Sulfato-réductrices ou BSR (Dommergues, 1973).

Les micro-organismes (bactéries, champignons, ...), qui peuvent représenter jusqu'à 90% en masse des organismes vivants dans le sol, sont impliqués dans la plupart des fonctions clé du sol (Citeau et *al.*, 2008), tels que les bactéries sulfato-réductrices qui sont présentes dans presque tous les biotopes.

Depuis les travaux de Widdel et Pfennig (1977), les bactéries sulfato-réductrices n'apparaissent plus comme un groupe extrêmement spécialisé, mais au contraire comme un groupe pouvant métaboliser un grand nombre de substrats organiques et réduire d'autres composés que les sulfates (Chatelus, 1987).

C'est dans ce contexte que s'inscrit cette phase de travail. Il s'agit de mettre en évidence le phénomène de sulfato-réduction dans un sol oasien bordant un chott entouré de palmeraies.

XI.2. Caractéristiques abiotiques

Les caractéristiques physico-chimiques des trois échantillons de sols sont reportées dans le tableau 34.

Tableau 34. Résultats des analyses physico-chimiques des différents sols hydromorphes étudiés

Paramètres		C1	C2	R
		(0-5cm)	(5-15cm)	
Classe texturale		SL	SL	SL
Humidité du sol (%)		48.67	22.71	15.51
Calcaire total (%)		4.63	5.11	5.82
CE à 25° (dS/m) 1/5		19.51	18.02	20.57
pH (1/5)		8.3	7.4	6.5
Caractéristiques biochimiques	C.org(%)	1.4	1.3	1.23
	N(%)	0.29	0.13	0.21
	MO(%)	2.40	2.23	2.11
	C/N	4.82	10	5.85
Gypse (%)		33	28	16
Demande biologique en oxygène pendant 5 jours (DBO₅)		40	20	-
Demande chimique en oxygène (DCO)		340.8	148,8	225,6

L'analyse granulométrique nous conduit à classer nos sols parmi les sols sablo-limoneux selon le diagramme textural américain. La texture sableuse favorise le lessivage des éléments nutritifs par les irrigations abondantes surtout en présence de teneurs faibles en argiles et en matière organique.

L'humidité du sol est importante et varie entre les 03 échantillons du sol. Le minimum est enregistré pour le sol rhizosphérique (R) avec un taux de 15,51% et le maximum est de

48,67% enregistré pour le sol de surface (C1). Le taux d'humidité élevé dans les sols étudiés est expliqué par l'engorgement en eau du sol par les eaux du chott utilisé comme exutoire des eaux de drainage des palmeraies qui entourent la zone

La conductivité électrique est très élevée. Elle est de l'ordre de 18.02 dS/m, 19.51 dS/m et 20.57 dS/m pour le sol C2, le sol C1 et le sol R respectivement. Selon l'échelle d'Aubert (1978) les sols sont considérés comme extrêmement salés.

A cet effet, plusieurs travaux tels que Benhamida et Djeghbala(2005) et Kraïmat et Nessil (2006), ont démontré qu'au niveau du chott l'augmentation d'humidité relative est suivie par une augmentation remarquable de conductivité électrique. En effet, l'augmentation de l'humidité est causée principalement par la stagnation des eaux en surface surtout celles de la nappe phréatique, du drainage des palmeraies et les eaux usées, ainsi que les quantités des pluies enregistrées malgré sa faible influence comparativement aux autres sources. Aussi, après une période chaude où la température est très élevée et les évaporations sont considérables, ces eaux entraînent l'augmentation de la salinité puisqu'elles sont très chargées en sels solubles et en matières organiques.

Dans le même contexte, Sais et Zeghidi (2006), ont conclu que le taux d'humidité est élevé dans les stations du fond de la cuvette (tel que la zone humide du chott de Ain El Beïda) à cause de la remontée capillaire des eaux phréatiques. Selon Halitim (1988), les sols fortement salins sont localisés dans les chotts. La salinisation du sol se produit lorsque les conditions sont réunies : présence de sels solubles dans le sol, nappe phréatique élevée chargée en sel, niveau d'évaporation élevé. Il est influencé par la topographie et les facteurs hydrogéologiques (drainage du sol) (Eilers et *al.*, 1995). D'ailleurs Lemee (1978), montre que la montée de l'eau par capillarité à partir de la surface d'une nappe dépend de la texture du sol. Toutefois, Labdi et *al.* (2001) admet que l'évapotranspiration élevée dans les zones arides et semi arides contribue à l'aggravation du problème de la salinité par l'augmentation de la concentration des sels dans le sol. La baisse de la perméabilité du sol est une conséquence directe de la salinité (Haddana, 2008).

Le pH du sol varie entre 6.5 et 8.5 pour l'ensemble des trois types de sol étudié. Il est classé comme neutre à légèrement alcalin selon l'échelle de Soltner (1989). Sous l'effet de la submersion, l'augmentation du pH a déjà été signalée dans les sols de rizières sénégalaises et françaises (Barbier et *al.*, 1986 ; Loyer et *al.*, 1988, Loyer et *al.*, 1982 ; Prade et *al.*, 1978 ; Prade

et al, 1990 in Boudoudou et al, 2009). Cette augmentation apparaissant dès la mise en eau est probablement à mettre en relation avec les processus microorganiques réducteurs et consommateurs de protons, en particulier l'activité sulfato-réductrice (Ponnamperuma, 1972).

Des observations en champ (Jacq, 1989) ont confirmé que les sols des zones à sulfato-réduction active ont un pH supérieur de 0,4 à 0,6 unités par rapport aux mêmes sols exempts de cette activité. La valeur du pH la plus faible (6.5) est enregistrée pour le sol rhizosphérique (R) ce qui peut être expliqué par la sécrétion des exsudats racinaires acides.

Le taux de calcaire total varie selon les différents types de sol de 4.63% à 5.82%. Selon Baise (2000), le C1 est un sol peu calcaire ($1 < \text{CaCO}_3 \leq 5$) tandis que le C2 et le R sont des sols modérément calcaires ($5 < \text{CaCO}_3 \leq 25$).

D'après nos résultats la valeur minimale de gypses est de 16%, et la valeur maximale enregistrée est de 33%. Selon Halitim (2006), nous considérons qu'un sol est gypseux à partir d'un taux de gypse de 5% à 10%. Selon Pouget (1968), l'origine du gypse en quantité importante dans les sols est en relation avec :

- la présence des roches sédimentaires gypseuses. Le gypse est dissous, transporté à l'état de solution dans les nappes et dans les couvertures pédologiques ; il peut être repris sous forme solide et transporté par le vent.

- les apports éoliens.

- la présence des eaux souterraines et superficielles chargées en Ca^{+2} et SO_4^{-2} .

Les sulfates des eaux présentent une corrélation positive et significative avec les sulfates de la solution du sol et la teneur en gypse. Cette relation nous permet de dire que l'origine du gypse dans le sol est la précipitation des sulfates en excès dans l'eau et la solution du sol.

Les zones arides et semi-arides se caractérisent au niveau pédologique par la présence des accumulations de sels (gypse, calcite, sels solubles...), qui présentent des morphologies très variables (Halitim, 1988). Le gypse et les sels solubles peuvent s'accumuler dans le sol quand l'évapotranspiration devient supérieure aux précipitations. Ils s'accumulent sous plusieurs grands types qui peuvent être distinguées selon leurs origines et ont chacun une signification climatique spécifique (Fedoroff et Courty, 1989).

En ce qui concerne les caractéristiques biochimiques, ces sols sont moyennement riches en matière organique. Ainsi nous avons enregistré des valeurs de l'ordre de 2.40%, 2.23% et 2.11% pour le C1, le C2 et le R respectivement. L'enrichissement en matière organique peut être attribué à la décomposition des résidus de récolte et des mauvaises herbes éventuelles. La richesse en composants organiques favorise la sulfato-réduction (Prade et *al.*, 1990) et entrave la formation de complexes non solubles et potentiellement toxiques (Hamdaoui, 1996 *in* Boudoudou, 2009), composés toxiques qui empêchent la prolifération des espèces pathogènes elles-mêmes en concurrence avec d'autres microorganismes saprophytes.

Le taux du rapport C/N qui nous renseigne sur l'activité biologique est de 4,85, 5,82 et 10 pour le C1, le R et le C2 respectivement. Ces taux sont $\leq 10,0$. Ceci traduit une minéralisation intense au niveau de ces sols.

La DCO correspond effectivement à la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder, dans des conditions opératoires définies, les matières organiques présentes dans un échantillon donné. C'est un paramètre qui donne une indication sur les quantités de substances chimiquement oxydables présentes dans l'eau. La valeur de la DCO est une indication importante, avec laquelle on peut caractériser la pollution globale d'une eau ou des eaux usées par des composés organiques. C'est un des paramètres d'évaluation utilisés pour estimer les taxes de pollution que doivent payer les entreprises (Koull, 2015).

D'après nos résultats les valeurs de DCO sont de l'ordre de 340,8 et 148,8 et de 225,6 pour le C1, le C2 et le R respectivement ce qui montre selon l'échelle de Bliefert et Perraud (2001), que les sols de la zone d'étude sont des sols engorgés par des eaux usées non épurées. Ces valeurs indiquent que les eaux de ces chotts sont très chargées en matières organiques liées aux dépôts des eaux usées. Ces chotts sont utilisés comme exutoires des eaux usées et de drainage et les fèces des oiseaux migrateurs. Les eaux sont de très mauvaise qualité (Koull, 2015).

Les valeurs enregistrées pour la DBO₅ pour l'extrait dilué du sol C1 montre que ce dernier est classé parmi les eaux communales après traitement biologique par contre l'extrait de sol C2 est classé parmi les cours d'eaux courantes modérément pollués selon l'échelle de Bliefert Et Perraud (2001) des eaux usée.

XI.3. Caractéristiques biotiques

Le dénombrement microbien des bactéries, champignons et des BSR dans les échantillons des sols étudiés nous a donné les densités représentées dans le tableau 35.

Tableau 35. Densités microbiennes des différents sols hydromorphes étudiés

UFC g ⁻¹ s.s.	C1	C2	R
Bactéries ($\times 10^7$)	61.69 \pm 3.56	46.57 \pm 3.31	24.02 \pm 0.53
Champignons ($\times 10^3$)	14.6 \pm 0.672	13.43 \pm 0.21	23.27 \pm 1.355
BSR ($\times 10^4$)	29.1 \pm 0.871	13.86 \pm 0.91	3.54 \pm 0.325

UFC g⁻¹ s.s.: unité formant colonie par gramme de sol sec.

XI.3.1. Densité bactérienne

Le nombre de bactéries varie selon les échantillons du sol (Fig. 43). La densité bactérienne dans le C2 est de 46.57×10^7 UFC g⁻¹ s.s., et de 61.69×10^7 UFC g⁻¹ s.s. dans le C1 et de 24.02×10^7 UFC g⁻¹ s.s. dans le sol rhizosphérique (R). Ces résultats sont en rapport avec le taux de matière organique et le taux d'humidité.

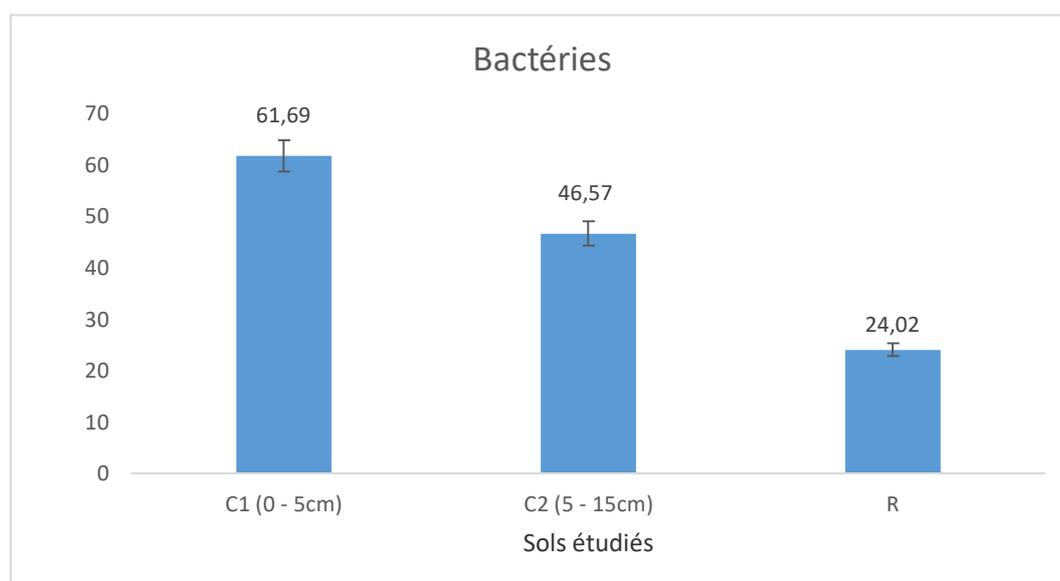


Figure 43. Représentation graphique de la densité bactérienne dans les sols hydromorphes étudiés.

L'analyse de la variance a montré des différences très hautement significatives entre les différents types de sol (Tableau 36).

Tableau 36. Analyse de la variance (Bactéries)

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
sols	2	2155,8987	1077,9493	135,0135	< 0,0001
Erreur	6	47,9041	7,9840		
Total corrigé	8	2203,8028			

Ainsi le test de Fisher a révélé 3 groupes homogènes A, B et C (Tableau 37).

Tableau 37. Test de Fisher (LSD) / Analyse des différences entre les modalités avec intervalle de confiance à 95% (Bactéries)

Modalité	Moyenne estimée	Groupes		
C1	61,6900	A		
C2	46,5533		B	
R	24,0200			C

En effet, selon Boulard et Moureaux (1962), le nombre et l'activité des microorganismes dépendent essentiellement de l'énergie qui peut être libéré à la suite de la décomposition de la matière organique.

Les bactéries prolifèrent mieux dans les milieux riches en azote (Bouchenafa et *al.*, 2014) c'est ce qu'explique la densité élevée des bactéries dans le C1 qui renferme un taux d'azote de l'ordre de 0.29%.

Les bactéries sont plus favorisées par des milieux proches de la neutralité (Boullard et Moureaux, 1962), et Le pH de notre sol varie entre 6.5 et 8.3 ceci explique la variation en nombre des bactéries.

Le taux de l'humidité des sols étudiés est très élevé à cause de l'engorgement de ce sol en eau et cela favorise la croissance des bactéries. Lorsque le taux d'humidité s'élève, l'activité microbienne augmente progressivement (Morel, 1989). Selon Alexander (1982), les bactéries sont plus sensibles au manque d'eau que les autres microorganismes, l'optimum de leur activité

se situe entre 50 à 75% de la capacité au champ, c'est pour cela que le taux le plus faible des bactéries est enregistré dans le sol R.

XI.3.2. Densité fongique

La densité de la microflore fongique (Fig. 44) varie d'un sol à l'autre. Ainsi nous avons enregistré 23.27×10^3 UFC g^{-1} s.s. dans le sol R, 14.6×10^3 UFC g^{-1} .s.s dans le sol C1 et 13.46×10^3 UFC g^{-1} s.s. dans le sol C2.

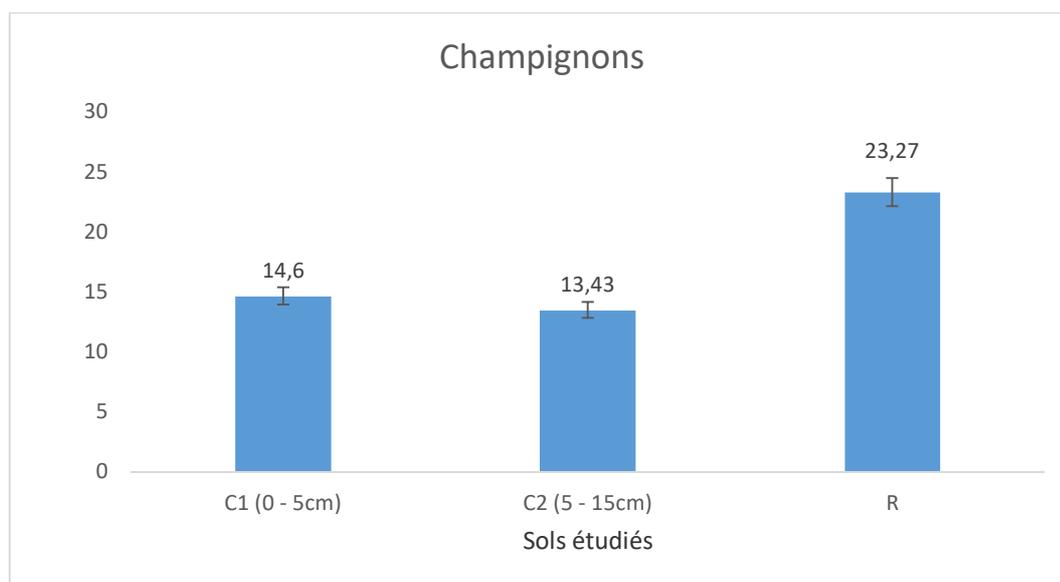


Figure 44. Représentation graphique de la densité fongique dans les sols hydromorphes étudiés

L'analyse de la variance fait ressortir des différences très hautement significatives entre les différents types de sols (Tableau 38).

Tableau 38. Analyse de la variance (Champignons)

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Sols	2	173,4868	86,7434	111,584 6	< 0,0001
Erreur	6	4,6643	0,7774		
Total corrigé	8	178,1511			

Le test de Fisher classe nos sols en deux groupes homogènes A et B (Tableau 39).

Tableau 39. Test de Fisher (LSD)/ Analyse des différences entre les modalités avec intervalle de confiance à 95% (Champignons)

Modalité	Moyenne estimée	Groupes	
C1	23,2733	A	
C2	14,6000		B
R	13,4300		B

Le sol rhizosphérique (R) à un pH sensiblement plus faible ce qui explique une densité fongique plus importante que les autres sols. En effet, les champignons s'accommodent de pH faible.

Nos résultats concernant la densité fongique sont proches à ceux enregistrés par Benslama et Zanache (2007) dans la station d'El-Khoubzi au niveau du complexe humide de la région d'El-Kala. Ainsi ces auteurs ont dénombré $35,3 \times 10^3$ UFC g.g.s⁻¹ de champignons dans la couche superficielle du sol (0 – 15cm).

D'après ces résultats, il est clair que la densité des champignons est moins importante que celle des bactéries dans l'ensemble des sols. En effet, la répartition et le nombre des champignons dans le sol sont affectés par nombreux facteurs du milieu.

Les champignons sont les seuls organismes sur la terre, à part quelques rares bactéries, à être capable de décomposer la lignine des plantes (la principale source d'humus dans le sol). Pour effectuer ce travail fondamental, les champignons ont besoin d'un sol aéré, car tous les champignons, sauf ceux très particuliers du rumen de bovins, ont besoins d'oxygène pour vivre, ce qui explique la diminution de leur nombre au fur et à mesure que le sol est moins aéré (Robert, 1996). C'est la raison pour laquelle la végétation des marais, qui se décompose en absence d'air au fond de l'eau, donne naissance à la tourbe et non à l'humus.

Les champignons sont plus sensibles à l'engorgement des sols que les bactéries. L'humidité du sol peut diminuer le nombre des champignons dans le sol en réduisant leur activité (Sasson, 1967).

Quant à la sensibilité vis-à-vis la salinité, les champignons sont les microorganismes les plus sensibles (Dommergues et Mangenot, 1970). Le taux de salinité diminue le nombre des champignons dans nos échantillons qui présentent une CE très élevée, particulièrement le sol C1 et le sol C2.

XI.3.3. Les bactéries sulfato – réductrices (BSR)

La densité des BSR varie d'un sol à un autre. Ainsi nous avons enregistré les valeurs représentées dans la figure 45 et déterminées selon la méthode du nombre le plus probable (NPP).

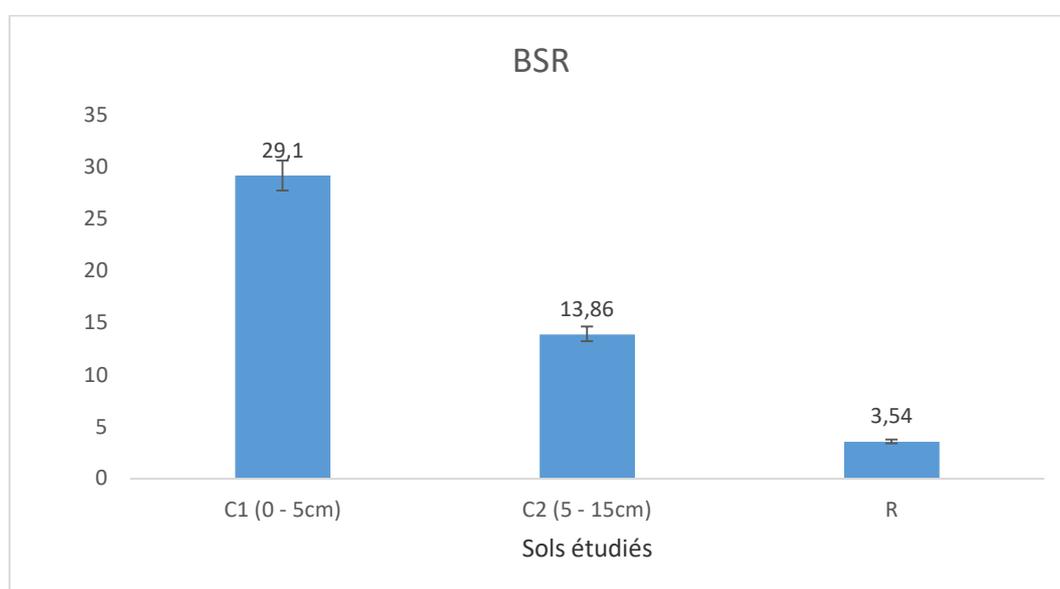


Figure 45. Représentation graphique de la densité des bactéries sulfato-réductrices dans les sols hydromorphes étudiés

L'analyse de la variance montre des différences très hautement significatives entre les différents types de sol (Tableau 40).

Tableau 40. Analyse de la variance (BSR)

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
sols	2	991,8344	495,9172	878,230	< 0,0001
Erreur	6	3,3881	0,5647		
Total corrigé	8	995,2225			

Le test de Fisher classe nos sols en 3 groupes homogènes A, B et C (tableau 41).

Tableau 41. Test de Fisher (LSD)/ Analyse des différences entre les modalités avec intervalle de confiance à 95% (BSR)

Modalité	Moyenne estimée	Groupes		
C1	29,1000	A		
C2	13,8600		B	
R	3,5433			C

La plupart des sols donnent des résultats positifs à 30 et 55°C (Butlin et *al.*, 1948). Ce qui correspond à nos résultats obtenu après incubation pendant 14 jours sous une température de 35°C, le premier noircissement apparaît après 7 jours et selon le taux de matière organique enregistrés dans le sol dilué la couleur se fonce pendant toute la période d'incubation.

D'après De Jesus et *al.*, (2015) ; Loubinoux (2001), le milieu de croissance classique pour les bactéries sulfato-réductrices (BSR) précipite sous forme de sulfure de fer, un précipité noir qui témoigne de la multiplication des BSR (Fig. 47). Ce noircissement apparaît à des valeurs de pH et de salinité élevés (Loubinoux, 2001), ce qui correspond à nos échantillons de sols. Toutefois, ceci semblait laisser croire que la sulfato-réduction est limitée à des sols à pH basique (7,7 à 8,0). Mais cette constatation n'est pas toujours valable, bien au contraire, dans les rizières la sulfato-réduction est plus intense dans les sols à pH très nettement acide (4,0 à 4,6) (Garcia et *al.*, 1974).

En effet, l'existence d'une zone réductrice noire située à quelques millimètres en dessous de l'interface eau-sédiment est très générale : cette couche a été décrite sous toutes les latitudes, elle se forme dans des sédiments de granulométrie variée (Roger et Garcia, 2001) L'accumulation de monosulfure ferreux (FeS), insoluble et de couleur noire, résulte de la combinaison de l'hydrogène sulfuré, provenant de l'activité sulfato-réductrice, avec le fer libre du sol. Elle a été décrite sous la forme d'un horizon réducteur fréquent dans certains sols salins d'Afrique du Nord et sous la forme de taches irrégulièrement réparties, au contact de débris de matière organique, dans certaines rizières, ou dans d'autres sols engorgés (Jacq, 1975).



Figure 46. Couleur noire indiquant croissance positive des BSR après incubation

En ce qui concerne l'effet de la salinité sur la densité des BSR, en zone méditerranéenne, il semble que les sols salés soient plus sensibles à la sulfato-réduction (exemple des sols alluviaux salins de Tunisie) ; en zone tropicale, la sulfato-réduction est aussi, en général, plus intense dans les rizières salées. Il est possible que la sulfato-réduction survienne plus facilement quand les plantes souffrent de la présence, à doses élevées, de chlorure de sodium, et davantage au stade (jeune plante) qu'au stade graine. Mais la sulfato-réduction survient aussi dans des sols totalement dépourvus de chlorures quand sont réunies les autres conditions favorables (Jacq, 1975).

De plus, certaines espèces d'eau douce sont inhibées par une forte concentration en NaCl. C'est le cas de *Desulfotomaculum acetoxidans* qui ne supporte pas des concentrations supérieures à 7 g.l⁻¹ (Widdel et Plennig, 1981 in Trolez, 1995), contrairement à de nombreuses souches d'origine marine qui supportent des concentrations de plus de 100 g.l⁻¹ (Widdel, 1988 in Trolez, 1995). De plus, certaines souches peuvent croître dans une large gamme de salinité. *Desulfovibrio desulfuricans* peut vivre en eau douce comme dans des milieux à 60 g.l⁻¹ de NaCl (Trolez, 1995).

L'intensité de la sulfato-réduction dépend de la concentration en sulfate et en matière organique dans le sol, des conditions d'oxydo-réduction (granulométrie, d'engorgement), et de l'exsudation racinaire (Roger et Garcia, 2001). En effet, la réduction des sulfates ou du soufre élémentaire en sulfures est particulièrement active dans les biotopes riches en matière organique, tels que le fond des mares, étangs, cours d'eau, dans les sédiments fluvio-marins, les zones d'estuaire. On estime qu'environ la moitié de la matière organique décomposée dans ces biotopes est oxydée anaérobiquement par sulfato-réduction, avec une forte production de sulfure (Roger et Garcia, 2001).

L'anaérobiose est toujours nécessaire au déclenchement du processus de sulfato-réduction. Dans les sols, elle est la conséquence de l'engorgement. L'engorgement des sols par l'eau est dangereux par la salinisation qu'il entraîne, mais en plus, il crée des conditions d'anaérobiose qui provoquent la réduction des oxydes ferriques, en faisant apparaître des tâches verdâtres de gley (Daddi Bouhoun, 2010). Le taux d'humidité des sols étudiés a une grande importance pour l'intensité de la sulfato-réduction. Rappelons que des études préliminaires (Jacq, 1970) ont montré que la sulfato-réduction ne survient que dans des sols engorgés et suffisamment riches en sulfates (Roger et Garcia, 2001).

Wind *et al.*, (1999), ont enregistré des valeurs proches à nos résultats dans des sols de rizières (19×10^5 UFC g^{-1} s.s. en sol nu, 11×10^4 UFC g^{-1} s.s. en sol cultivé et 5.4×10^3 UFC g^{-1} s.s. en sol rhizosphérique). Ces valeurs montrent que la densité des BSR en sol nu ou hors rhizosphère est plus importante que celle en sol rhizosphérique, ce qui est en concordance parfaite avec nos résultats.

La densité relativement faible des BSR enregistrée dans le sol rhizosphérique (3.54×10^4 UFC g^{-1} .s.s), est expliquée par le fait que l'hydrogène sulfuré (H_2S) détruit le pouvoir des racines de protéger la plante contre un excès d'assimilation du fer. La sulfato-réduction rhizosphérique résulte d'un déséquilibre du cycle du soufre qui se manifeste lorsque le rapport entre les populations de bactéries sulfato-réductrices et sulfo-oxydantes (thiobacilles aérobies) augmente. Il se produit alors une accumulation de sulfures toxiques pour la plante. Le seuil de toxicité décroît avec l'âge de la plante. Toutefois, certaines plantes peuvent relativement bien résister à la sulfato-réduction : celles dont la structure anatomique se prête à la diffusion de l'air de l'atmosphère à la rhizosphère.

Il existe dans la rhizosphère une compétition pour la nutrition en sulfate entre la plante et la microflore, responsable de certaines carences. Selon (Roger et Garcia, 2001), Les bactéries sulfato-réductrices trouvent dans la rhizosphère une niche écologique favorable en raison de la disponibilité de substrats organiques excrétés par la racine. L'analyse des exsudats montre que certains des acides organiques excrétés sont des substrats utilisables par des cultures pures de bactéries sulfato-réductrices.

Quant à l'effet de la texture, il faut signaler que des études antérieures ont enregistré des densités de BSR beaucoup plus importantes dans des sols à texture fines. En effet, de façon systématique, la sulfato-réduction est intense dans les sols riches en éléments fins, dans lesquels

l'anaérobiose est plus rapidement obtenue après la submersion. Cependant, on trouve paradoxalement des bactéries sulfato-réductrices dans les sols les plus aérés comme c'est le cas dans nos échantillons de sol de texture sablo-limoneuse. Il est vrai que la présence d'oxygène empêche leur croissance, mais les BSR survivent à une exposition à l'oxygène pendant 3 heures à plusieurs jours (Hansen, 1994 ; Le Gall et Xavier, 1996). Elles manifestent une tolérance à l'oxygène qui n'existe pas chez d'autres bactéries anaérobies strictes. Postgate (1984) avait constaté l'oxydation de composés organiques (lactate, pyruvate) en présence d'oxygène comme accepteur d'électrons. Il considérait déjà à l'époque le métabolisme des espèces de *Desulfovibrio* comme proche d'un métabolisme aérobie facultatif. En effet, les BSR assurent leur survie dans un environnement riche en oxygène grâce à une coexistence avec des organismes qui absorbent beaucoup d'oxygène ce qui recrée les conditions anaérobies nécessaires (Le Menn, 1982).

XI.3.4. $C_{\text{microbien}}$ et $N_{\text{microbien}}$

Les résultats obtenus pour le $C_{\text{microbien}}$ et le $N_{\text{microbien}}$, ont montré que ces valeurs ont diversement varié selon les différents sols (Fig. 47).

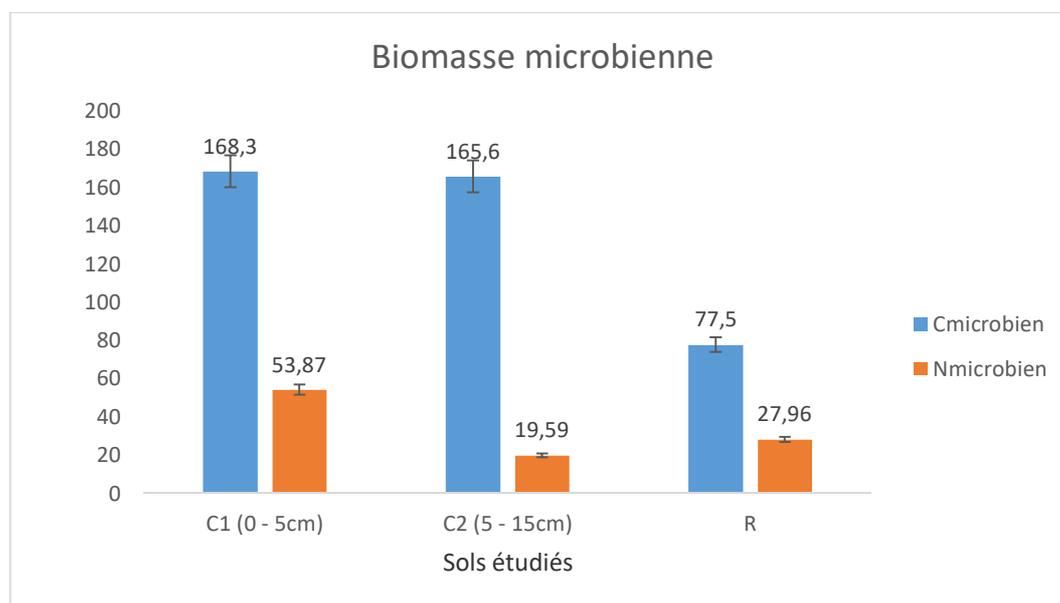


Figure 47. Représentation graphique du $C_{\text{microbien}}$ et du $N_{\text{microbien}}$ dans les sols hydromorphes étudiés

L'analyse de la variance a révélé des différences très hautement significatives entre les différents sols pour la variable $C_{\text{microbien}}$ ($F= 540,7$, $P < 0.0001$). Le faible taux du $C_{\text{microbien}}$

enregistré dans le sol rhizosphérique (R) est dû à la faible teneur en carbone organique (Ilstedt et al., 2005).

Quant à l'effet de l'humidité, Gunapala et Scow (1998) ; Geisseler et Horwath (2009) ont trouvé une corrélation positive et significative entre l'humidité du sol et de la taille de la biomasse microbienne dans différents sols. Cette constatation est en concordance parfaite avec nos résultats.

En ce qui concerne le $N_{\text{microbien}}$, il varie de 19.59 à 53.87 mg N.kg⁻¹ s.s. selon l'ordre sol C2 < sol R < sol C1. L'analyse de la variance a montré des différences très hautement significatives entre les différents sols pour ce variable (F = 409,6, P < 0.0001). Les valeurs obtenues pour $N_{\text{microbien}}$ montrent que l'immobilisation biologique est relativement faible dans sol C2 et le sol rhizosphérique (R). Il est connu que les micro-organismes peuvent se montrer compétitifs vis-à-vis des plantes pour ce qui est de l'azote assimilable dans le sol. Cependant le sol C1 à une valeur élevée par rapport aux autres sols. Ceci est certainement dû à la teneur élevée en azote total.

Rendement microbien

Les valeurs du rendement microbien obtenues dans la présente étude ont varié diversement selon les différents sols (tableau 42). Le sol C2 a eu un rendement microbien de l'ordre de 1.27 %, suivi par le sol C1 1.20 %, cependant le sol R a fourni un rendement microbien faible 0.63 %. Ces faibles rendements signaleraient pour ces sols un environnement physique défavorable à la vie microbienne (drainage insuffisant, hydromorphie, texture grossière) ou un environnement chimique défavorable à la vie microbienne (salinité excessive, toxicité des produits agrochimiques).

Tableau 42. Teneurs en $C_{\text{microbien}}$ et $N_{\text{microbien}}$ et rendement microbien pour les différents sols hydromorphes étudiés

Sol	C1 (0 -5 cm)	C2 (5 -15 cm)	R
$C_{\text{microbien}}$ (mg de C. kg⁻¹ s.s.)	168,3	165,6	77,5
$N_{\text{microbien}}$ (mg de N. kg⁻¹ s.s.)	53,87	19,59	27,96
$C_{\text{microbien}}/C_{\text{organique}}$	1,20	1.27	0,63
$N_{\text{microbien}}/N_{\text{total}}$	1,85	1,50	1,33

Le rapport $N_{\text{microbien}} / N_{\text{total}}$, comme d'ailleurs $C_{\text{microbien}} / C_{\text{organique}}$, est un indicateur permettant d'estimer la dynamique de la matière organique dans les sols (Fließbach et *al.*, 2007). Le rapport $N_{\text{microbien}} / N_{\text{total}}$ est de 1.85 % à 1.33 % selon l'ordre sol C1 > C2 > R.

XI.4. Conclusion

Cette phase de travail se propose de faire une caractérisation physico-chimique d'un sol engorgé d'eau ainsi qu'une estimation quantitative des bactéries Sulfato-réductrices (BSR) responsables du phénomène de sulfato-réduction, un dénombrement des principaux groupes microbiens (Bactéries et Champignons) ainsi qu'une évaluation du $C_{\text{microbien}}$ et du $N_{\text{microbien}}$ dans le sol.

Les résultats des caractéristiques physico-chimiques obtenus montrent que la zone d'étude est caractérisée par des sols à pH alcalin qui peut atteindre les 8.5, une texture sablo-limoneuse, une humidité élevée allant jusqu'à 48,67%, une salinité extrême, une teneur extrêmement élevée en gypse, une teneur moyennement élevée en matière organique et une teneur en calcaires peu à modérément élevée. Les valeurs enregistrées pour la DBO_5 et la DCO montrent que le sol de la zone d'étude est engorgé par les eaux usées ce qui conduit à la pollution de ce sol.

De point de vue microbiologique, nos résultats de dénombrement des bactéries sulfato réductrices montrent que la densité de ces bactéries dans les trois échantillons du sol est différente. Ainsi, dans le sol C1 nous avons enregistré la densité la plus importante (29.1×10^4 UFC g^{-1} s.s.), ce qui se traduit par une odeur nauséabonde intense expliquée par une forte dégradation de la matière organique. La plus faible densité est enregistrée dans le sol R (3.54×10^4 UFC g^{-1} s.s.). Ceci est dû aux conditions édaphiques relativement défavorables (faible teneur en matière organique, faible teneur en gypse) pour la prolifération des BSR.

Les résultats de la numération des différents groupes microbiens (Bactéries et Champignons) dans les différents sols étudiés, révèlent que les bactéries présentent une supériorité numérique à cause de leur grand pouvoir d'adaptation et de multiplication, suivies par les champignons beaucoup moins importants qui se trouvent inhibés par l'engorgement du sol.

Des variations de densité bactérienne et fongique ont été enregistrées dans les différents types de sols. Ainsi le sol de surface C1 présente une supériorité numérique en bactéries suivi par le sol de sub-surface C2 ensuite le sol rhizosphérique (R), tandis que les champignons sont plus abondants dans le sol R du fait qu'il est moins humide, moins salé et relativement plus acide, suivi par le sol C1 ensuite le sol C2.

Les résultats obtenus pour le $C_{\text{microbien}}$ et le $N_{\text{microbien}}$, ont montré que ces valeurs ont diversement varié selon les différents sols. Ainsi, le sol (R) enregistre le taux du $C_{\text{microbien}}$ le plus faible. Le $N_{\text{microbien}}$ varie de 19.59 à 53.87 mg N. kg^{-1} s.s. selon l'ordre sol C2 < sol R < sol C1.

Les valeurs du rendement microbien obtenues dans la présente étude sont faibles (de 0.63% à 1.27%), conséquentes d'un environnement édaphiques défavorable à la vie microbienne (drainage insuffisant, hydromorphie, texture grossière, salinité excessive, toxicité des produits agrochimiques).

Il ressort de cette étude que, dans un sol, la multiplication des bactéries sulfato-réductrices ne survient que quand sont réalisées simultanément quatre conditions à savoir la présence de quantités suffisantes de sulfates, l'absence d'oxygène (l'anaérobiose est la conséquence de l'engorgement du sol provoquée par un système de drainage défaillant), la présence de substrats organiques convenables, et la salinité excessive.

Conclusion générale

Conclusion générale

A ce jour, les études réalisées sur les sols oasiens se sont presque focalisées sur les caractéristiques physico-chimiques de ces sols. Cependant, très peu de données sont disponibles sur les caractéristiques microbiologiques.

Ce travail pluridisciplinaire a permis d'intégrer des données pédologiques, microbiologiques et biochimiques sur les sols des écosystèmes oasiens dans la région de Ouargla. Les résultats obtenus permettent de dégager des conclusions intéressantes sur les modes de gestion microbiologique des sols oasiens et sur les relations entre le sol, la plante et les microorganismes associés.

Pour évaluer le fonctionnement microbiologique des sols oasiens, nous avons étudié 4 points particuliers.

1^{er} point : Effet de quelques systèmes de culture sur la biomasse et l'activité microbienne des sols oasiens

L'ensemble des résultats des analyses physico-chimiques et microbiologiques de la couche superficielle des sols étudiés (0–30cm), montre que la présence de matière organique augmente la biomasse microbienne et son pouvoir minéralisateur en carbone. De point de vue nutritionnel les sols nus sont beaucoup moins riches en microorganismes que les sols cultivés. Le nombre et l'activité des microorganismes dépendent essentiellement de l'énergie qui peut être libéré à la suite de la décomposition de la matière organique. Ces modifications sont plus manifestées au niveau de la rhizosphère, qui met en évidence l'importance de l'effet rhizosphérique. Il ressort aussi de notre étude que le système de culture et les pratiques culturales sont susceptibles de varier considérablement les propriétés biologiques du sol. On note ainsi que le sol sous culture de légumineuse (luzerne), illustre une hausse relative de la microflore du sol et de sa dynamique, ce qui peut entraîner une augmentation de la fertilité biologique du sol. Cet effet s'avère moins intense sous culture de céréale et sous culture sous serre. Les résultats des dénombrements microbiologiques laissent apparaître des variations entre les sols en nombre de germes avec des valeurs maximales pour le sol cultivé par le palmier dattier, suivi par le sol de la serre et enfin le sol nu. Les sols cultivés renferment un potentiel riche en microorganismes par rapport au sol nu.

Conclusion générale

L'application des traitements phytosanitaires sous serre affecte la flore microbienne du sol, ce qui affecte indirectement la fertilité du sol. Parmi tous les groupes de microbes du sol étudiés, une diminution de la densité des microbes se produit par l'application des pesticides. En particulier, une diminution des bactéries plus évidente. Cependant, certains microbes tels que des champignons et des actinomycètes sont mieux capables de développer une certaine adaptation à l'application des pesticides, et ainsi avoir la capacité de se développer et de se multiplier. Quant à la biomasse microbienne, les valeurs relatives au $C_{\text{microbien}}$ et au $N_{\text{microbien}}$, montrent que ces paramètres sont plus élevés en sol cultivés par rapport au sol nu avec une légère prédominance pour le sol sous culture de légumineuse et le sol phœnicicole ce qui est confirmé par le dénombrement microbien. Pour ce qui est de l'activité enzymatique, les valeurs obtenues pour l'activité de la β -glucosidase sont comprises entre 0,137 et 0,376 $\mu\text{g de glucose.g.s.s}^{-1}$. L'amplitude des réactions obtenues pour ce paramètre suit la teneur en matière organique dans les cinq sols dans l'ordre LEG > PHO > CER > CPSS > SN. Ce fait permet donc d'apprécier l'introduction du système de culture luzerne du fait qu'il minimise de façon fiable le problème d'épuisement du sol.

2^{ème} point : Effets de quelques paramètres sur la densité microbienne de quelques sols oasiens

Effet du travail du sol

L'objectif de cette étude était de mettre en évidence la réponse des microorganismes telluriques à l'effet de la perturbation du sol par le labour en comparant la densité des principaux groupes microbiens entre un sol labouré et un sol non labouré. Les résultats du dénombrement des différents groupes microbiens montrent que la différence de biomasse microbienne devient faible voire nulle entre un sol labouré et un sol non labouré avec une légère prédominance en sol non labouré due principalement à l'absence de perturbation provoquée par le labour. L'absence de ce dernier laisse, ainsi, une quantité significative des résidus de culture à la surface du sol et un taux important d'humidité et de matière organique, celle-ci favorise une bonne activité microbienne. Le dénombrement des germes montre que les bactéries sont les microorganismes les plus abondants dans les deux sols à cause de leur grand pouvoir d'adaptation et de multiplication ; suivie par les actinomycètes et enfin par les champignons. Il ressort de cette étude que ces derniers se trouvent les plus sensibles à l'effet du travail du sol. Enfin, d'une manière générale le travail du sol agit sur l'environnement

Conclusion générale

physique et biotique des microorganismes du sol (aération, humidité, répartition des résidus de culture) et modifie en retour la quantité et la répartition de la biomasse microbienne dans le profil de sol. La conclusion tirée de cette expérience est que la réduction voire l'abandon du travail du sol a, le plus souvent, un effet positif sur l'abondance, l'activité et la diversité des organismes du sol, en lien avec une perturbation moindre de leurs habitats et de leurs ressources nutritives.

Effet de l'humidité du sol

Cette phase d'étude vise à mettre en évidence l'effet de la fréquence d'irrigation (humidité du sol) aux cours de deux saisons (hiver et printemps) sur la densité des principaux groupes microbiens dans trois jardins phoenicoles différemment entretenues de point de vue agronomiques, présentant ainsi des sols avec des taux d'humidité différentes.

Les résultats obtenus durant cette phase nous montrent qu'il est clairement constaté que Le nombre des microorganismes varie considérablement d'un sol à un autre, le maximum est enregistré dans le sol de la station 1 (palmeraie bien entretenue) où les conditions du milieu sont les plus favorables pour le développement des microorganismes telluriques. Le dénombrement des germes montre que les bactéries sont les microorganismes les plus abondants dans tous les sols étudiés à cause de leur grand pouvoir de multiplication, suivies par les champignons, ensuite les actinomycètes. Le groupe microbien le plus touché par l'effet du stress hydrique du sol est celui des bactéries suivi par les actinomycètes et enfin les champignons. Cela montre que les champignons s'adaptent bien aux conditions arides contrairement aux autres groupes microbiens. Ces résultats montrent, également, qu'il existe une variation saisonnière de la biomasse microbienne caractérisée par des baisses en saison hivernale et des hausses en saison printanière. Cette variation saisonnière montre la présence de différents types de micro-organismes dans le sol à chaque époque de l'année. Quant à l'effet saisonnier, la température au printemps correspond au domaine de développement des différents groupes microbiens comme l'humidité est favorable, par contre en hiver les faibles températures provoquent la réduction de la biomasse microbienne. Le déficit hydrique, qu'il soit prolongé ou de courte durée, affecte inéluctablement, d'une manière négative, la densité des groupes microbiens. Néanmoins les résultats obtenus ne peuvent pas être exclusivement attribués à l'humidité du sol car elle a été le plus souvent étudiée conjointement à d'autres facteurs édaphiques.

Conclusion générale

3^{ème} point : Variations spatio-temporelles de la biomasse microbienne dans les sols oasiens

Variabilité spatiale de la biomasse et l'activité microbienne sous culture de palmier dattier

L'étude de la variabilité spatiale à petite échelle de deux indicateurs de la qualité des sols à savoir la biomasse microbienne et l'activité enzymatique sous culture de palmier dattier a révélé des dissimilitudes en ce qui concerne les caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques entre deux pieds de palmiers dattiers. Ainsi, des facteurs biotiques comme la quantité de la matière organique et également des facteurs abiotiques comme le taux d'humidité des sols, influencent la quantité et l'activité des micro-organismes du sol. Les résultats du dénombrement des différents groupes microbiens montrent une variation de la biomasse microbienne en fonction des caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés. Ces résultats révèlent que les bactéries sont les plus nombreuses, suivies par les champignons, avec une diminution des densités bactériennes et fongiques en allant du P₀ au P₃. Cette variabilité est également justifiée par l'effet rhizosphérique et les résidus de récoltes (dattes,...) mis à la disposition des microorganismes. En ce qui concerne le C_{microbien}, N_{microbien} et l'activité enzymatique de la β -glucosidase, les valeurs obtenues pour ces paramètres suivent la teneur en matière organique représentée par le carbone organique et l'azote total. Il ressort de cette phase d'étude que la biomasse et l'activité microbienne au niveau des 04 points de sol diminuent proportionnellement lorsqu'on s'éloigne de la zone rhizosphérique du palmier dattier.

Effet des variations saisonnières sur la densité microbienne des sols oasiens

Les résultats obtenus au cours de cette phase de recherche montrent que pendant la période automnale, la densité microbienne est élevée, traduisant ainsi des conditions favorables de croissance du fait que les températures automnales stimulent la prolifération des microorganismes. Par suite, une diminution drastique du taux microbien qui atteint son minimum en période hivernale. C'est « la stérilisation partielle par le froid ».

D'après ces résultats on s'aperçoit que les groupes microbiens évoluent différemment selon les conditions auxquelles ils sont liés. Les conditions climatiques et édaphiques ont fortement influencé la densité des différents groupes microbiens. Les bactéries sont les

Conclusion générale

organismes les plus abondants suivis par les champignons, les actinomycètes et enfin les algues. .

Le groupe microbien le plus touché par les variations saisonnières est celui des champignons, suivi par les algues, ensuite les bactéries et les actinomycètes, qui semblent bien s'adapter aux variations climatiques.

4^{ème} point : mise en évidence des bactéries sulfato-réductrices dans un sol oasiens :

Le but de cette phase est d'étudier l'aspect microbiologique des sols des zones humides de la cuvette de Ouargla (chott Ain Beida). Ainsi, nous nous sommes intéressé à l'étude des paramètres microbiologiques (densités bactérienne et fongique, $C_{\text{microbien}}$, $N_{\text{microbien}}$) et principalement au phénomène de sulfato-réduction très répandu dans ces sols par la mise en évidence des bactéries sulfao-réductrices.

Les sols étudiés ont certes présenté une similitude texturale (texture sablo-limoneuse) et un pH alcalin (aux alentours de 8) mais ils étaient différents les uns des autres par leurs propriétés microbiologiques conséquentes de leur salinité différente ainsi que leur teneur en gypse et en matière organique. Ainsi, le sol de surface (C1) présente une supériorité numérique en bactéries, suivi par le sol de subsurface (C2) ensuite le sol rhizosphérique (R). Ce dernier qui est moins humide a enregistré, au contraire la densité fongique la plus élevée. Le sol C1 étant le sol le plus humide et le plus riche en gypse et en matière organique a enregistré une densité de BSR la plus importante ($29.1 \times 10^4 \text{ UFC.g.s.s}^{-1}$). Le sol rhizosphérique (R) a enregistré une teneur en $C_{\text{microbien}}$ faible ($77,5 \text{ mg de C. kg.s.s}^{-1}$) dû à la faible teneur en carbone organique. Le $N_{\text{microbien}}$ varie de 19.59 à 53.87 mg de N.kg.s.s⁻¹ selon l'ordre sol C2 < sol rhizosphérique (R) < sol C1.

En se basant sur les résultats obtenus dans ce travail, plusieurs recommandations et perspectives peuvent être suggérées :

L'apport compensatoire de matière organique est indispensable en agriculture pour conserver les propriétés du sol : amendements organiques (en particulier résidus de récolte, feuilles,...), déjections animales (lisier, fumier), compost, boues de stations d'épuration.... Leur utilisation est indispensable aux sols sableux, et constitue une valorisation des sous-produits de

Conclusion générale

l'élevage. Outre les apports fertilisants, le fumier occupe la meilleure position comme fumure organique de référence.

L'intégration de l'élevage dans le système de production oasien s'avère plus qu'indispensable. En effet le fumier des animaux occupe une place importante dans le maintien de la fertilité des sols dans les zones arides.

Les matières organiques sont, donc, un élément important pour le maintien des propriétés physiques du sol. Elles assurent de plus la réserve totale du sol en azote et une fraction importante d'autres éléments nutritifs tels que le phosphore et le soufre. La productivité d'un sol est donc directement affectée par le bilan des matières organiques dans le sol. En effet, des apports massifs de matière organique, une incorporation massive de résidus de récoltes et un paillage en surface permettent d'éviter la minéralisation trop rapide de **la matière organique**. Ces apports organiques constituent les principaux substrats énergétiques des organismes du sol, et font donc à ce titre l'objet d'attaques des organismes telluriques.

Une autre condition, encore recommandée, est de créer un microclimat susceptible de conserver la matière organique contre les aléas climatiques, afin de le rendre plus accessible aux microorganismes plutôt qu'aux facteurs physico-chimiques, par la multiplication des surfaces destinées à la phœniciculture.

Cependant, les possibilités d'action via la gestion de la matière organique restent limitées au stockage et à la fourniture d'éléments nutritifs. De plus, l'apport de matière organique peut favoriser l'apparition de certaines maladies ou de ravageurs. Une autre possibilité d'action humaine consiste à intervenir directement au niveau des populations d'organismes vivants dans le sol. A titre d'exemple, l'inoculation microbienne des sols avec des souches sélectionnées de *Rhizobium*, lorsque les populations naturelles sont absentes ou trop faibles. L'inoculation microbienne représente un mode d'action encore peu fréquent mais déjà économiquement important et qui devrait se développer à l'avenir.

De nouveaux protocoles en vue d'une application plus faible mais meilleure de pesticides, à savoir l'application avec précision, seraient utiles pour diminuer les effets écotoxiques et les risques pour la santé humaine. En outre, des nouvelles méthodes alternatives, comme les bio-pesticides, des pesticides organiques, de nouveaux agents de lutte biologique et nano-pesticides doivent être soulignés pour éviter l'application soucieuse de

Conclusion générale

pesticides. Toutefois, l'utilisation de nano-pesticides (les derniers intrants dans le monde de pesticides) est discutable en raison de leurs effets écologiques mal connus et leurs impacts négatifs sur l'environnement.

Quant à la sulfato-réduction, il faut signaler que dans un certain nombre de sols, contenant des quantités relativement importantes de sulfates, il est nécessaire, particulièrement sous les climats méditerranéens, caractérisés par des températures élevées, de forts ensoleillements et des pluies soudaines, d'éviter, par le drainage des parcelles cultivées, toute stagnation de l'eau en surface, ou, quand il s'agit de parcelles irriguées, de se doter des moyens techniques permettant un contrôle de l'eau. C'est à ce prix que pourront être évitées les conséquences néfastes d'un processus complexe dont l'intensité dépend, à la fois, des caractéristiques du sol, de la plante, de la microflore et du climat.

L'ensemble des fonctions de la microflore tellurique ainsi résumées détermine des services agro-écologiques tant au niveau environnemental qu'au niveau agronomique (rendement et qualité des produits).

Les micro-organismes occupent donc une place centrale dans le vivant par leur abondance, leur diversité, et leur implication dans les processus environnementaux. L'appréhension du compartiment microbien est donc d'une importance capitale pour une meilleure compréhension de ces processus, notamment dans un contexte de diminution de la biodiversité, de pollutions chroniques et de réchauffement global.

Ces résultats sont d'après nous d'une grande importance, ils peuvent contribuer à renforcer et à combler le manque existant à ce jour en matière de microbiologie des sols oasiens, et dont il a du mal à contrecarrer le développement des agroécosystèmes oasiens.

Si les conclusions, issues de ces différents sites permettent de mieux comprendre l'impact du travail du sol, de la fréquence d'irrigation (humidité du sol), des variations spatiotemporelles, de l'engorgement, mais plus généralement des systèmes de culture sur le fonctionnement microbiologique des sols oasiens, d'autres travaux sont nécessaires pour augmenter la généralité de ces résultats tels que :

- mettre en place d'autres sites, pour étudier d'autres paramètres sous d'autres pédoclimats,

Conclusion générale

- étudier la grande diversité de types de travail du sol et identifier les plus adaptés au maintien du patrimoine microbiologique du sol,
- augmenter les échelles d'investigation et travailler dans d'autres paysages agricoles sahariens
- utiliser des méthodes moléculaires de quantification de la biomasse microbienne.

Pour un système agricole stable et durable, il ne faut pas se contenter de cultiver les plantes, mais aussi penser à cultiver les microorganismes du sol.

Enfin, les indicateurs biologiques du sol, est un domaine de recherche qui doit impérativement se développer dans nos régions d'étude pour acquérir un caractère opérationnel en matière de gestion des sols, et mieux connaître les traits essentiels de l'écologie microbienne, en interaction avec les systèmes de culture, pour mieux gérer le fonctionnement du sol, en particulier prévoir et anticiper ces évolutions plutôt que les subir.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Abiven S., 2004. Relations entre caractéristiques des matières organiques apportées, dynamique de leur décomposition et évolution de la stabilité structurale du sol. Thèse de Doctorat ENSA de Rennes, 243 p.

Acosta-Martínez V., Tabatabai M.A., 2000. Enzyme activities in a limed agricultural soil. *Biol. Fert. Soils*, 31, 85-91.

Afnor., 1999- Qualité des sols. AFNOR, Paris. Vol 2, 408 p.

Ahl C., Joergensen R.G., Kandeler E., Meyer B. et Woehler V., 1999. Microbial biomass and activity in silt and sand loams after long-term shallow tillage in central Germany. *Soil & Tillage Research* 49.

Alexander M., 1982. Introduction to soil microbiology, 2nd Edition. J. Wily and sons INC, 467 P.

Ali-Haimoud D., 1980. Contribution à l'étude des sols alfatiers : fixation d'azote symbiotique : effet du paillage sur cette activité. Mémoire de Magister USTHB Alger, 112p.

Ali-Haimoud A., Amir H., Bounaga D, Chami M. et Djellali N., 1980. Contribution à l'étude de l'activité microbiologique de quelques sols de la sebkha de boughzoul (Hauts plateau algérois). *Physiol. Vég. Ghautier- Villars. Montreuil*, 18 (1), 19-33.

Al-Yassin A. 2005. Influence of salinity on citrus: A review paper. *Journal of Central European Agriculture*, 5: 263–272.

Amir H., Benaceur M., Laoufi Z., Amir A. et Boijnaic N., 1985. Le palmier dattier et la fusariose. XIII Contribution à l'étude de l'écologie microbienne du sol de deux palmeraies sahariennes atteintes de bayoud. *Rev Ecol Bio1 Sol*, 22 (3), 313-330.

Anderson R.V., Elliott E.T., McClellan, I.F., Coleman D.C., Cole C.V. et Hunt H.W.,

1978. Trophic interactions in Soil Is as they affect energy and nutrient dynamics. III. Biotic interactions of bacteria, amoebae, and nematodes. *Microbial Ecology* 4, 361-371.

Andrade D.S., Colozzi-Filho A. et Giller K.E. 2003. The Soil Microbial Community and Soil Tillage, p. 51-81, In A. El Titi, ed. *Soil Tillage in Agroecosystems*. CRC Press LLC, Boca Raton.

Andrew D.R., Fitak R.R., Munguia-Vega A., Racolta A., Martinson V.G. et Dontsova K., 2012. Abiotic Factors Shape Microbial Diversity in Sonoran Desert Soils. *Applied and Environmental Microbiology*, 78: 7527-37

Annabi M., 2001. Effets des apports d'origine urbaine sur les propriétés physiques des sols limoneux. Thèse Doctorat INA, Paris, 122p.

Références bibliographiques

- Annabi M., Houot S., Francou C., Poitrenaud M., et Le Bissonnais Y., 2007. Soil aggregate stability improvement with urban composts of different maturities. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71, 413-423.
- Annabi M., Bahri H., Latiri K., 2009. Statut organique et respiration microbienne des sols du nord de la Tunisie. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 13 (3), 401-408
- A.N.R.H., 2004. Synthèse sur les ressources des eaux de la wilaya de Ouargla. Rapport Agence Nationale Ressources Hydrauliques, Ouargla, 16 p.
- A.N.R.H., 2005. Zones humides au Sahara septentrional, Caractérisation et propositions d'aménagement. C.I.R.E.S.S. Ouargla. 4p.
- Aon M.A., Sarena, D.E., Burgos J.L. et Cortassa S. 2001. Microbiological, chemical and physical properties of soils subjected to conventional or no-till management: an assessment of their quality status. *Soil & Tillage Research* 60,173-186.
- Araújo A.S.F., Melo W.J., 2010. Soil microbial biomass in organic farming system. *Ciência Rural*. 40: 2419-2426
- Araujo ASF, Monterio RTR. et Abarkeli R.B. 2003. Effect of glyphosate on the microbial activity of two Brazilian soils. *Chemosphere*. 52:799–804.
- Arshad M.A., Martin S., 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro ecosystems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 88,153–160.
- Arnon I., 1972. *Crop production in Dry regions*. Londres.
- Arpin A., Kilbertus G., Ponge J.F., Vannier G., 1980. Importance de la microflore et de la microfaune en milieu forestier. Pesson P. *Actualités d'écologie forestière : sol, ore, faune*, Gauthier-Villars,87-150.
- Atlas R.M., Bartha R., 1993. *Microbial Ecology: Fundamentals and Applications*. Third edition. édition The Benjamin / Cummings Publising Company, Inc. edn. Redwood City. Canada. 563 p.
- Aubert G., 1978. *Méthodes d'analyses des sols*. Ed. C.R.D.P., Marseille, 191p.
- Aubert G., 1960. Les sols de la zone aride, étude de leur formation, de leurs caractères, de leur conservation. Actes coll. Unesco de Paris sur les problèmes de la zone aride, 127- 150.
- Aubert G., 1983. Observation sur les caractéristiques, la dénomination et la classification des sols salés ou sals sodiques. *Cahier ORSTOM. Série pédologie*. Vol 30 (1), 73-78.
- Avellaneda-Torres L.M., Melgarejo L.M., Narváez-Cuenca C.E. et Sánchez J. Enzymatic activities of potato crop soils subjected to conventional management and grassland soils. *J. Soil Sci. Plant Nutr.*13 (2).

Références bibliographiques

- Ayers R.S, Westcot D.W., 1985. Water quality for agriculture. FAO, Irrigation and drainage paper 29. 174p. Rome, Italy
- Bailey C.D., Price R.A. et Doyle J.J., 2002. Systematics of the Halimolobine Brassicaceae: evidence from three and morphology. *Systematic botany*. 27. 318-320.
- Baize D., 2000. Guide des analyses en pédologie. INRA, Edit : Paris, 257 p.
- Baize, D. et Girard, M.C., 1992. Référentiel pédologique. Principaux sols d'Europe. Versailles, INRA, Éditions. 222 p.
- Baize D., Jabiol B., 2011. Guide pour la description des sols. 2^e édition revue et augmentée, Quae, Versailles. 430 p.
- Bakken L. R., 1997. Culturable and nonculturable bacteria in soil. In: Van Elsas J. D, Trevors J. T. & Wellington E. M. H. (eds) *Modern soil microbiology*. Marcel Dekker, INC. New York. 4761.
- Baldrian P., Merhautová V., Cajthaml T., Petránková M., Snajdar J., 2010. Small-Scale disturbance of extracellular enzymes, fungal, and bacterial biomass in quercus pet-raea forest topsoil. *Biology and fertility of soils* 46, 717–726.
- Balesdent J., 1996. Un point d'évolution de la réserve organique des sols en France, INRA, unité des sciences de sol, N^o spécial, Paris. 245-260.
- Baouia A., 1998. La Nouvelle exploitation Agricole Oasienne face aux changements de l'environnement économique. Mémoire d'Ingénieur INFSAS, Ouargla 59 p.
- 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.
- Bardgett R.D., Hobbs P.J., Frostegard A., 1996. Changes in fungal: bacterial biomass ratios following reductions in the intensity of management on an upland grassland. *Biology and fertility of soils*. 22, 261-264.
- Barea J.M., Azcón-Aguilar G., 1982. Interactions between mycorrhizal fungi and soil microorganisms. *Colloq. I.N.R.A.* 13, 181-193.
- Barry J.P., Faurel L., Baumgartner N., Belin B, Celles J.C. et Kada A., 1968. Carte de la végétation de l'Algérie, feuille de Ghardaïa à 1 / 500 000. *Inst. Cart. Univ. Alger*.
- Bartra L., et Monna M.C., 1997. Dehydrogenase activity and microbial biomass in salt-affected soil of semi –arid regions. *Arid soil research rehabilitation*. Edit: Taylor et Francis, 11, 295-303.
- Barzanji A.F., 1973. Gypsiferous soils of Iraq. Ph.D. Thesis, University of Ghent, Belgium. 199 p.

Références bibliographiques

Bastida F., Moreno J.L., Hernandez T., Garcia C., 2006. Microbiological degradation index of soils in a semiarid climate. *Soil. Biol, Biochem.*38, 3463-3473.

Battesti V., 1996. La conception du travail et appréciation du paysage dans l'oasis saharienne. <http://anthropoasis.anotherlight.com/>

Bauzon D., Ponge J.F., Dommergues Y., 1974. Variations saisonnières des caractéristiques chimiques et biologiques des sols forestiers interprétées par l'analyse factorielle des correspondances, *Rev. Ecol. Biol. Sol.*, 2, 283–301.

Beauchamp J., 2008. Propriétés des sols. Université de Picardie Jules Verne.

Bechar M.F., 2004. Evaluation de la biomasse fongique du sol dans quelques stations de la région d'Ouargla. Mémoire de magister. Université d'Ouargla, 82p.

Bechraoui A., 1980. La vie rurale dans les oasis de Gabès. Publication de la faculté des sciences humaines. Université de Tunis Tunisie, 301p.

Bessedik F., Saka H., Moussaoui B. et Yakhou S., 2000. Fusariose du palmier dattier: dénombrement et évaluation des microorganismes des sols de différentes palmeraies du TOUAT indemnes de Bayoud. *Recherche Agronomique*, 6, 69-75.

Belkhodja M., Bidai Y., 2004. Réponse des graines d'*Atriplex halimus* L. à la salinité au stade de la germination. *Sécheresse*, 15, 331-5

Bell C., Mc Intyre N., Cox S., Tissue D., Zak J., 2008. Soil microbial responses to temporal variations of moisture and temperature in a Chihuahuan desert grassland. *Microbial. Ecol.* 56, 153-167.

Benhamida A. et Djeghbala H., 2005. Contribution à la caractérisation biométrique et anatomique de la végétation halophile dans les dépressions salées de la cuvette de Ouargla (Cas du chott Ain El-Beïda et de la sebkha de Bammendil). Mémoire d'Ingénieur U.K.M Ouargla. 71 p.

Ben Hassine H., Aloui T., Gallali T., Bouzid T., El Amri S. et Ben Haseen R., 2008. Evaluation quantitative et rôles de la matière organique dans les sols cultivés en zone subhumides et semi-arides méditerranéennes de la Tunisie. *Agrosolutions*. 19(2), 4-17.

Ben Salah M., 2014. Le recyclage des sous-produits des oasis : acquis et perspectives. Rapport élaboré dans le cadre du projet MENA-DELP : Partage des connaissances et de coordination sur les écosystèmes désertiques et les moyens de subsistance Au profit de l'Algérie, l'Égypte, la Jordanie, le Maroc et la Tunisie. 86 p

Benslama M., Zanache H., 2007. Distribution de la microflore fongique dans les sols organique du complexe humide d'El-kala Nord Est Algérien. Journées Nationales de l'Étude des Sols, 3-4-5 avril 2007, Angers

Ben Soltane A., Kihel M., Alaoudi A., Moussaoui A., 1999. Microbiologie des sols [Soil microbiology] CRSTRA, 287 p.

Références bibliographiques

Bertschinger L., Christian G., Ryser J.P., Häseli A., Neuweiler R., Pfammatter W., Schmid A. et Weibel F., 2003. Données de base pour la fumure en arboriculture fruitière, Fruits à pépins, fruits noyau, kiwis, baies d'arbustes. Edition: Eidgenössische Forschungsanstalt, Postfach 185, CH-8820 Wädenswil, www.faw.ch, 48 p.

Bessedik F., Saka H., Moussaoui B. et Yakhou S., 2000. Fusariose du palmier dattier : dénombrement et évaluation des microorganismes des sols de différentes palmeraies du TOUAT indemnes de Bayoud [Fusarium date palm : enumeration and evaluation of soil microorganisms of different palm of TOUAT affected by Bayoud]. Recherche Agronomique. 6, 69-75.

BG ingénieurs conseils. 2003. Etude d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation. Mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique. Volet d'impact sur l'environnement. Rapport de la mission III B. Caractérisation environnementale de la situation actuelle. Bonard & Gardel, Lausanne, 34-35

BG ingénieurs conseils. 2004. Etude d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation. Mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique. Volet d'impact sur l'environnement. Rapport de la mission II final. Investigations, essais de pompage et bilans d'eau, établissement des cartes piézométriques, diagnostic des captages d'eau et mesures de réhabilitation, de protection des ressources en eau. Bonard & Gardel, Lausanne, 11-43.

Birch H. F., 1960. Nitrification in soil after different periods of dryness. Plant and Soil, 12, 81-96.

Birch H.F. et Friend M.T., 1956. Humus decomposition in African soils, Nature, 178, 500p.

Bliefert C., Perraud R., 2001. Chimie de l'environnement. Air, eau, sols, déchets.- Paris : De Boeck Université. 477 p.

Bloem, J., Lebbink, G., Zwart, K. B., Bouwman, L. A., Burges, S., Devos, J. A. et De Ruyter, P.C., 1994. Dynamics of microorganisms, microbivores and nitrogen mineralization in winterwheat fields under conventional and integrated management. Agriculture, Ecosystems and Environment. 51, 129-143.

R S. Boeddinghaus a, *, N Nunan b, D Berner a, S Marhan a, E Kandeler., 2015. Do general spatial relationships for microbial biomass and soil enzyme activities exist in temperate grassland soils?. Soil Biology & Biochemistry 88 430-440.

Boizard H., Richard G., Defosse P., Roger-Estrade J. et Boiffin, J. 2004. Etude de l'effet à moyen et long terme des systèmes de culture sur la structure d'un sol limoneux-argileux du Nord du Bassin Parisien : les enseignements de l'essai de longue durée d'Estrée-Mons (80). Etude et Gestion des Sols. 11, 11-20.

Bonneau M., Souchier., 1979. Constituants et propriétés du sol. Edit ; Masson et Cie ; Paris, 459p.

Borken W., Muhs A. et Beese F., 2002. Application of compost in spruce forests: effects on soil respiration, basal respiration and microbial biomass. Forest Ecol. Manage. 159, 49-58.

Références bibliographiques

- Bossuyt H, Deneff K, Six J, Frey SD, Merckx R, Paustian K. 2001. Influence of microbial populations and residue quality on aggregate stability. *Appl Soil Ecol.* 16(3), 195–208.
- Bottner P., 1985. Response of microbial biomass to alternate moist and dry conditions in a soil incubated with C¹⁴- and N¹⁵ labelled plant material. *Soil Biol. Biochem.*, 17,329-337.
- Bottner P. et Billes G.,1987. La rhizosphère : site d'interactions biologiques. *Revue d'écologie et de biologie des sols.* 24, 369-388.
- Bouammar B. et Bekhti B. 2008. Le Développement De L'économie Agricole Oasienne : Entre La Réhabilitation Des Anciennes Oasis Et L'aménagement Des Nouvelles Palmeraies. *Revue Du Chercheur*, 6, 45-51.
- Bouammar b., 2000. Les Changements Dans L'environnement Economique Depuis 1994 Et leur effet sur la rentabilité économique et financière des Neo-exploitations de la région de Ouargla. Thèse de Mag., INA, Alger .124p.
- Bouchenafa N., Oulbachir K. et Kouadria M., 2014. Effets du travail du sol sur le comportement physique et biologique d'un sol sous une culture de lentille (*lens exculenta*) dans la région de Tiaret Algérie. *European Scientific Journal.*10(3), 463-473.
- Boudoudou H., Hassikou R., Ouazzani Touhami A., Badoc A., Douira A., 2009. Paramètres physicochimiques et flore fongique des sols de rizières marocaines. *Bull. Soc. Pharm. Bordeaux*, 148, 17-44.
- Bouguedoura N., Bennaceur M., Babahani S., et Benziouche S.E., 2015. Date Palm Status And Perspective In Algeria. Chapter 4.
- Bouhidel I., 2006- Etude expérimentale de l'influence de gypse sur la minéralisation de l'urée et la cinétique d'adsorption. Mémoire de magistère, université de Batna, 156p.
- Boullard B., Moreau J., 1962. Sol, microflore et végétation. Edit. Masson, Paris, 289p.
- Boumaraf B., 2013. Caractéristiques et fonctionnement des sols dans la vallée d'Oued Righ, Sahara Nord Oriental, Algérie. Thèse de doctorat, université de Reims Champagne-Ardenne, 97 p.
- Boumezbeur A., 2004. Atlas des zones humides Algériennes d'importance internationale. Éd. Direction Générale des Forêts, Alger. Algérie.105p.
- Bouthier A., Pelosi C., Villenave C., Peres G., Hedde M., Ranjard L., Vian J. F., Peigne J., Cortet J., Bispo A., Piron D., 2014. Impact du travail du sol sur son fonctionnement biologique. In book: Faut-il travailler le sol ?, Chapter: Impact du travail du sol sur son fonctionnement biologique, Publisher: Quae, Editors: Quae, Arvalis. pp. 85- 108.
- Bouzaher A., 1990. Note technique : création d'oasis en Algérie. *Revue Options méditerranéennes.* CIHEAM, Série A, n°11, pp 325-328.
- Brady N.C et Weil R.R, 2002. *The Nature And Properties Of Soils.* 13th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson education Inc.

Références bibliographiques

- Brai D., 1994. Contribution à l'étude de l'état nutritionnel par la méthode de diagnostic foliaire de trois variétés de pommier cultivées dans la région de kais., thèse ing, agro, Univ Batna., 47 P.
- Brookes P.C., Landman A., Pruden G. et Jenkinson D.S., 1985. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 17, 837-842.
- Bremner J.M., 1965. Inorganique forms of nitrogen. In *method's of analysis. Part 2. chemical and microbial properties* (C.A. Blak et al., Eds), 1179-1237. American society of agronomy, Madison.
- Bremner, J.M., 1996. Nitrogen-Total. Dans: Sparks, D.L., Page, A.L., Soltanpour Helmke, P.A., P.N., Johnston, C.T., Sumner, R.E. (Eds.), *les méthodes d'analyse de sol : Partie 3. Les méthodes chimiques*. Soil Sci. Soc. Am., Book Series, vol. 5. Soil Sci. Soc. of America, Madison, WI, 1085- 1123.
- Bremner J.M., Mulvaney C.S., 1982. Nitrogen-total. In: Page AL, Miller RH, Keeney DR, editors. *Methods of soil analysis. Chemical and microbiological properties*. 2nd ed. Madison (WI): American Society Agronomy. 595-624.
- Brown M.E., 1975. Rhizosphere micro-organisms. Opportunists, bandits or benefactors? In: *Soil microbiology*, ed. Walker N., Butterworths, London and Boston, 21-38.
- Bryssine I., Toutain G., 1970. Étude des sols des palmeraies 1, évolution d'un sol de palmeraie par la culture et la fumure. *Al Awamia*, 35p.
- Busson, G. 1967. Le Mésozoïque saharien. 1ère partie : L'Extrême Sud-tunisien. Edit., Paris, « Centre Rech. Zones Arides », Géol., 8, 194 p. Ed. C.N.R.S.
- Butlin K. R., Mary E., Adams et Margaret T., 1948. *The Isolation and Cultivation of Sulphate-Reducing Bacteria*, Chemical Research Laboratory, Department of Scientific and Industrial Research, Teddington, Middlesex
- Caldwell B.A., 2005. Enzyme activities as a component of soil biodiversity, a review. *Pedobiologia* 49,63 .p644.
- Callot G., Chamayou H., Maertens C. et Salsac, L., 1982. Mieux comprendre les interactions sol-racine. Incidence sur la nutrition minerale. INRA, Paris. 325 p.
- Calvet R., 2003- *Constituants et structure, phénomènes aux interfaces*, édit France Agricole, Dunod. 159-218.
- Campbell R., 1985. *Plant microbiology*. ARNOLD ed., Londres, 191 p.
- Carson J.K., Gonzalez-Quinones V., Murphy D.V., Hinz C., Shaw J.A., Gleeson D.B., 2010. Low pore connectivity increases bacterial diversity in soil. *Appl. Environ. Microbiol.* 76, 3936-3942.

Références bibliographiques

- Castro HF, Williams NH, Ogram A. Phylogeny of sulfate-reducing bacteria. FEMS Microbiol. Ecol, 2000, 31: 1-9.
- Chader S., Touzi A., 2001. Biomasse Algale : Source Energétique et Alimentaire. Rev. Energ. Ren. : Production et Valorisation – Biomasse, 47-50.
- Chatelus C., 1987. Contribution à l'étude du rôle des bactéries sulfato-réductrices dans les phénomènes de biocorrosion. Thèse doctorat. Université de technologie de Compiègne, 159 p.
- Chaussod R., 1996- La qualité biologique du sol : évaluation et implication. Etude et gestion du sol, 4(3), 264-275.
- Chaussod R., Zuvia M., Breuil M., Hetier J., 1992. Biomasse microbienne et « statut organique » des sols tropicaux : exemple d'un sol vénézuélien des Llanos sous différents systèmes de culture. Cahier. ORSTOM, série. Pédol., 17(1) 59-67.
- Chehema A., 2006. Catalogue des plantes spontanées du septentrional algérien. Laboratoire Protection Ecosystème Zone Aride Semi-Aride, Ouargla, 140 p.
- Chehema A., 2005. Etude floristique et nutritive des parcours camelins du Sahara septentrional algérien : cas des régions de Ouargla et Ghardaïa. Thèse Doctorat. Université Baji Mokhtar, Annaba. 178 p.
- Chehema A., Djebbar M.R. Hadjaiji F. et Rouabeh L., 2005. Etude floristiques spatio-temporelle des parcours sahariens du Sud-Est algérien. Sécheresse, 16 (4). pp 275-285.
- Chehema A. Faye B. Djebbar M.R., 2008. Productivité fourragère et capacité de charge des parcours camelins du Sahara septentrional algérien. Sécheresse. pp. 115-121
- Cheloufi H., Jacquin F., 2003. Influence du pédoclimat sur l'évolution des composés azotés présents dans les sols lorrains et leurs conséquences sur la qualité des eaux. Bulletin de l'Académie Lorraine des sciences 2003 42(1-4), 63-83.
- Cheloufi H., 1991. Etude du devenir de fertilisants azotés minéraux dans quatre types de sols cultivés lorrains : conséquences agronomiques et écologiques. Thèse Doctorat. I.N.P de Lorraine, 150p.
- Chen M. et Alexander M., 1973. Survival of soil bacteria during prolonged desiccation, Soil Biol. Biochem. 5, 213–221.
- Cherif H., 2014. Amélioration de la croissance du blé dur en milieu salin par inoculation avec *Bacillus* sp. et *Pantoea agglomerans* isolées de sols arides. Thèse Doctorat. Université Ferhat Abbas Setif, 162p.
- Cheverry C., 1995. Plant behaviour in saline environment. Action eau. Ed. Acad. Agro, Paris, France, 49p.
- Citeau L., Bispo A., Bardy M. et King D., 2008. Gestion durable des sols. Sous la coordination des Éditions Quae. Collection « Savoir-faire ». 320 p.

Références bibliographiques

Coutinet S., 1965. Méthodes d'analyses utilisables pour les sols salés, calcaires et gypseux. Analyse d'eau. Agronomie tropicale. I.R.A.T.C.V. Paris, 1242-1253.

Cookson W.R., Murphy D.V., et Roper M.M., 2008. Characterizing the relationships between soil organic matter components and microbial function and composition along a tillage disturbance gradient. *Soil Biology and Biochemistry* 40:763-777.

Cornet G., 1952. Essai sur l'hydrogéologie du grand erg occidental et des régions limitrophes. *Trav. Inst. Rech. Sahar, Paris*, T8, 71-122.

Corre M.D., Schnabel R.R. et Stout W.L., 2002. Spatial and seasonal variation of gross nitrogen transformations and microbial biomass in a Northeastern US grassland. *Soil Biol. Biochem.* 34, 445-457.

Coude-gaussen G., 1991. Les poussières sahariennes, cycle sédimentaire et place dans les environnements et paléoenvironnements désertique. John Libby, Paris, 485 p.

Coutinet S., 1965. Méthodes d'analyses utilisables pour les sols salés, calcaires et gypseux, analyse des eaux, IRAT n°12, Paris, 1242-1253.

Couto E.G., Stein A., Klamt E., 1997. Large area spatial variability of soil chemical properties in central Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 66, 139–152.

C.P.C.S., 1967. Classification française des sols, Commission de pédologie et de cartographie des sols.

Craswell E.T. et Lefroy R.D.B., 2001. The role and function of organic matter in tropical soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 61, 7-18

Curtis T.P., Sloan W.T. et Scannell, J.W., 2002. Estimating prokaryotic diversity and its limits. *PNAS*. 99 : 10494–10499.

Dabin B., 1976. Méthodes d'extraction et de fractionnement des matières humiques des sols. Application à quelques études pédologiques et agronomiques des sols tropicaux. Cahier ORSTOM, Paris, N°16.

Dabin B., 1967. La matière organique dans les sols ferrugineux tropicaux. Réunion annuelle des pédologues ORSTOM Bondy.

Dabin B., 1972. Technique d'extraction de la matière humique du sol. Cahier ORSTOM, collection de référence, série. *Pédol.*, 05491, 5p.

Dadda moussa M L., 2007. Les effets induits des différents programmes de développement agricole sur la préservation de l'écosystème saharien. Cas de la région de Ouargla. Mémoire De Magister., Université kasdi merbah Ouargla. 145p.

Daddi Bouhoun M., 2010. Contribution à l'étude de l'impact de la nappe phréatique Et des accumulations gypso-salines sur l'enracinement et La nutrition du palmier dattier dans la cuvette de Ouargla (sud-est algérien). Thèse Doct. Université Badji Mokhtar Annaba, 365p.

Références bibliographiques

- Daddi Bouhoun M. et Brinis L., 2006. Etude de la dynamique des sels solubles dans un sol irrigué gypso-salin : cas d'une palmeraie de la cuvette de Ouargla. *J. Alg. Rég. Arides*, Numéro special. 17-20.
- Daoud Y., Halitim A., 1994. Irrigation et salinisation au Sahara algérien. *Sécheresse* 5 (3), 151-160.
- Dassonville F., Renault P., 2005. Interactions entre microbiologie anaérobie et géochimie du sol. Description des dynamiques microbiennes. *Étude et Gestion des Sols*, 12 (1), 25 - 41
- Davet P., 1996. La vie microbienne dans le sol et la production végétale, INRA, Edit, Paris, 383 p.
- De Jesus E.B., De Andrade Lima L.R. P., Bernardez L. A. et Almeida P.F., 2015. Inhibition of microbial sulfate reduction by molybdate. *Brazilian journal of petroleum and gas*. 9 (3), 095-106
- Dekkiche B., 1974. Contribution à l'étude des sols du Hodna et corrélation géochimique des eaux de la nappe. Thèse Doctorat, Université. Gand, Belgique, 210p.
- Dellal A., 1994. Réactivité physicochimique, fonctionnement physiologique et microbiologique en conditions salines. Thèse Doct. ENASA de Rennes, 219p.
- Dellal A. et Halitim, A., 1992. Activités microbiologiques en conditions salines : cas de quelques sols salés de la région de Relizane (Algérie). *Cahiers Agricultures*, 1, 335-340.
- De Ruiter P.C., Van Veen J. A., Moore J. c., Brussaard L. et Hunt H. W., 1993. Calculation of nitrogen mineralization in soil food webs. *Plant and soil* 157, 263-273.
- Devries F.T., Manning P., Tallowin J.R., Mortimer S.R., Pilgrim E.S., Harrison K.A., Hobbs P.J., Quirk h., Shipley B., Cornelissen J.H. et Kattge J., Bardgett R.D., 2012. Abiotic drivers and plant traits explain landscape-scale patterns in soil microbial communities. *Ecol. Lett.* 15, 1230–1239.
- Dick R.P., Breakwell D.P. et Turco R.F., 1996. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. p. 247–271. In J.W. Doran and A.J. Jones (ed.) *Methods for assessing soil quality*. SSSA Spec. Publ. 49. SSSA, Madison, WI.
- 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. 165p.
- Djegui N., Boissezon P. et Gavinelli E., 1992. Statut organique d'un sol ferralitique du Sud-Bénin sous forêt et différents systèmes de cultures. *Cahier ORSTOM, série. Pédol.*, 27 (1), 5-22.
- Djerbi M., 1994. Précis de phœniciculture. F.A.O., Rome, 192 p.
- Dommergues Y. et Mangenot F., 1970. *Ecologie microbienne du sol [Microbial ecology of soil]*. Masson and Cie editors, Paris, 796 p.

Références bibliographiques

- Dommergues Y., 1954. La microbiologie appliquée à l'étude de la conservation des sols. Série d - tome VI.
- Dommergues Y., 1973. Principes de méthodologie en microbiologie du sol. In «Nouveaux documents pour une étude intégrée en écologie du sol», C.N.R.S., Paris, 3:13–30.
- Dommergues Y., 1962. Etude de quelques facteurs influant sur le comportement de la microflore du sol au cours de la dessiccation. Bio. sol. ORSTOM. Collection de référence, juin 1965, N° 92.
- Dommergues Y. et Moureaux C., 1954. Etat des recherches de microbiologie du sol à Madagascar. Cahier ORSTOM, série Pédol., Vol III, 29-32.
- Doran J.W., 2002. Soil Health And Global Sustainability: Translating Science into Practice. Agric. Ecosyst. Environ. 88, 119–127.
- DPAT., 2001. Annuaire statistique Wilaya de Ouargla , ETWO, 110p.
- DPAT (Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire)., 2009. Annuaire statistique pluriannuel (1998-2004-2008), Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire, Ouargla (Algérie), 138p.
- Dregne H E. 1976. Soils of Arid Regions. Amsterdam: Elsevier, 1–231.
- Dregne H E. 2002. Land degradation in the drylands. Arid Land Research and Management, 16: 99–132.
- Dridi B. Toumi C., 1999. Influence d'amendement organiques et l'apport de boues sur les propriétés du sol cultivé : étude et gestion des sols, AFES 6 (1), .1-14.
- Drijber, R.A., Doran, J.W., Parkhurst, A.M., et D.J. Lyon. 2000. Changes in soil microbial community structure with tillage under long-term wheat-fallow management. Soil Biology & Biochemistry 32.
- Dubief J., 1959. Le climat du Sahara. Mém. Inst. Rech. Saha., Alger, Tome I, 298.
- Dubief J., 1963 - Le climat du Sahara. Mém. Inst. Rech. Saha., Alger, Tome II, 262.
- Duchaufour P., 1970. Humification et écologie. Cahier. O.R.S.T.O.M., série. Pédol., vol. VIII, N° 4, 380-390.
- Duchaufour P., 1977. Pédogenèse et classification. Ed. Masson, Paris, 477p.
- Duchaufour P., 1984. Abstract of soil science. Masson-edition. 220. (In French)
- Duchaufour P., 2001. Introduction à la science du sol. 6ème édition de l'abrégé de pédologie. Dunod. Ed. Masson. Paris. 314p.
- Durand J.H, et Renty Y., 1983. Les sols irrigables. Etude pédologique. 190p.

Références bibliographiques

- Dutil P., 1971. Contribution à l'étude des sols et des paléosols du Sahara, Thèse doctorat. d'état, faculté des sciences de l'université de Strasbourg, 346p.
- Eilers R.G., Eilers W.D., Pettapiece W.W. et Lelyk G., 1995. Qualité de sol. <http://www.arg.ca/policy/environnement/pdfs/aei/fchap08.pdf>.
- El Bekr A., 1972. The date palm. A review of its past, present status and the recent advances in its culture industry and trade. Imp. El Ani. Bagdad. Irak 1050p. (en arabe).
- El-Juhany L I. 2010. Degradation of date palm trees and date production in Arab countries: causes and potential rehabilitation. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4: 3998–4010.
- Emberger L., 1955. une classification biogéographique des climats. *Trav. Ins.Bot. Montpellier*. 7, 3- 43.
- Esse P C, Buerkert A, Hiernaux P, et al. 2001. Decomposition of and nutrient release from ruminant manure on acid sandy soils in the Sahelian zone of Niger, West Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 83(1–2): 55–63.
- Eviner V.T. et Chapin F.S., 2003. Functional matrix: A conceptual framework for predicting multiple plant effects on ecosystem processes. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 34, 455- 485.
- Eyheraguibel B., 2004. Caractérisation des substances humiques biomimétiques- effets sur les végétaux. Thèse Doct, INP de Toulouse, 229p.
- Eynarda A., Schumachera T.E., Lindstromb M.J. et Maloa D.D., 2004. Porosity and Pore-Size Distribution in Cultivated Ustolls and Usterts. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 1927-1934.
- FAO, 1988. Yearbook of fishery statistics, 1986. Catches and landings. *FAO Fish. Ser.* 62, 479p.
- Fardoux J., Fernandes P., Niane-Badiane A., Cott J.L., 2000. Effets du séchage d'échantillons d'un sol ferrugineux tropical sur la détermination de la biomasse microbienne, comparaison de deux méthodes biocidales de référence. *Étude et gestion du sol* 4(7), 385-394.
- Farag Kassem A.M. et Lairje A.B., 2010. An economic study of palm dates trees residues and methods of using it in the Arab World. Faculty of Economics - Derna - Omar Al- Mukhtar University.
- Fedoroff N., Courty M., A., 1989. Indicateurs pédologiques d'aridification : exemple du Sahara. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 5, 43-53.
- Feller C. 1995. La matière organique du sol : un indicateur de la fertilité. Application aux zones sahéenne et soudanienne. *Agriculture et développement* 8, 35-41.
- Feller C., 1998. Un fractionnement granulométrique de la matière organique des sols en 1874. *Étude et gestion des sols*. Vol 5,3, 195-200

Références bibliographiques

Feng Y., Motta A.C., Reeves D.W., Burmester C.H., Santen E.v., et Osborne J.A., 2003. Soil microbial communities under conventional-till and no-till continuous cotton systems. *Soil Biology & Biochemistry* 35, 1693-1703.

Ferreira ACC, Leite LFC, Araújo ASF, Eisenhauer N., 2015. Land-use type effects on soil organic carbon and microbial properties in a semi-arid region of northeast Brazil. *Land Degradation & Development*. DOI: 10.1002/ldr.2282.

Finlay R.D., 2008. Ecological aspects of mycorrhizal symbiosis: with special emphasis on the functional diversity of interactions involving the extraradical mycelium. *Journal Of Experimental Botany* 59, 1115-1126.

Fierer N., McCain C.M., Meir P., Zimmermann M., Rapp J.M., Silman M.R. et Knight R., 2011. Microbes do not follow the elevational diversity patterns of plants and animals. *Ecology* 92, 797–804.

Fließbach A., Oberholzer H.R., Gunst L. et Mäder P., 2007. Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming. *Agric. Ecosystems Environ.* 118, 273-274.

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

Franco I., Contin M., Bragato G. et De Nobili M., 2004. Microbiological resilience of soils contaminated with crude oil. *Geoderma*, 121, 17-30.

Frankenberger W.T. et Dick W.A., 1983. Relationships between enzymes activities and microbial growth and activity indices in soil. *Soil Science Society of America Journal* 47, 945-951.

Franzuebbers A.J., Haney R.L., Hons F.M. et Zuberer D.A., 1996. Des fractions actives de la matière organique dans les sols à texture différente. *Nouv. Biochim.* 28, 1367- 1372.

Freckman D. W., 1988. Bacteria vorous nematodes and organic matter decomposition. *Agriculture, Ecosystems an Environment* 24, 195-217.

Frey S.D., Elliott E.T., et K. Paustian. 1999. Bacterial and fungal abundance and biomass in conventional and no-tillage agroecosystems along two climatic gradients. *Soil Biology and Biochemistry.*, 31, 573-585.

Frontier S. et Pichod-Viale, D., 1995. *Ecosystemes. Structure, fonctionnement, évolution.* 2^{ème} édition. Masson, Paris. 447p.

Ganry F. et Dommergues Y. R., 1995. Arbres fixateurs d'azote : champ ouvert pour la recherche. *Agriculture et développement*, 37-55.

Garcia J.L., Raimbaul M.T., Jacq V., Rinaudo G. et Roger P., 1974. Activités microbiennes dans les sols de rizières du Sénégal : relations avec les caractéristiques physico-chimiques et influence de la rhizosphère. *Rev. Ecol. Biol. Sol*, 11 (2), 169-185.

Références bibliographiques

García C., Hernández T. et Costa F., 1994. L'activité microbienne dans les sols sous conditions de l'environnement méditerranéen. *Soil Biology & Biochemistry* 26, 1185-1191.

García-Gil J.C., Plaza C., Soler-Rovira P. et Polo A., 2000. Long-term effects of municipal solid waste composts application on soil enzyme activities and microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.*, 32, 1907-1913.

García M.R.L., Nahas E., 2012. Microbial populations and the activity of the soil under agricultural and agricultural–pastoral systems. *Arch. Agron, Soil Sci.* 58 (5), 511-525,

Gardi R., 1973. Sahara. Ed : Kummerly et Fery, Paris, 3^{ème} édition. pp. 49-51.

Gaucher M., 1968. *Traité de pédologie agricole, le sol et sa caractéristique agronomique*, Ed. Paris.

Gawar A., 1999. *microbiologie des sols*. 64, 26-63.

Geisseler D., Horwath W.R., 2009. Short-term dynamics of soil carbon, microbial biomass, and soil enzyme activities as compared to longer-term effects of tillage in irrigated row crops. *Biology and Fertility of Soils* 46, 65–72.

Giller K.E., Witler E. et Mc Grath S.P., 1998. Toxicity of heavy metals to microorganisms and microbial processes in agricultural soils: a review. *Soil Biol Biochem* 30, 1389–1414

Gil Sotres F., Trasar-Cepeda C., Leiros M.C., Seoane S., 2005. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biol. Biochem.* 37, 877-887.

Ghassemi, F., Jakeman A.J. et Nix H.A., 1995. *Salinisation of land and water resources: human causes, extent, management and case studies*. Center for resource and environmental studies, The Australian National University, Canberra, Australia. 125p.

Glick BR. 1995. The enhancement of plant growth by free-living bacteria. *Can J Microbiol.*,41,109–117.

Gobat J., Arango M., Mathey W., 2003. *Le sol vivant, base de pédologie, biologie des sols*, 568 p.

Goodfellow M., 1969. Properties and composition of the bacterial flora of a pine forest soil. *J. Soil. Sci.*, 19, 154–167.

Gras R., 1990. *Systèmes De Culture. Définitions Et Concepts Clés*. In *Les Systèmes De Culture*. Coord. Combe L., Picard D., (Coords.). Paris, INRA, 7-14.

Graystone S. J., Vaughan D. et 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.

Gray T.R.G. et Williams S.T., 1974. *Soil microorganisms*, Hafner, New York, 240p.

Références bibliographiques

- Green J. et Bohannon, B.J.M., 2006. Spatial scaling of microbial biodiversity. *Trends In Ecology & Evolution*. 21,501-507.
- Gregorich, E.G., Carter, M.R., Angers, D.A., Monreal, C.M., Ellert, B.H. 1994. Towards A Minimum Data Set To Assess Soil Organic Matter Quality in Agricultural Soils. *Can. J. Soils*. 74, 367–385.
- Grime J.P., 1998. Benefits of plant diversity to ecosystems: immediate, filter and founder effects. *Journal of Ecology* 86,902-910.
- Griffiths B. S., Welschen R., van Arendonk I. J. C. M. et 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., Bonkowski M., Dobson G. & Caul S., 1999. Changes in soil microbial community structure in the presence of microbial-feeding nematodes and protozoa. *Pedobiologia* 43,297-304.
- Grigera M.S., Drijber R.A. et Wienhold B.J., 2007. Redistribution of crop residues during row cultivation creates a biologically enhanced environment for soil microorganisms. *Soil and Tillage Research* 94,550-554.
- 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.
- Groffman P.M., McDowell W.H., Myers J.C. et Merriam J.L., 2001. Soil microbial biomass and activity in tropical riparian forest. *Soil Biol. Biochem.*, 33, 1339-1348
- Guerif J., 1994. Influence de la simplification du travail du sol sur l'état structurelle des horizons de surface. Conséquences sur leurs propriétés physiques et leur comportement mécanique, in Monnier, G., Thevenet, G., Lesaffre, B. ed. *Simplification du travail du sol* INRA, édition Paris (France), 13-33,
- Guillermou, W., 2014. Oasis Au Sud Du Maghreb : Gestion Des Ressources Politiques Publiques Et Stratégie paysannes. *Wachletter* n°28 "Land Issues In The Mediterranean Countries", 4p.
- Guillermou Y., 1993. Survie et ordre social au Sahara. Les oasis du Touat-Gourara-Tidikelt en Algérie. *Cahier des sciences Humaines.*, 19,107-108.
- Gunapala N., Scow K.M., 1998. Dynamics of soil microbial biomass and activity in conventional and organic farming Systems. *Soil Biol. Biochem.* 30 (6), 805-816.
- Guinot C., 2007- site internet. www.compagnesetenvironnements.fr
- Haddana S., 2008. Etude floristique spatio-temporelle du chott de ain el beida- Wilaya de ouargla. Mémoire Ingénieur d'état en biologie. Université Kasdi merbah Ouargla. 66p.

Références bibliographiques

- Hajji A. 1997. La modernisation des oasis tunisiennes. In Jouve A.M. (ed.). La modernisation des agricultures méditerranéennes (à la mémoire de Pierre Coulomb). Montpellier Ciheam-IAMM, 1997. Options Méditerranéennes: Série A. Séminaires Méditerranéens, N° 29.
- Halilat M T., 1993. Etude de la fertilisation azotée et potassique sur le blé dur (variété aldura) en zones sahariennes (région d'Ouargla). Mémoire de Magistère, Université de Batna. 130p.
- Halitim A., 1988. Sols des régions arides d'Algérie. Ed. Office de publication Universitaire, Alger. 384p.
- Halitim A., 2006. Les sols des zones arides d'Algérie, édit CRSTRA, Biskra, 29-35.
- Hamdan L., 2010. Caractérisation de la communauté fongique impliquée dans la minéralisation de soufre organique dans les rhizosphères de colza et d'orge. Thèse Doctorat. ENSAIA-INPL, Nancy, 248 p.
- Hamdi-Aïssa B., Girard M.C., 2000. Utilisation de la télédétection en régions sahariennes, pour l'analyse et l'extrapolation spatiale des pédopaysages. Sécheresse, 3, 179-188.
- Hamdi-Aïssa B., 2001. Le fonctionnement actuel et passé de sols du Nord Sahara (Cuvette de Ouargla). Approches micromorphologique, géochimique, minéralogique et organisation spatiale. Thèse Doct. I.N.A. Paris-Grignon, Paris, 315 p.
- Hamdi-Aïssa B., Hariz A., et Mansouri S., 2010. Les anciens systèmes de gestion de l'eau dans les oasis : patrimoine à préserver. Workshop sur l'agriculture saharienne : enjeux et perspectives. Ouargla – le 03 mai 2010. 15-16.
- Hamdi Aïssa B., Valles V., Aventurier A., Ribolzi O., 2004. Soils and Brine Geochemistry and Mineralogy of Hyperarid Desert Playa, Ouargla Basin, Algerian Sahara. Arid Land Res. Manag. 18, 103-126.
- Hansen T.A., 1994. Metabolism Of Sulfate-Reducing Prokaryotes. Antonie Van Leeuwenhoek, 66, 165-185.
- Harris R. F., 1981. Effect of water potential on microbial growth and activity. Dans Water Potential Relations in Soil microbiology, J. F. Parr, W. R. Gardner et L. F. Elliott (Eds), Soil Sci. Soc. Am. Special Publications, No 9, Madison, WI, USA. 23-95.
- Hawksworth D.L. et 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.
- Haynes R.J., Dominy C.S. et Graham M.H., 2003. Effect of agricultural land use on soil organic matter status and the composition of earthworm communities in KwaZulu-Natal, South Africa. Agr. Ecosyst. Environ. 95(2-3), 453-464.
- Helgason B.L., Walley F.L. et Germida J.J., 2009. Fungal and bacterial abundance in longterm no-till and intensive-till soils of the northern great plains. Soil Science Society of America Journal, 73, 120–127.

Références bibliographiques

Helgason T., Daniell T.J., Husband R., Fitter A.H. et Young J.P.W., 1998. Ploughing up the wood-wide web. *Nature*. 394-431.

Henin S., Gras R. et Monnier G., 1969. Le profil cultural. Masson, 28^{ème} édition.

Hogberg M.N., Hogberg P. et Myrold D.D., 2007. Is microbial community composition in boreal forest soils determined by pH, C-to-N ratio, the trees, or all three? *Oecologia* 150, 590-601.

Holding A.J., Franklin D.A., Watling R. 1965. The microflora of peat podzols transition, *J. Soil Sci.*, 16, 44-59.

Horner-Devine M.C., Carney K.M. et Bohannon B.J.M., 2003. An ecological perspective on bacterial biodiversity. *Proceedings Of The Royal Society Of London Series B-Biological Sciences* 271,113-122.

Huber G. et Schaub C., 2011. Guide des fertilisations Azotés utilisables en Bio, Paris, 14 p.

Ibekwe A.M., Kennedy A.C., Frohne P.S., Papiernik S.K., Yang C.H. et Crowley D.E., 2002. Microbial diversity along a transect of agronomic zones. *FEMS Microbiology Ecology* 39,183-191.

Idder T., 1998. La dégradation de l'environnement urbain liée aux excédents hydriques au Sahara algérien. Impact des rejets d'origine agricole et urbain et techniques de remédiations proposées. L'exemple d'Ouargla. Thèse doctorat, Université d'Angers, pp.

Idder T., Idder A., Tankari Dan-Badjo A., Benzida A., Merabet S., Negais H., Serraye A., 2014. Les oasis du Sahara algérien, entre excédents hydriques et salinité : l'exemple de l'oasis de Ouargla. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 27(2), 155-164.

Ilstedt U. et Singh S., 2005. Nitrogen and phosphorus limitations of microbial respiration in a tropical phosphorus-fixing Acrisol (Ultisol) compared with compost. *Soil Biol. Biochem.*, 37, 1407-1410.

Ingle S.S., Jadhao S.D., Kharche V.K., Sonune B.A. et Mali D.V., 2014. Soil biological properties as influenced by long-term manuring and fertilization under sorghum (*Sorghum bicolor*) -wheat (*Triticum aestivum*) sequence in Vertisols. *Ind. J. Agr. Sci.* 84 (4), 452-7.

IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015

International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.

Iwai C.B., Oo A.N., Topark-ngarm B., 2012. Soil property and microbial activity in natural salt affected soils in an alternating wet-dry tropical climate. *Geoderma*, 189-190, 144-152

Jacq V., 1970. Recherches préliminaires concernant la sulfato-réduction rhizosphérique et la sulfato-réduction spermosphérique. Thèse de Doctorat, Université de Nancy, 130p.

Références bibliographiques

Jacq V., 1975. La sulfato-réduction en relation avec l'excrétion racinaire. Bulletin de la société botanique de France, Coll. Rhizosphère, Tome 122, 169-181.

Jacq V.A., 1989. Participation des bactéries sulfato-réductrices aux processus microbiens de certaines maladies physiologiques du riz inondé (exemple du Sénégal). Thèse Doctorat. Biol. Cell. Microbiol. Univ. Provence Aix-Marseille I, 258 p.

Jacquin F., Cheloufi H., Vong P C., 1992. Immobilization and mineralization kinetics of a nitrogen fertilizer in calcareous clayey (rendzina). The science of the Total Environment, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 271-278.

Jäger G., 1967. Changes in the activity of soil microorganisms influenced by physical factors. In: Progress in soil biology, eds. Graff O., Satchell, J.E., Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig.

Janvier C., 2007. Recherche d'indicateurs de la santé des sols. Thèse Doctorat. INA Paris Grignon, 216p.

Jenkinson D.S., 1966. Studies on the decomposition of plant material in soil. II. Partial sterilization of soil and the soil biomass. J. Soil Sci., 17,280-302.

Jenkinson D.S., 1976. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. IV. The decomposition of fumigated organisms in soil. Soil Biol. Biochem., 8,203-208.

Ji B., Hu H., Zhao Y., Mu X., Liu K. et Li C., 2014. Effects of Deep Tillage and Straw Returning on Soil Microorganism and Enzyme Activities. The Scientific World Journal, 2014, 451493. <http://doi.org/10.1155/2014/451493>

Joergenson R.G., 1995. The Fumigation-Extraction method For Microbial Biomass Nitrogen In: Alef K. & Nannipieri P., Eds. Methods In Applied Soil Microbiology and Biochemistry. London: Academic press Limited, 388-390.

Johansson E., Krantz-Rülcker C., Zhang B.X. et Öberg G., 2000. Chlorination and biodegradation of lignin. Soil Biol. Biochem., 32, 1029-1032.

Jones C.G., Lawton J. H. et Shachak, M., 1994. Organisms as ecosystem engineers. Oikos 69, 373-386.

Jouve P., 2003. Système De Culture Et Organisation Spatiale Des Territoires : Comparaison Entre Agriculture Tempérée Et Agriculture Tropicale. In. Dugué P., Jouve Ph., (Eds.), Organisation Spatiale Et Gestion Des Ressources Et Des Territoires Ruraux. Actes Du Colloque International, Montpellier, France.

Kalia A., Gosal S.K., 2011. Effect of pesticide application on soil Microorganisms. Arch. Agron. Soil. Sci. 57 (6), 569-596.

Kandeler E., Tschirko D. et Spiegel H., 1998. Long-term monitoring of microbial biomass, N mineralisation and enzyme activities of a Chernozem under different tillage management. Biology and Fertility of Soils 28,343-351.

Références bibliographiques

- Karabi M., 2010. Fonctionnement microbiologique et biochimique des sols sahariens : étude comparative entre sol salés (palmeraie de l'université de Ouargla) et sol alluvionnaire (palmeraie traditionnelle de Guerrara).mémoire magister Université Ouargla, 76p.
- Karabi M., Hamdi Aissa B., Zenkhri S., 2016. Microbial diversity and organic matter fractions under two arid soils in Algerian Sahara. AIP Conference Proceedings 1758, 030006, doi: 10.1063/1.4959402
- Karlen D.L., Mausbach M.J., Doran J.W., Cline R.G., Harris R.F. et Schuman G.E., 1997. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. Soil Science Society of America Journal 61, 4-10.
- Kennedy A.C., 1999. Bacterial diversity in agroecosystems. Agriculture, Ecosystems & Environment 74, 65-76.
- Kilbertus G., Kiffer E., 1977, Use of electron microscopy for soil microbiology: capabilities and limitations, Zbl. Bakteriopl., 132, 392–399.
- Kilbertus G., Proth J., 1978. Modifications ultrastructurales observées dans un sol au cours d'un cycle annuel. Modes d'association et vitalité des germes (à paraître).
- Kilbertus G., Reisinger O., 1975. Dégradation du matériel végétal. Activité in vitro et in situ de quelques microorganismes, Rev. Ecol. Biol. Sol., 12, 347–358.
- Kilbertus G., Vannier G., Verdier B., 1976. Etude in situ de la recolonisation par la microfaune et la microflore des échantillons de sol forestier ayant subi un traitement thermique, Bull. Mus. Nat. Hist. Nat., 419, 113–142.
- Killian C., Feher D., 1939. Le rôle et l'importance de l'exploitation microbiologiques des sols sahariens. Bulletin de la société de biographie N° 6, 81-106.
- Kirda G, Baytorun N., 2000. Fertigation under saline conditions, irrigation management minimizing soil salinity risk. In. Plant nutrient management under pressurized irrigation systems in the Mediterranean region. Proceedings IMPHOS. AMMAN, 288 – 296.
- Kjoller A. et Struwe S. 1982. Microfungi in ecosystems: Fungal occurrence and activity in litter and soil. Oikos. 39,389-422.
- Khadraoui A., 2005. Eaux et sols en Algérie : gestion et impact sur l'environnement. Recueil de communications, Ouargla, 391p.
- Khadraoui A., 2010. Sols et hydraulique agricole dans les oasis algériennes. Ed OPU,184, 185.
- Khelif S., 2010.Etude de l'effet des effluents urbains sur le sol cultivé en zone semi-aride. Mémoire de magister. Université Hadj Lakhdar Batna. 67p
- Khelili T., Lammouchi B., 1992. Contribution à la cartographie des sols de la cuvette de Ouargla et étude de quelques cartes thématiques, mémoire d'ingénieur, INFS/AS, Ouargla, Algérie, 49p.

Références bibliographiques

Khouazem, B., 1998. Utilisation de différents produits nématicides contre les (Nématodes à galle) (Meloïdogyne) sur une culture d'aubergine (*Solanum Melongena* sous abris serre (Ouargla), Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Agronomie Saharienne, I.T.A.S. Ouargla, p1.

Kladivko E.J., 2001. Tillage systems and soil ecology. *Soil & Tillage Research* 61, 61-76.

Klikocka H., Narolski B., Klikocka O., Glowacka A., Juszczak D., Onuch J., Gaj R., Mlchalkiewicz G., Cybulska M., Stepaniuk S., 2012. The effect of soil tillage and nitrogen fertilization on microbiological parameters of soil on which spring triticales is grown. *Pol. J. Environ. Stud.* 21 (6), 1675-1685.

Klimek B., 2013. Scots pine roots modify the short-term effects of temperature and moisture on soil bacteria and fungi. - *Applied Ecology and Environmental Research.* 11(2), 173-188.

Kösters R., Preger A.C., Du Preez C. C., 2013. Re-aggregation dynamics of degraded cropland soils with prolonged secondary pasture management in the South African Highveld. *Geoderma*, 192: 173–181.

Koull N., 2015. Etude phytoécologique spatiotemporelle des zones humides du Nord-est du Sahara septentrional algérien (Région de Ouargla et de l'Oued Righ).

Koull N., 2007 – Effet de la matière organique sur les propriétés physiques et chimiques des sols sableux de la région de Ouargla, mémoire de Magister, Université de Ouargla, 99p.

Knight T.R. et Dick R.P., 2004. Differentiating microbial and stabilized β -glucosidase activity relative to soil quality. *Soil Biol. Biochem.* 36, 2089–2096.

Kraïmat H et Nessil H., 2006, Evolution de la végétation halophile suivant un gradient d'humidité et de salinité du sol. Cas du chott Ain El-Beïda Ouargla. Mémoire d'Ingénieur, U.K.M Ouargla. 115p.

Labdi M., Maatougui M.E.H., Ben Abdelli K. et D., 2001. Séminaire National sur la problématique de l'agriculture des zones arides et de la reconversion. Ed. Direction des services agricoles Sidi Bel Abbes, Algérie, 414 p.

Ladd J.N., Butler J.H.A., Amato M., 1986. Nitrogen fixation by legumes and their role as sources of nitrogen for soil and crop. *Biol. Agr. Hort.* 3, 269-286.

Ladd, J.N., Foster, R.C. and Skjemstad, J.O., 1993. Soil structure: carbon and nitrogen metabolism. *Geoderma*, 56: 401-434.

Lakhchakheche E. et Mokhtara F., 2003. Contribution à l'étude des relations sol-végétation dans l'écosystème de la cuvette de Ouargla. Mémoire d'Ingénieur, Université de Ouargla. 73p.

Lal R. 2002. Carbon sequestration in dryland ecosystems of West Asia and North Africa. *Land Degradation & Development*, 13(1): 45–59.

Lambers H., 2003. Dryland salinity: a key environmental issue in southern Australia. *Plant and Soil*, 257, 5–7.

Références bibliographiques

- Laura R.D., 1974. effects of neutral salts on carbon and nitrogen mineralisation of organic matter in soil. *Plant and soil*, 41,113-127.
- Lavelle P., Martin A., Martin S., Blanchart E. et Gilot, C. 1990. Conservation de la fertilité des sols de savane par la gestion de l'activité de la faune du sol. In *Savanes d'Afrique, terres fertiles ?* Ministre de la coopération et du développement-Cirad, Montpellier. 370-398.
- Lavelle P. et Spain, A. V., 2001. *Soil Ecology*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands. 65 p.
- Lazarev G., 1988. L'oasis, une réponse à la crise des pastoralismes dans le sahel. Actes du séminaire Les systèmes Agricoles oasiens. Tozeur (Tunisie) 19-21 Novembre 1988,77-89.
- Le Clech B., 2000 .Agronomie « des bases aux nouvelles orientations ».Edition Synthèses Agricole.Bordeaux.260p.
- Le Gall J., Xavier A.V., 1996. Anaerobes response to oxygen: the sulfate-reducing bacteria. *Anaerobe*, 2, 1-9.
- Legras M., Gangneux C., Bailleul C., Dur Jeanne C., Le pelletier P., Mougin C. et Laval K., 2007. La biomasse fongique des sols agricoles. Influence des caractéristiques physicochimiques des sols et conséquences d'une pollution cuivrique. Journées Nationales de l'Etude des Sols, 3-4-5 avril 2007, Angers.
- Legras M., (Sans Date) SD. Biomasse moléculaire fongique estimée par la quantification de l'ergostérol. Bioindicateurs : des outils biologiques pour des sols durables. A4 éditions. 4 p.
- Le Houerou H.N., 1990. Définition et limites bioclimatiques du Sahara. *Sècheresse*, 1(4), 246-259.
- Lemee J., 1978. Précis d'écologie végétale. Ed. MASSON, Paris, 285p.
- Le Menn D., 1982. Etude bibliographique de la corrosion bactérienne. Rapport du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (B.R.G.M). Université de Bretagne Occidentale de Brest. 44p.
- Le Rudulier D., Strom A.R, Dandekar A.M., Smith L.T. et Valentine R.C., 1984. Molecular biology of osmo-regulation. *Science*, 224,1064-1068.
- Le Rudulier D., Mandon K., Dupont L. et Trinchant J.C., 2002. Salinity effects on physiology of soil microorganisms, 2774-2789. In G. Bitton (ed.), *Encyclopedia of environmental microbiology*. AWiley-Interscience Publication. Canada.
- Leung K.T, Errampalli, D., Cassidy M., Lee H., Hall B., Trevors J. T, Okamura H. et 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
- Levigneron A., Lopez F., Vansuyt G., Berthomieu P., Fourcroy P. et Casse Delbart F., 1995. Les plantes face au stress salin. *Cahier Agric*. 4,263-73

Références bibliographiques

- Liang Y.C., Jin S., Microslav N., Yu P., Chen W. et Jiang Y. 2005. Organic Manure Stimulate Biological Activity And Barley Growth in Soil Subject To Secondary Salinization. *Soil biology and Biochemistry*, 37(1), 185–95.
- Lin C.F., Chen Z.Q., Xue Q.H., Lai H.X., Chen L.S. et Zhang D.S., 2007. Nutrient contents and microbial populations of aeolian sandy soil in Sanjiangyuan region of Qinghai Province. *Chin. J. Appl. Ecol.* 18,101-106.
- Li Y., Liu Y.H., Wang Y.L., Niu L., Xu X., Tian Y.Q., 2014. Interactive effects of soil temperature and moisture on soil N mineralization in a *Stipa krylovii* grassland in Inner Mongolia, China. *J. Arid Land.* 6 (5), 571-580.
- Liu D., Fang S., Tian Y., Dun X., 2014. Seasonal and clonal variations of microbial biomass and processes in the rhizosphere of poplar plantations. *Appl. Soil Ecol.* 78, 65–72.
- Liu X., Zhang W., Zhang M., Ficklin D.L., Wang F., 2009. Spatio-temporal variation of soil nutrients influenced by an altered land tenure system in China. *Geoderma* 152, 23–43.
- Loubinoux J., 2001, Les bactéries sulfato-reductrices Humaines : Caractérisation et pouvoir pathogène, thèse Doct, Université Nancy et Université Nova de Lisboa.
- Luizao R.C.C., Bonde T.A. et Rosswall T., 1992. Seasonal variation of soil microbial biomass—the effects of clear felling a tropical rainforest and establishment of pasture in the central Amazon. *Soil Biol. Biochem.* 24, 805-813.
- Mac Clung G, Frankerberger W. T., 1985. Soil nitrogen transformations as affected by salty soil. *Soil Sci.*, 405-411.
- Mahieu N., Powlson D.S. et Randal, E.W., 1999. L'analyse statistique de publié les spectres RMN " CPMAS " du carbone-13 de la matière organique du sol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 307-319.
- Malinowski D.P., Allouch G.A. et Blesky D.P., 2000. Leaf endophyte *Neotyphodium coenophialum* modifies mineral uptake in tall fescue. *Plant Soil.* 227,115-126.
- Mallouhi N., 1989. Etude de la dynamique de la matière organique dans les sols affectés par la salinité. *Tropicultura*, 7 (3) ,90-97.
- Mallouhi N., Jacquin F., 1988. Influence des ions sodium sur les mécanismes d'humification. *Sci. Sol*, 26 (4),215-222.
- Mandic L, Dragutin Dukic D, Dordevic S. 2005. Soil fungi as indicators of pesticide soil pollution. *Proc Natl Sci Matica Srpska Novi Sad.* 109,97–102.
- Marinari S., Mancinelli R., Campiglia E., Grego, S., 2006. Chemical and biological indicators of soil quality in organic and conventional farming systems in Central Italy. *Ecol. Indicators.* 6, 701-711.
- Martinez C.E. et Tabatabai M.A., 1997. Decomposition of biotechnology byproducts in soils. *J. Environ. Qual.* , 26, 625-632.

Références bibliographiques

Mashali A.M., 1996. Soil management practice for gypsiferous soils. In: Poch, M. (Ed.), Proceedings of the International Symposium on Soil with Gypsum. Catalonia, Spain.

Masmoudi A., 2011. Effet de la salinité des eaux et la fréquence d'irrigation sur le sol et le végétal. *Courrier de savoir*. 11,61-69

Mass E.V., 1986. La tolérance au sel de plantes. *App. Menti agriculture recherche* 1, 12-26.

Masse D., 2007. Changements d'utilisation des terres dans les agrosystèmes d'Afrique subsaharienne. Propriétés des sols et dynamique des matières organiques. Mémoire HDR, l'ENSA de Toulouse.

MATE (Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement). 2001. Elaboration de la stratégie et du plan d'action national des changements climatiques, communication nationale initiale, projet national ALG 98/G31, Alger, 131p.

Mathieu C., Lozet J., 2011. Dictionnaire encyclopédique de science du sol, Lavoisier, 733 p.

Mathieu C., Pieltain., 2009. Les principaux sols du monde. Voyage au centre de l'épiderme de la planète Terre. Lavoisier, éditions Tech et Doctorat. 233 p.

Mbonigaba Muhinda J.J., Nzeyimana I., Bucagu C., Culot M., 2009. Caractérisation physique, chimique et microbiologique de trois sols acides tropicaux du Rwanda sous jachères naturelles et contraintes à leur productivité. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2009 13(4), 545-558.

McCarty G.W., Lyssenko N.N., et Starr J.L., 1998. Short-term changes in soil carbon and nitrogen pools during tillage management transition. *Soil Science Society of America Journal* 62,1564-1571.

Meftah H., 1988. Influence d'un apport de litière de volailles et de fumier ovin en sol saharien nu et irrigué de la région d'Ouargla : dynamique du carbone et humification. Mémoire Ing, ITAS, Ouargla, 58p.

Meiklejohn J., 1957. Number of bacteria and actinomycetes in a Kenia Soil, *J. Soil. Sci.*, 8, 240-247.

Mekhazni D., 1990. Activité cellulolytique et évolution des microorganismes aérobies dans un sol salé enrichi en paille. Mémoire Ing, INA, Alger, 55p.

Meklat A., Bouras N., Zitouni A., Mathieu F., Lebrihi A., Schumann P., Spröer C., Klenk H. P., Sabaou N., 2012. *Actinopolyspora algeriensis* sp. nov., a novel halophilic actinomycete isolated from a Saharan soil. *Extremophiles*, 16 (5), 771-776.

Melab M., 1996. Contribution à l'étude de l'évolution de la biomasse microbienne sous différents systèmes de culture. Mémoire Ing. INES. Tiaret. 58p.

Merabet O., Popov A., 1972. Les bassins salifères de l'Algérie. Actes du colloque U.N.E.S.C.O.- Géologie des dépôts salifères, Hanovre - Science de la terre, 7, 173-181.

Références bibliographiques

- Meyer K., Joergensen R.G. et Meyer. B., 1996. The effects of reduced tillage on microbial biomass C and P in sandy loess soils. *Applied Soil Ecology* 5,71-79.
- Michel M-C., 1997, Traitement de l'hydrogène sulfuré par biolavage, Mémoire de maîtrise. Université Laval, Québec
- Mielniczuck J., 1999 Matéria sustentabilidade orgânica e de sistemas agrícolas. Dans : SANTOS, G. de F.A.O A.; Camargo, (éd.) Fundamentos da matéria subtropicais ecossistemas tropicaise orgânica :. Porto Alegre: GÊNESIS, 1-8.
- Mikola J., 1998. Effects of microbivore species composition and basal resource enrichment on trophic-level biomasses in an experimental microbial-based soil food web. *Oecologia* 117,396-403.
- Miralles I., Ortega R., Sánchez-Marañón M., Soriano M., Almendros G., 2007. Évaluation des tendances biogéochimiques dans la matière organique du sol la séquestration dans les sols de montagne calcimorphic Méditerranéenne. *Nerv. Biochem.* 39, 2459-2470.
- Mlih R., Bol R., Amelung W., Brahim N., 2015. Soil organic matter amendments in date palm groves of the Middle Eastern and North African region: A mini-review. *Journal of Arid Land*, doi: 10.1007/s40333-015-0054-8
- Mokrane S., Bouras N., Sabaou N., Mathieu F., 2013. Actinomycetes from saline and non-saline soils of Saharan palm groves: Taxonomy, ecology and antagonistic properties. *African Journal of Microbiology Research*. Vol. 7(20), 2167-2178,
- Monod T., 1992. Du désert. *Sécheresse*, 3(1) ,7-24.
- Morand T., 2001. Soil landscape of the Woodbun 1:100000 sheets. Department of land and water conservation, Sydney: 271-273.
- Morel R., 1989. Les sols cultivés, 1^{ère} Ed INRA. Paris, 578-580.
- Morel R., 1996. Les sols cultivés, 2^{ème} Ed INRA. Paris.
- Moreno B., Garcia-Rodriguez S., Canizares R., Castro J., et Benitez E., 2009. Rainfed olive farming in southeastern Spain: Long-term effect of soil management on biological indicators of soil quality. *Agri. Ecosyst. Environ.* 131,333–339.
- Mrabet R., Saber N., El Brahli A., Lahlou S., F Bessam., 2001. Total, particulate organic matter and structural stability of a Calcixeroll soil under different wheat rotations and tillage systems in a semiarid area of Morocco, *Soil and Tillage Research* 57, 225-235.
- Muhammad S, Muller T, Joergensen RG. 2006. Decomposition of pea and maize straw in Pakistani soils along a gradient in salinity. *Biology and Fertility of Soils* 43,93–101.
- Munier P., 1973. Le palmier dattier. *Techniques agricoles et productions tropicales*. G. P. Maison neuve & La rose, Paris, 221p. N°1 :19-33.

Références bibliographiques

Munns R., 2009. Strategies for Crop improvement in Saline Soils. Chapter 11. In M. Ashraf, M. Ozturk, H.R. Athar (ed.), Salinity and water stress, improving crop efficiency, Springer Science. Business Media B.V.

Murata T., Tanakaa, H., Yasuea, S., Hamadab, R., Sakagamia, K., Kurokawaa, Y., 1999. Seasonal variations in soil microbial biomass content and soil neutral sugar composition in grassland in the Japanese Temperate Zone. *Appl. Soil Ecol.* 11, 253-259.

Nannipieri P., Grego S., Ceccanti B., 1990. Ecological significance of the biological activity in soils. In: Bollag, J.M., Stotzky, G. (Eds.), *Soil Biochem.* Marcel Dekker, New York, 293–355.

Nannipieri P., Johnson R.L. et Paul E.A., 1978. Criteria for measurement of microbial growth and activity in soil. *Soil Biology and Biochemistry* 10,223-229.

Nannipieri P, Giagnoni L, Renella G, Puglisi E, Ceccanti B, Masciandaro G, Fornasier F, Moscatelli MC, Marinari S., 2012. Soil enzymology: classical and molecular approaches. *Biology and Fertility of Soils* 48,743–762.

Nicolardot B., 1983. Influence de l'humidité sur la minéralisation du carbone et de l'azote dans quatre sols cultivés. *Bull. Sci. Bourg.*, 36, 21-28.

Nicolardot B., Chaussod R. et Catroux G., 1984. Décomposition de corps microbiens dans des sols fumigés au chloroforme : Effets du type de sol et de microorganisme *Soil Biol. Biochem.* Vol. 16, No. 5, pp. 453-458.

Nilsson L.O., Wallander H., Gundersen P., 2012. Changes in microbial activities and biomasses over a forest floor gradient in C-to-N ratio. *Plant Soil* 355, 75–86.

Normand P., Navaro I. et Domenach A.M., 2000. La symbiose fixatrice d'azote Frankioplantes actinorhiziennes. *Bulletin de la Société Française de Microbiologie* 15,241-244.

Olsson S. et Alstrom, S. 2000). Characterisation of bacteria in soils under barley monoculture and crop rotation. *Soil Biology & Biochemistry* 32,1443-1451.

Omeiri N., 2008. Gestion intégrée de la fertilité d'un sol salé au sein d'un agrosystème oasien : cas de la palmeraie du KSAR d'Ouargla. Mémoire de Magistère, Université d'Ouargla, 208p.

Omeiri N., 2016-. contribution à la définition d'une approche de lutte contre la dégradation des sols des oasis algériennes : cas de l'oasis de Ouargla. Thèse de doctorat, Université de Ouargla, 319p.

ONA (Office National de l'Assainissement), 2003. Etudes d'assainissement des eaux résiduaires pluviales et d'irrigation dans la vallée de Ouargla. Mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique, volet « Etude d'impact sur l'environnement », étude réalisée par B.G, Lausanne, Suisse, 32p.

Oorts K., 2006. Effect of tillage system on soil organic matter stocks and C and N fluxes in cereal cropping systems on a silt loam soil in Northern France. PhD thesis, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris.

Références bibliographiques

Oulbachir K., 2010. Ecologie microbienne des sols sous différents compartiments granulométriques et différents étages bioclimatiques. Thèse de doctorat, université d'Oran, 114p.

Ould el hadj M.D., 2011. Le développement de la céréaliculture dans le Sahara algérien face aux problèmes acridiens. Actes du séminaire international sur la biodiversité faunistique en zones arides et semi-arides. 127-131.

Oustani M., 2006. Contribution à l'étude de l'influence des amendements organique (fumier de volailles et fumier de bovins) sur l'amélioration des propriétés microbiologiques des sols sableux non salés et salés dans les régions sahariennes (cas d'Ouargla). Mémoire de magister, Université de Ouargla, 187p.

Ozenda P., 1991. Flore de sahara. 3^{ème} édition Paris, Editions du CNRS. 662 p.

Pace N.R., 1997. A molecular view of microbial diversity and the biosphere. *Science* 276: 734-740.

Pankhurst C.E., Yu S., Hawke B.G. et Harch B.D., 2001. Capacity of fatty acid profiles and substrate utilization patters to describe differences in soil microbial communities associated with increased salinity or alkalinity at three locations in South Australia. *Biol. Fertil. Soils*. 33,204-217

Pandey V.C., Singh K., Singh B., Singh R.P., 2011. New approaches to enhance eco-restoration efficiency of degraded sodic lands: critical research needs and future prospects. *Ecological Restoration* 29,322–325.

Passager P., 1957. Ouargla (Sahara constantinois). Etude géographique et médicale. Arch. Institut pasteur d'Algérie. 106-121.

Paul E.A., Clark F. E., 1989. Soil microbiology and Biochemistry, Academic Press, San Diego, CA.

Peigne J., Vian J.F., Cannavacciuolo M., Bottollier B., Chaussod R., 2009. Soil sampling based on field spatial variability of soil microbial indicators. *European Journal of Soil Biology* 45, 488–495.

Pekrun C., Kaul H.P., Claupein W., 2003. Soil tillage for sustainable nutrient management, p. 83-113, In A. El Titi, ed. *Soil Tillage in Agroecosystems*. CRC Press LLC, Boca Raton.

Pelletier F., 1992. Impact de différentes pratiques culturales sur la persistance de l'herbicide atrazine et sur la biomasse microbienne du sol. Mémoire de maîtrise ès Sciences de l'eau INRS-Eau Québec. 94 p.

Pendeleton R.L., Pendeleton B.K., Howard G.L., Warren S. D., 2003. Growth and nutrient content of herbaceous seeding associated with biological soil crusts. *Arid land research and management*. Taylor et francis, 17(3), 217-281.

Références bibliographiques

- Pérez-de-Mora A., Burgos P., Madejon E., Cabrera F., Jaeckel P., Schloter M., 2006. Microbial community structure and function in a soil contaminated by heavy metals: effects of growth and different amendments. *Soil Biol. Biochem.*, 38, 327-341.
- Pérez-Lomas, A.L., Delgado, G., Párraga, J. Delgado, R., Almendros, G., Aranda, C., 2010. Évolution des fractions de matière organique après application de co-compost des boues d'épuration à l'élagage déchets à quatre sols agricoles méditerranéennes. Une expérience en microcosme du sol. *Waste Manage.* 30, 1957-1965.
- Peyron G., 2000. Cultiver le palmier dattier. G.R.I.D.A.O., Montpellier, 109 p.
- Piotrowska A, Długosz J., 2012. Spatio-temporal variability of microbial biomass content and activities related to some physicochemical properties of Luvisols. *Geoderma* 173–174 :199–208. DOI : 10.1016/j.geoderma.2011.12.014.
- Pochon J., 1954. Manuel technique d'analyse microbiologique du sol [Technical Manual of microbiological soil analysis]. (Eds.), Masson, Paris, 123p.
- Poirier V., 2007. Séquestration du carbone dans un sol agricole du Québec : influence du travail du sol et de la fertilisation des cultures. Mémoire de maîtrise en sols et environnement, Université Laval Québec. 154 p.
- Ponnamperuma F.N., 1972. The chemistry of submerged soils. - *Adv. Agron.* 24, 29-96.
- Postgate J.R. The sulphate-reducing bacteria. In: Cambridge University Press (ed.), second edition, 1984, Cambridge, United Kingdom.
- Postgate, J.R. and Campbell, L.L. (1966) Classification of *Desulfovibrio* species, the non sporulating sulfate-reducing bacteria. *Bacteriol. Rev.* 30, 732-738.
- Pouget M., 1968. Contribution à l'étude des croûtes et encroûtements gypseux de nappe dans le Sud tunisien. *Cahier de l'ORSTOM, série Pédologie*, 6, 309-365.
- Powlson D.S., 1980. The effects of grinding on microbial and non-microbial organic matter in soil. *J. soil sci.*, 31, 77-85.
- Powlson D.S. et Jenkinson D., 1981. A comparison of the organic matter, biomass, adenosine triphosphate and mineralizable nitrogen contents of ploughed and direct-drilled soils. *J. Agric. Sci.* 97, 713-721
- Prade K., Ottow J.C.G., Jacq V.A., Malouf G. et Loyer J.Y., 1990. Relation entre les propriétés des sols de rizières inondées et la toxicité ferreuse en basse Casamance (Sénégal). *Études, revue et synthèse de travaux antérieurs.* - *Cah. ORSTOM. Sér. Pédol.*, 25(4), 453-474.
- Proth J. 1978. Evolution de la microflore d'une rendzine forestière récemment privée de ses apports naturels en litière de charme. Etude microbiologique et ultrastructurale, Thèse de 3ème cycle, Université de Nancy I, 215 p.

Références bibliographiques

- Qadir, M. et Schubert S., 2007. Degradation process and nutrient constraints in sodic soils. *Land Degrad. Dev.* 19,275-294
- Quenea K., 2004. Etude structurale et dynamique des fractions lipidiques et organiques réfractaires de sols d'une chronoséquence forêt/maïs (CESTAS, Sud-Ouest de la France). Thèse Doct. Univ Paris VI, 202 p.
- Ragab M., 1993. Schéma de répartition de la population microbienne du sol en sols affectés par le sel. Dans : Lieth, H., Al-Masoom, A.A. (Eds.), vers une utilisation rationnelle des plantes tolérantes à la salinité élevée, des délibérations sur les plantes tolérantes à la salinité élevée et écosystèmes, vol. 1. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 467-472.
- Rahal Bouziane H., Boulahbal O., Blama A., Mossab K., Djidda A., Allam A. et Tirichine A., 2010. Revues des régions arides. Numéro spécial 24 (2/2010). Actes du 3^{ème} meeting international « Aridoculture et cultures oasiennes : gestion et valorisation des ressources et applications biotechnologiques dans les agrosystèmes arides et sahariens » Djerba (Tunisie) 15-16-17/12/2009.
- Raiesi F. 2007. The Conversion Of Overgrazed Pastures To Almond Orchards And Alfalfa Cropping Systems May Favor Microbial Indicators Of Soil Quality In Central Iran. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 121,309– 318.
- Rasmussen K.J., 1999. Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: A Scandinavian review. *Soil & Tillage Research*, 53, 3-14.
- Recous S., Lashermes G., Bertrand I, Garnier P., 2015. La biomasse microbienne du sol : rôle dans le contrôle et le Couplage des cycles du carbone et de l'azote dans les systèmes Sol-plante. Utilisation du potentiel biologique du sol. (Colloque du 24 juin 2015).
- Reis MAM, Almeida J.S, Lemos P.C, Carrondo M.J.T., 1992. Effect of hydrogen sulfide on growth of sulfate-reducing bacteria. *Biotechnology and Bioengineering*, 40, 593-600.
- Reynaud P., Roger P., 1977- Milieux sélectifs pour la numération des algues eucaryotes, procaryotes et fixatrices d'azote. *Rev. écol. Biol. Sol*, 14(3), 421-428
- Rietz D N, Haynes R J. 2003. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 35(6): 845–854.
- Robert M., 1996. Le sol : interface dans l'environnement, ressource pour le développement. Masson, Paris, 241p.
- Roger-Estrade J., Richard G., Boizard H., Defossez P., Manichon H. et. Caneill J., 2004. SISOL: Un modèle d'évolution de l'état structural des couches de sol cultivées. *Etude et Gestion des Sols* 11,33-46.
- Roger P. et Reynaud P., 1977. La biomasse algale dans les rizières du Sénégal : importance relative des Cyanophycées fixatrice de N. *Rev. écol. Biol. Sol*, 14 (4),519-530.
- Roger P et Garcia J.L., 2001. Introduction à la Microbiologie du sol. Polycopié de cours. Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Luminy, France, 193p.

Références bibliographiques

Ros M., Hernandez M.T., Garcia C., 2003. Soil microbial activity after restoration of a semiarid soil by organic amendments. *Soilbiol. Biochem.*, 35, 463-469.

Rousk J., Fathi K., Elyaagubi Davey L., Jones Douglas L., Godbold . 2011. La tolérance au sel bactérienne est sans rapport avec la salinité du sol à travers un gradient de salinité de l'agroécosystème aride. *Soil Biology & Biochemistry* 43,1881-1887.

Rouviolois-brigol M., 1975. Le pays de Ouargla (Sahara algérien) variation et organisation. Pub. Univ. Sorbonne. Paris. 361p.

Sabaou N., 1988. Contribution à l'étude des Actinomycètes des sols des palmeraies algériennes : systématiques et écologie. Thèse Doctorat. Es, Sci, nat, Univ, Alger, 191p.

Sabaou N., Boudjella H., Bennadji A., Mostfaoui A., Zitouni A., Lamari L. et Bennadji H., 1998. Les sols des oasis du Sahara Algérien, source d'actinomycètes rares producteurs d'antibiotiques [The soils of the Algerian Sahara oases, source of rare actinomycetes producing antibiotics]. *Sécheresse*. 2, 147-153.

Sabaou N., Hacène H., Bennadji A., Bennadji H. et Bounaga N., 1992. Distribution quantitative des actinomycètes dans les horizons de sol de surface et profonds d'une palmeraie algérienne. *Can. J. Microbiol.* 38, 1066 - 1073.

Sablonnier, B., 2002. Biologie microbienne [Microbial biology]. pp. 157-202.

Sais I et Zeghidi S., 2006. L'impact de la situation topographique sur la salinisation du sol et le changement floristique (cuvette de Ouargla). Mémoire d'Ingénieur, U.K.M Ouargla. 87 p.

Saker R., Bouras N., Zitouni A., Ghoul M., Rohde M., Schumann P., Spröer C, Sabaou N. et Klenk H.P., 2014. *Mzabimyces algeriensis* gen. nov., sp. nov., a halophilic filamentous actinobacterium isolated from a Saharan soil, and proposal of *Mzabimycetaceae* fam. nov. - *Antonie van Leeuwenhoek*. 106, 1021-1030.

Salducci X., 2007. Qualité des matières organiques des sols : une nouvelle génération d'analyses de routine. 8èmes journées de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre GEMAS-COMIFER,1- 9.

Santos H., Fareleira P., Xavier A., Chen L. et Liu M.Y., Le Gall J., 1993 Aerobic metabolism of carbon reserves by the "obligate anaerobe" *Desulfovibrio gigas*. *Biochem. Biophys. Res. Comm.*, 195, 551-7.

Sarathchandra S.U., Perrott K.W. et Upsdell M.P., 1984. Microbiological and biochemical characteristics of a range of New Zealand soils under established pastures. *Soil Biol. Biochem.* 16, 177-183.

Sasson A., 1967. Recherches écophysologiques de la microflore bactérienne des sols des régions arides du Maroc. *Mém Ing, Rabat*, 224 p.

Schimann H., 2005. Impacts de perturbations liées à l'orpaillage sur l'évolution des communautés et fonctionnalités microbiennes d'un sol. Thèse Doct, ENGREF, 96 p.

Références bibliographiques

Schloter M., Dilly, O., Munch, J.C., 2003. Indicators for evaluating soil quality. *Agr. Ecos. Environ.* 98, 255-262.

Schmalenberger A., Schwieger F. et Tebbe C.C., 2001. Effect of primers hybridizing to different evolutionarily conserved regions of the small-subunit rRNA gene in PCR based microbial community analyses and genetic profiling. *Applied and Environmental Microbiology*. Vol. 67 (8),3557-3563.

Schmidt M.W.I, Margaret S.T., Samuel A., Thorsten D., Georg G., Ivan AJ,Markus K., Ingrid K.K., Johannes L., David A.C.M., Nannipieri P., Rasse D.P., Weiner S. et Trumbore S.E., 2011. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature* 478, 49–56.

Schnurer J., Clarholm M. et Rosswall T., 1986. Fungi, bacteria and protozoa in soil from four arable cropping systems. *Biol. Fertlil .Soils*, 2,119-126.

Schwarzenbach K., Enkerli J., et Widmer F. (2007) Objective criteria to assess representativity of soil fungal community profiles. *J. Microbiol. Meth.* 68, 358-366.

Sebai T.E., Lagacherie B., Soulas G. et Martin-laurent F., 2007. Spatial variability of isotopron mineralizing activity within an agricultural field: geostatistical analysis of simple physicochemical and microbiological soil parameters. *Environmental Pollution* 145, 680–690.

Shen R.C., XU M., CHI Y.G., YU S. et WAN S.Q., 2014. Soil microbial responses to experimental warming and nitrogen addition in a temperate steppe of Northern China. *Pedosphere* 24 (4), 427–436.

Shen Z., Zhang X., Zhou Y., 2013. Response of soil microbial biomass to short-term experimental warming in alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Appl. Soil Ecol.* 61, 158–160.

Simmons B.L. et Coleman D.C., 2008. Microbial community response to transition from conventional to conservation tillage in cotton fields. *Applied Soil Ecology* .40:518.

Singh K., 2015. Microbial and enzyme activities of saline and sodic soils. *Land degradation & development*. DOI: 10.1002/ldr.2385.

Sinsabaugh R.L.,Carreiro M.M., Rebert D.A.,2002. Allocation of extracellular enzymatic activity in relation to litter composition, N deposition, and mass loss. *Biogeochemistry*.60,1–24.

Sinsabaugh R.L, Moorhead D.L., 1994. Resource allocation to extracellular enzyme production: a model for nitrogen and phosphorus control of litter decomposition. *Soil Biology & Biochemistry* 26, 1305–1311.

Shrestha K., Stevens S., Shrestha P., Adetutu E.M., Walsh K.B., Ball A.S. et Midmore D.J., 2015. Characterisation of the soil microbial community of cultivated and uncultivated vertisol in Australia under several management regimes. *Agric. Ecosyst. Environ.*199, 418-427.

Références bibliographiques

Shrivastava P. et Kumar R., 2015. La salinité du sol : un grave problème environnemental et bactéries favorisant la croissance de plantes comme l'un des outils pour sa réduction. *Arabie Journal of Biological Sciences* 22,123-131.

Smith J.L., McNeal B.L., Cheng H.H., Campbell G.S., 1986. Calculation of microbial maintenance rates and net nitrogen mineralization in soil at steady-state. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50,332 - 338.

Smith J.L. et Paul E.A., 1990. The significance of soil microbial biomass estimations. *Soil Biochem.* 6, 357-396.

Soltner D., 2003. Les bases de la production végétale, le sol et son amélioration. Tome I, modifier la collection science technique agricole, 472 p.

Sorensen L., 1997. The rhizosphere as a habitat for soil microorganisms. In: Van Elsas J.D, Trevors I. T. & Wellington E. M. H. (eds) *Modern soil microbiology*. Marcel Dekker, INC. New York. 21-45.

Soulides D.A. et Allison F.E., 1961. Effect of drying and freezing soils on carbon dioxide production, available mineral nutrients, aggregation, and bacterial population. *Soil Sci.*, 91, 291-298.

Sparling G.P., Milne J.D.G. et Vincent K.W., 1987. Effect of moisture regime on the microbial contribution to Olsen phosphorus values. *N. Z. J. Agric. Res.*, 30, 79-84.

Spedding T.A., Hamel C., Mehuys G.R., et Madramootoo C.A., 2004. Soil microbial dynamics in maize-growing soil under different tillage and residue management systems. *Soil Biology & Biochemistry* 36,499-512.

Standing D. et Killham K., 2007. The soil environment. In *Modern soil microbiology*. 2nd ed. Van Elsas J.D., Jansson, J.K. et Trevors J.T. (eds). Boca Raton: CRC Press. 1-21.

Stevenson F.J., 1994. *Humus chemistry. Genesis, Composition, Reactions*. New York, USA: John Wiley & Sons Inc.

Stolp, H., 1988. *Microbial Ecology: organisms, habitats, activities*: Cambridge University Press. New York. 308 p.

Stott D.E., Andrews S.S., Liebig M.A., Wienhold Brian J. et Karlen, D. L., 2009. Evaluation of β -Glucosidase Activity as a Soil Quality Indicator for the Soil Management Assessment Framework". Publications from USDA-ARS / UNL Faculty. Paper 1222.

Stotzky, G., 1997. Soil as an Environment for microbial life. In: Van Elsas I. D, Trevors I. T. & Wellington E. M. H. (eds) *Modern soil microbiology*. Marcel Dekker, INC. New York. 1-20.

Sugihara S., Funakawa S., Kilasara M. et Kosaki T., 2010. Effect of land management and soil texture on seasonal variations in soil microbial biomass in dry tropical agroecosystems in Tanzania. *Appl. Soil Ecol.* 44, 80-88.

Références bibliographiques

- Sun B., Jia S., Zhang S., McLaughlin N.B, Zhang X., Liang A., Chen X., Wei S. et Liu S., 2016. Tillage, seasonal and depths effects on soil microbial properties in black soil of Northeast China. *Soil & Tillage Research* 155,421–428
- Szabo L., Marton M., Varga L., 1964. Untersuchungen über die Heitzresistenz, Temperatur und Feuchtigkeitansprüche der Mikroorganismen eines mullartigen Waldrensabodens, *Pedobiologia*, 4, 43–66.
- Tabatabai M.A., 1994. Soil enzymes. p. 835–864. In R.W. Weaver et al. (ed.) *Methods of soil analysis. Part 2. Microbiological and biochemical properties.* SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI
- TAD., 2002. Rapport d'étude de réalisation d'un plan de gestion des zones humides chott Ouargla. Ed. Conservation générale des forêts, Ouargla. 75 p.
- Tally F.P., Stewart P.R., Sutter V.L. et Rosenblatt J.E., 1975. Oxygen tolerance offresh clinical anaerobic bacteria. *J. Clin. Microbio.*, 1,161-4.
- Tate R. L., 1995. *Soil microbiology.* John Wiley & Sons, Inc. New Jersey. USA. 398 p.
- Tebrügge F. et Düring R.A., 1999. Reducing tillage intensity – A review of results from a long-term study in Germany. *Soil & Tillage Research*, 53,15-28.
- Theodorakopoulos N., 2013. Analyse de la biodiversité bactérienne d'un sol contaminé de la zone d'exclusion de Tchernobyl et caractérisation de l'interaction engagée par une souche de *Microbacterium* avec l'uranium. Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille, 190p.
- Theng B.K., Tate K.R. et Sollins P., 1989. Constituents of organic matter in temperat and tropical soils. In Coleman D.C., Oades J. M. & Uehara G. (eds) *Dynamics of soil organic matter in Tropical Ecosystems.* University of Hawaii. 5-31.
- Thomashow L.S., Weiler D.M., Bonsall R.F. et Pierson L. S., 1990. Production of the antibiotic phenazine-1-carboxylic acid by fluorescent *Pseudomonas* speccies in the rhizosphere of wheat. *Applied and Environmental Microbiology* 56, 908-912.
- Thorn G., 1997. The fungi in soil. In: Van Elsas J.D, Wellington EMH, Trevors ST (Eds. *Modern Soil Microbiology*, New York Marcel Dekker.63-127.
- Toutain G., 1973. La micro-exploitation phoenicole saharienne face au developpement. *CIHEAM, Options méditerranéennes.* 26, 73-81.
- Toutain G., 1974. Conservation des sols en palmeraies sahariennes et bordurières au Sahara. *CIHEAM- Options méditerranéennes.* 25, 65-69.
- Trasar Cepeda C., Leiros M.C. et Gil-Sotres F., 2008. Hydrolytic enzyme activities in agricultural and forest soils. Some implications for their use as indicators of soil quality. *Soil Biol. Biochem.* 40, 2146-2155.

Références bibliographiques

Trevors J.T. et 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.

Troeh F.R. et Thompson L.M., 2005. Les sols et la fertilité du sol. 6e éd., Oxford UK : Blackwell Publishing.

Trolez G., 1995. Métabolisme oxydatif et réducteur des bactéries du soufre dans le péloïde de Luchon. Thèse doctorat, Université de Montpellier I.

Tu, C., Louws, F.J., Creamer, N.G., Mueller, J.P., Brownie, C., Fager, K., Bell, M., Hu, S., 2006. Responses of soil microbial biomass and N availability to transition strategies from conventional to organic farming systems. Agriculture, Ecosystems and Environment 113, 206–215.

UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization), 1972 - Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional, Rapport sur les résultats du Projet REG-100, Paris, 116p.

UNESCO., 2003. Le Sahara des cultures et des peuples. Vers une stratégie pour un développement durable du tourisme au Sahara dans une perspective de lutte contre la pauvreté. Division des politiques culturelles et du dialogue interculturel ; Paris, 2003.

Urbanski J. A., Wochna A. et Herman A., 2011. Automated Granulometric Analysis And Grain-Shape Estimation Of beach Sediments Using Object-Based Image Analysis. Journal Of Coastal Research, SI 64 (Proceedings Of The 11th international Coastal Symposium), Szczecin, Poland, ISSN 0749-0208.

U.S.S.L., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U. S. Salinity Laboratory, U.S. Dept. Agr. Handbook, 60, Washington, 160 p.

Vagnerova K., Macura J. et Catska V., 1960. Rhizosphere microflora of wheat. I. Composition and properties of bacterial flora during the first stages of wheat growth, Folia Microbiol. Praha, 5, 298–310.

Vance E.D., Brookers P.C., Jenkinson D.S., 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. Soil biology & biochemistry 19, 703-707

Van der Heijden M.G.A., Bardgett R.D., et van Straalen N.M., 2008. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. Ecol.Lett. 11: 296-310.

Van Gestel M., Ladd J.N. et Amato M., 1992. Microbial biomass responses to seasonal change and imposed drying regimes at increasing depths of undisturbed topsoil profiles. Soil Biol. Biochem. 24, 103-111.

Van Veen J.A., Ladd J.N., Martin J.K., Amato M., 1987. Chiffre d'affaires de carbone, d'azote et de phosphore par la biomasse microbienne dans les sols incubés avec du ¹⁴C-, ¹⁵N et ³²P étiquetés cellules bactériennes. Soil Biol. Biochem. 19, 559-565.

Références bibliographiques

- Van Overbeek L. et Van Elsas J. D., 1997. Adaptation of bacteria to soils conditions: applications of molecular physiology in soil microbiology. In: Van Elsas J. D, Trevors J. T. & Wellington E. M. H. (eds) Modern soil microbiology. Marcel Dekker, INC. New York. 441-477.
- Vian, 2009. Comparaison de différentes techniques de travail du sol en agriculture biologique : effet de la structure et de la localisation des résidus sur les microorganismes du sol et leurs activités de minéralisation du carbone et de l'azote. PhD thesis, ISARA-Lyon, Agro Paris Tech, 171p.
- Vieillefont J., 1979. Contribution à l'étude analytique des sols gypseux. Cahier ORSTOM. Vol XVIII. N°3, 195-222.
- Voroney R.P., Winter J.P. et Gregorich E.G., 1991. Microbe / plant soil interactions. p. 77-99. In D.C. Coleman and B. Fry (ed) Carbon isotope techniques. Academic Press, New York.
- Wagner M., Roger A.J., Flax J.L., Brusseau G.A., Stahl D.A., 1998. Phylogeny of dissimilatory sulfite reductases supports an early origin of sulfate respiration. J. Bacteriol., 180, 2975-82.
- Waldrop M.P. et Firestone M.K., 2004. Altered utilization patterns of young and old soil C by microorganisms caused by temperature shifts and N additions. Biogeochemistry 67, 235-248.
- Wang Q.K., IL T.X., Wang S.L. et Liu L., 2013. Les apports de carbone manipulation affecte la respiration du sol et la composition de la communauté microbienne dans une forêt de conifères forêt subtropicale. Agric. Pour. Meteorol. 178, 152-160.
- Wang W.J., Dalal R.C., Moody P.W. et Smith C.J., 2003. Relationships of respiration to microbial biomass, substrate availability and clay content. Soil Biol. Biochem., 35, 273-284.
- Wardle D.A., 1992. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil. Biol. Rev. 67, 321-358.
- Wardle D.A. et Parkinson D., 1990. Interactions between microclimatic variables and the soil microbial biomass. Biol. Fertility Soils. 9, 273-280.
- Waring R.H. et Schlesinger W.H., 1985. Forest ecosystems: concepts and management. Academic Press, Orlando, FL
- West A. W., Sparling G. P., Spear T.W. et Wood J.M., 1988. Comparison of microbial C, N-flush and ATP, and certain enzyme activities of different textured soils subject to gradual drying. Aust. J. Soil Res, 26, 217-229.
- Widdel F. et Pfennig N., 1977. A new anaerobic, sporing, acetate-oxidizing, sulfate-reducing bacterium, *Desulfotomaculum* (emend.) acetoxidans. Arch. Microbiol. 112, 119-122.
- Wind T., Stubner S. et Conrad R., 1999. Sulfate-reducing bacteria in rice field soil and on rice roots. Syst Appl Microbiol 22, 269-279.

Références bibliographiques

- Woese C., 1998 the universal ancestor. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 95, 6854.
- Wong V.N.L, Dalal R.C, Greene R.S.B. 2008. Salinity and sodicity effects on respiration and microbial biomass of soil. *Biology and Fertility of Soils*, 44,943–953.
- Wright A.L., Hons F.M., Matocha J. et John E., 2005. Tillage impacts on microbial biomass and soil carbon and nitrogen dynamics of corn and cotton rotations. *Applied Soil Ecology* 29, 85-92.
- Wu M., Ward N.L., Challacombe J.F., Janssen P.H., Henrissat B., Coutinho P.M., 2009. Three Genomes from the Phylum Acid bacteria Provide Insight into the Lifestyles of These Microorganisms in Soils. *Appl. Environ. Microbiol.* 75: 2046-2056.
- Yan D., Wu Y., Yang Y., Belenkaya T Y., Tang X., Lin X., 2010. The cell-surface proteins Dally-like and Ihog differentially regulate Hedgehog signaling strength and range during development.
- Yancey, P.H., Clark M.E., Hand S.C., Bowlus R.D., Somero G.N., 1982. Living with water stress: evolution of osmolyte systems. *Science*, 217, 1214-1222.
- Young I.M. et Ritz K., 2000. Tillage, habitat space and function of soil microbes. *Soil and Tillage Research* 53,201-213.
- Youcef F., Hamdi-aïssa B., Bouhadja M., Lamini K., 2014. Sur l'origine des croutes gypseuses du Sahara septentrional algérien- cas de la région de Ouargla, *Algerian journal of arid environment*, 4 (2),41-49
- Yuan B.C., Li Z.Z., Liu H., Gao M., Zhang Y.Y., 2007. Microbial biomass and activity in salt affected soils under arid conditions. *Applied Soil Ecology* 35,319–328.
- Zaafour M. D., 2012. Impact des décharges sauvages sur les Zones Humides de la région d'El-Tarf. Mémoire de Magister, Université Badji-Mokhtar Annaba, 153 p.
- Zahir Z.A., Malik MAR., Arshad M., 2001 Soil enzymes research: a review. *Online Journal of Biological Science* 1,299–307.
- Zahran, H.H., 1997. Diversity, adaptation and activity of the bacterial flora in saline environments. *Biol. Fertil. Soils*. 25, 211-223
- Zangré, B.V.C.A., 2000. Effets combinés du travail du sol et des amendements organiques sur la fertilité d'un sol ferrugineux tropical lessivé dans la région de Saria (zone centre du Burkina Faso), Mémoire IDR, 83p.
- Zatout M., 2012. Etude géochimique et minéralogique du chott de Ain El Beida et de la sebkha d'Oum Erraneb Cuvette de Ouargla - Bas Sahara. Mémoire de Magister, université Kasdi Merbah Ouargla, 133p.
- Zella L. et Smadhi D., 2006. Gestion de l'eau dans les oasis algériennes. *Larhyss Journal*: 149-156.

Références bibliographiques

Zhang B., Liang C., He H. et Zhang X., 2013. Variations in soil microbial communities and residues along an altitude gradient on the northern slope of Changai Mountain, China. PLoS One 8, 1–9.

Zombre P.N., 2006- Variation de l'activité biologique dans les zipella (sols nus) en zone subsaharienne du Burkina Faso et impact de la technique du zaï (techniques des poquets). Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 10 (2), 139 – 148.

دادة موسى م.ل، بوحفص م.ل (1995) مدخل لدراسة أثر التحولات الاقتصادية والاجتماعية على قطاع النخيل التقليدي وامندا ته في سرير (ITAS). وادي مئة - مذكرة تخرج لنيل شهادة مهندس دولة في الفلاحة – المعهد الفلاحي بورقلة

Annexes

Annexe 1

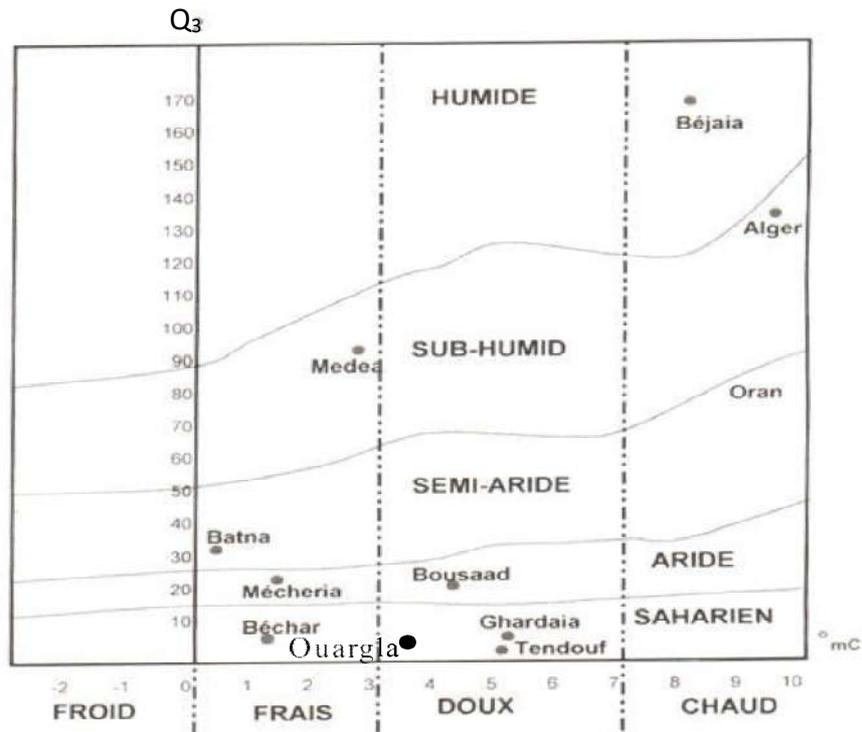


Figure 1. Localisation de Ouargla sur le climagramme d'Emberger (2004-2013)

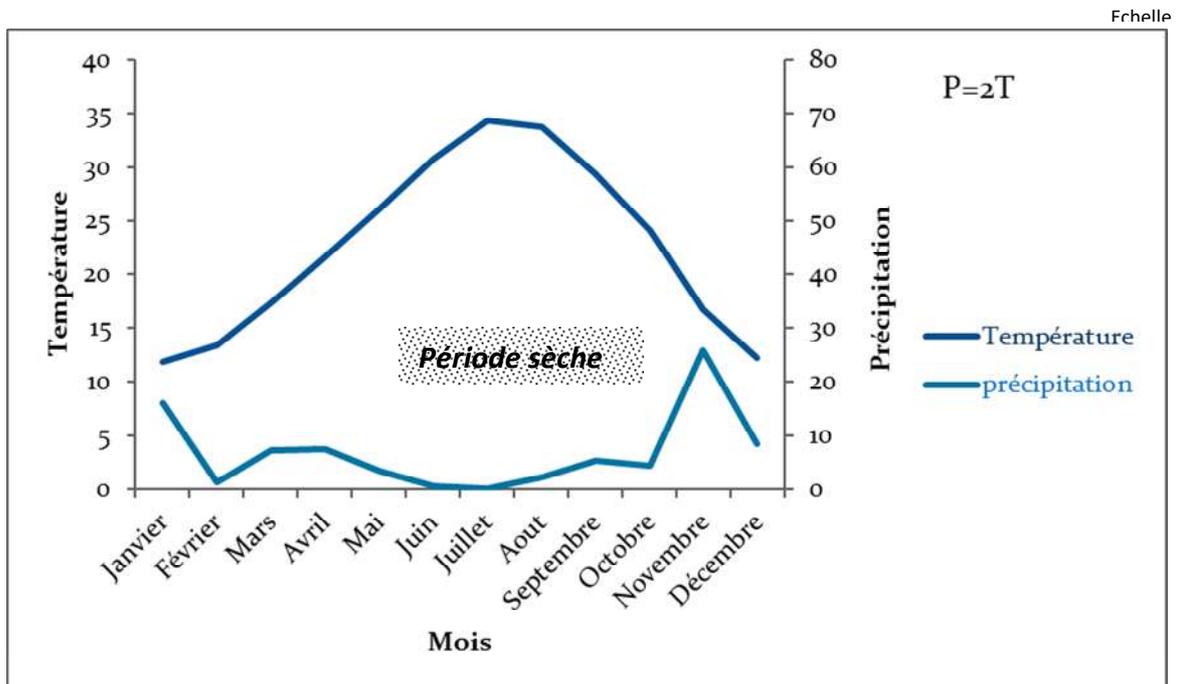


Figure 2. Diagramme ombrothermique de la région de Ouargla. (2004-2013)

Annexe 2

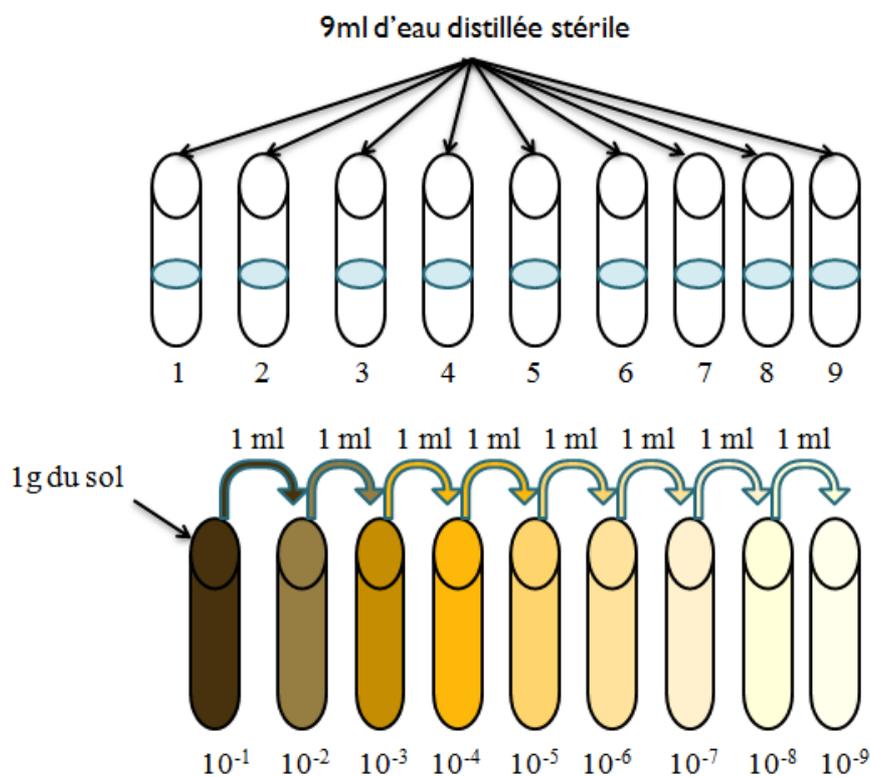
Principales caractéristiques des trois stations (palmeraies) étudiées

	Station 1	Station 2	Station 3
Aspect de surface du sol	Bon état	Moyennement dégradé (présence d'efflorescences salines)	Dégradé (importante efflorescences salines et de résidus du palmier dattier)
Ressources en eau	Forage «Baba Youcef » Débit : 21.9 l/s		Forage «Outâadja » Débit : 15 l/s
Principales cultures	Palmiers dattiers Arbres fruitiers : (grenadiers, figuiers, abricotiers, vigne) Cultures maraîchères (fève, épinards, ...) Cultures fourragères (luzerne, orge)	Palmiers dattiers Arbres fruitiers (grenadiers, figuiers)	Palmiers dattiers
Système de culture	Trois strates	Deux strates	Une seule strate
Pratiques culturales	Travaux d'entretien du sol : Travail de sol, fertilisation organique, l'apport de sable. Travaux d'entretien de palmeraie : Taille, nettoyage, pollinisation, traitement phytosanitaires.	Quelque travaux d'entretien de palmeraie : pollinisation des dattiers, récolte.	travaux d'entretien de palmeraie.
Irrigation	régulière et durable : (2 fois par semaine)	temporaire	absente

Annexe 3

Technique de suspension dilution (Pochon, 1954)

On réalise une suspension aussi homogène que possible de terre et à partir de cette suspension on prépare une série de dilution (Pochon, 1954), sachant que la suspension mère est 10^{-1} et la première dilution 10^{-2} et ainsi de suite. Les dilutions ainsi préparées doivent être utilisées immédiatement pour les ensemencements, ceux peuvent être faits sur milieux solides ou liquides qu'ils doivent satisfaire les exigences nutritives du microorganisme étudié (bactérie, actinomycète, champignon, algue, BSR).



Techniques de suspension dilution du sol

Annexe 4

Milieux de culture

A- Milieu de culture pour Bactéries (Pochon, 1954)

- Extrait de viande1g
- Extrait de levure2g
- Chlorure de sodium5g
- Peptone10g
- Agar-agar15g
- Extrait de terre.....100ml

Dissoudre les constituants dans un litre d'eau distillée, puis autoclaver à 121°C pendant 15 min.

B- Milieu PDA d'après Davet et al. (1985) :

- Pomme de terre200g
- Glucose20g
- Agar-agar20g

Le milieu est préparé suivant les étapes suivantes :

- Faire cuire 200g de pomme de terre pelée, lavée et coupée en tranches fines dans 500ml d'eau distillée pendant 1 heure.
- Filtrer sur plusieurs couches d'étamines pour presse.
- Ajouter le glucose et l'Agar à l'extrait.
- Compléter le volume à 1 litre avec de l'eau distillée.
- Autoclaver pendant 18mn à 121°C.

C- Milieu pour actinomycètes : milieu de Krainsky (Duche, 1934)

- Glucose10g
- Asparagine0.5g
- Phosphate Bipotassique (PO₄HK₂)0.5g
- Gélose15g
- Eau distillée1000ml

Ajusté à pH = 7

D- Milieu de culture des algues d'après Pochon (1954)

- Nitrate de calcium.....0.1g
- Phosphate Bipotassique.....0.4g
- Sulfate de Manganèse0.4g
- Perchlorure de fer.....traces
- Solution saline standard.....200ml
- Eau distillée.....800ml

E- Milieu de culture des Bactéries sulfato-réductrices (milieu Starkey, modifié par Abd-El-Malek (1958) et Pichinoty (1966).

- NH ₄ Cl	2g
- KH ₂ PO ₄	0,5g
- MgSO ₄ .7H ₂ O	2g
- Na ₂ SO ₄	4g
- Lactate de Sodium	10ml
- Extrait de levure	1g
- Eau distillée.....	1000ml

Le pH est ajusté à 6,5 par NaOH, le milieu est stérilisé 20 minutes à 110° C. Après répartition en flacon de type pénicilline, on ajoute dans chaque flacon, stérilement, un clou de 10 mm de long, stérilisé pendant 20 minutes dans une solution de H₂O₂, et séché à la flamme. L'incubation se fait à 28° C pendant 14 jours.

La préparation de ces milieux de culture selon Trabelsi et Chikhli, (1979) est comme suit :

- Dissoudre sous un bec bunsen les constituants de milieu dans une petite quantité d'eau distillée puis compléter le volume jusqu'à un litre.
- Ajuster le pH du milieu.
- Répartir le mélange dans des flacons, fermer et autoclaver à 112°C pendant 20mn.
- Conserver les milieux au réfrigérateur jusqu'au moment de l'utilisation.

F- Préparation de la solution saline standard d'après Pochon (1954)

- Phosphate Bipotassique.....	5g
- Sulfate de magnésium.....	2.5g
- Chlore de sodium.....	2.5g
- Sulfate ferrique.....	0.05g
- Sulfate de Manganèse.....	0.05g
- Eau distillée.....	1000ml

Amener à pH = 7.2 avec la lessive de potasse au 1/10, puis stériliser 20 mn à 112°C.

Avant utilisation, il faut remettre le milieu en suspension afin de disperser le précipité.

Préparation de l'extrait de terre :

- Choisir une terre assez riche (type terre de jardin) de pH neutre ou légèrement alcalin et, autant que possible, employer toujours la même terre.
- Mélanger à poids égal terre et eau du robinet (si elle n'est pas exagérément chlorée), ou mieux, eau de source ou de puits. Laisser macérer 24 h à la température du laboratoire. Porter à l'autoclave 1 h à 130°C. laisser décanter et filtrer à chaud sur papier. Vérifier le pH qui doit être voisin de la neutralité. Répartir en récipients bouchés au coton, stériliser 20 minutes à 112° C.

Annexe 5

Tables de Mac Grady

2 tubes par dilution		3 tubes par dilution					
Nombre caractéristique	Nombre de cellules	Nombre caractéristique	Nombre de cellules	Nombre caractéristique	Nombre de cellules	Nombre caractéristique	Nombre de cellules
000	0.0	000	0.0	201	1.4	302	6.5
001	0.5	001	0.3	202	2.0	310	4.5
010	0.5	010	0.3	210	1.5	311	7.5
011	0.9	011	0.6	211	2.0	312	11.5
020	0.9	020	0.6	212	3.0	313	16.0
100	0.6	100	0.4	220	2.0	320	9.5
101	1.2	101	0.7	221	3.0	321	15.0
110	1.3	102	1.1	222	3.5	322	20.0
111	2.0	110	0.7	223	4.0	323	30.0
120	2.0	111	1.1	230	3.0	330	25.0
121	3.0	120	1.1	231	3.5	331	45.0
200	2.5	121	1.5	232	4.0	332	110.0
201	5.0	130	1.6	300	2.5	333	140.0
210	6.0	200	0.9	301	4.0		
211	13.0						
212	20.0						
220	25.0						
221	70.0						
222	110.0						

5 tubes par dilution							
Nombre caractéristique	Nombre de cellules	Nombre caractéristique	Nombre de cellules	Nombre caractéristique	Nombre de cellules	Nombre caractéristique	Nombre de cellules
000	0.0	203	1.2	400	1.3	513	8.5
001	0.2	210	0.7	401	1.7	520	5.0
002	0.4	211	0.9	402	2.0	521	7.0
010	0.2	212	1.2	403	2.5	522	9.5
011	0.4	220	0.9	410	1.7	523	12.0
012	0.6	221	1.2	411	2.0	524	15.0
020	0.4	222	1.4	412	2.5	525	17.5
021	0.6	230	1.2	420	2.0	530	8.0
030	0.6	231	1.4	421	2.5	531	11.0
100	0.2	240	1.4	422	3.0	532	14.0
101	0.4	300	0.8	430	2.5	533	17.5
102	0.6	301	1.1	431	3.0	534	20.0
103	0.8	302	1.4	432	4.0	535	25.0
110	0.4	310	1.1	440	3.5	540	13.0
111	0.6	311	1.4	441	4.0	541	17.0
112	0.8	312	1.7	450	4.0	542	25.0
120	0.6	313	2.0	451	5.0	543	30.0
121	0.8	320	1.4	500	2.5	544	35.0
122	1.0	321	1.7	501	3.0	545	45.0
130	0.8	322	2.0	502	4.0	550	25.0
131	1.0	330	1.7	503	6.0	551	35.0
140	1.1	331	2.0	504	7.5	552	60.0
200	0.5	340	2.0	510	3.5	553	90.0
201	0.7	341	2.5	511	4.5	554	160.0
202	0.9	350	2.5	512	6.0	555	180.0

Liste des acronymes

Organismes et institutions

AFES	: Association Française des Etudes des Sol
AFNOR	: Association Française de Normalisation
ANRH	: Agence Nationale des Ressources Hydriques
BNEDER	: Bureau National des Etudes pour le Développement Rural
CDARS	: Commissariat au Développement Agricole des Régions Sahariennes
CPCS	: Comité Pédologique de la Classification Française des Sols
DPAT	: Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire
DSA	: Direction des Services Agricoles
FAO	: <i>Food and Agriculture Organization</i>
INRA	: Institut National de la Recherche Agronomique
ONM	: Office National de la Météorologie
USDA	: <i>United States Department of Agronomy</i>
WRB	: World Reference Base

Divers

ANOVA	: Analyse de variance
BSR	: Bactérie sulfatoréductrice
CE	: Conductivité électrique
CEC	: Capacité d'Echange Cationique
ESP	: <i>Exchangeable Sodium Percentage</i>
MO	: Matière Organique
PDA	: <i>Potato Dextrose Agar</i>
pF	: Potentiel Capillaire
SAR	: <i>Sodium Adsorption Ratio</i>

Liste de figures

N°	Titre	Page
1	Relation entre organismes, matière organique et roche mère dans le développement du sol (Paul et Clark, 1996)	07
2	Représentation schématique du rôle du compartiment microbien du sol (van der Heijden et <i>al.</i> , 2008)	12
3	Une comparaison de la micro-morphologie du genre <i>Streptomyces</i> (Bergey, 1989 in Aloui, 2014)	14
4	Champignons du sol (Dommergues et Mangenot, 1970)	15
5	Structure d'une oasis traditionnelle à trois étages	30
6	Situation géographique de la wilaya de Ouargla	42
7	Carte de situation de la cuvette de Ouargla (BG, 2004)	43
8	Coupe hydrogéologique du système aquifère CT et du CT (UNESCO, 1972)	45
9	Schéma géomorphologique de la vallée de Ouargla (BG, 2003)	45
10	Carte géologique de la région de Ouargla (BG, 2004)	47
11	Carte des états de surface des sols à Ouargla (Hamdi-Aïssa, 2001)	50
12	Localisation des zones d'étude dans la cuvette de Ouargla (A.N.R.H., 2005)	52
13	Photo satellitaire de l'exploitation de l'université (image Google Earth, 2015)	54
14	Photo satellitaire de la zone de Hassi Ben Abdallah (image Google Earth, 2015)	56
15	Situation du Chott de Ain El Beida (Image google Earth, 2016)	60
16	Plan d'échantillonnage du sol sous différents systèmes de culture au niveau de l'exploitation de Babziz à Hassi Benabdellah	63
17	Schéma d'échantillonnage du sol pour l'étude de la variabilité spatiale de l'activité et la biomasse microbienne sous culture de palmier dattier	66
18	Echantillons du sol pour l'étude du phénomène de sulfatoréduction dans le chott d'Ain Beida	67
19	Représentation graphique de la densité bactérienne du sol sous différents systèmes de culture exprimée en UFC.g ⁻¹ .s	85
20	Représentation graphique de la densité fongique du sol sous différents systèmes de culture exprimée en UFC.g ⁻¹ .s	88
21	Représentation graphique des valeurs du C _{microbien} du sol sous différents systèmes de culture	94
22	Représentation graphique des valeurs du N _{microbien} du sol sous différents systèmes de culture	95
23	Représentation graphique de l'activité enzymatique de la β-glucosidase du sol sous différents systèmes de culture	97
24	Représentation graphique de la densité de la microflore totale dans le sol labouré et le sol non labouré	106
25	Représentation graphique de la densité de la microflore bactérienne dans le sol labouré et le sol non labouré	108

26	Représentation graphique de la densité des champignons dans le sol labouré et le sol non labouré	109
27	Influence de la profondeur et du type de travail du sol sur la biomasse microbienne et sa répartition au sein du profil cultural (0-30 cm). Site expérimental de Thil où sont comparées différents régimes de travail du sol en agriculture biologique – ISARA-Lyon (Vian, 2009).	112
28	Représentation graphique de la densité des actinomycètes dans le sol labouré et le sol non labouré	113
29	Représentation graphique de la densité des différents groupes microbiens dans la Station 1 (palmeraie bien entretenue)	121
30	Représentation graphique de la densité des différents groupes microbiens dans la Station 2 (palmeraie moyennement entretenue)	122
31	Représentation graphique de la densité des différents groupes microbiens dans la station 3 (palmeraie mal entretenue)	124
32	Représentation graphique de la densité des différents groupes microbiens dans les trois stations en hiver	129
33	Représentation graphique de la densité des différents groupes microbiens dans les trois stations au printemps	129
34	Représentation graphique de la variabilité spatiale des densités bactériennes dans les différents points du sol étudié exprimée en UFC.g. ⁻¹ s.s.	136
35	Morphologie du palmier dattier sur schéma de Munier (1973).	137
36	Microphotographie observée au microscope optique présentant des bactéries d'une culture sur milieu solide inoculée par des dilutions provenant du P ₀ (A) et des autres points du sol (B). (Gross 10× 100).	138
37	Représentation graphique de la variabilité spatiale des densités fongiques dans les différents points du sol étudié exprimée en UFC.g. ⁻¹ s.s.	139
38	Représentation graphique de la variabilité spatiale du C _{microbien} et du N _{microbien} dans les différents points du sol étudié.	142
39	Représentation graphique de la variabilité spatiale de l'activité enzymatique de la β-glucosidase dans les différents points du sol étudié	145
40	Représentation graphique de la régression de la densité des différents groupes microbiens en hiver par rapport à l'automne	149
41	Microphotographies observées au microscope optique présentant les différents groupements microbiens d'une culture microbienne sur milieu solide (gélose à l'extrait de terre) inoculée par des dilutions provenant des sols échantillonnés (Gross x 400)	151
42	Les différentes formes de colonies de la microflore fongique, développées sur milieu solide PDA	152
43	Représentation graphique de la densité bactérienne dans les sols hydromorphes étudiés	160
44	Représentation graphique de la densité fongique dans les sols hydromorphes étudiés	162
45	Représentation graphique de la densité des bactéries sulfato-réductrices dans les sols hydromorphes étudiés	164
46	Couleur noire indiquant croissance positive des BSR après incubation	166

Liste des photos

N°	Titre	Page
1	Palmeraie bien entretenue (station 01)	58
2	Palmeraie moyennement entretenue (station 02)	58
3	Palmeraie mal entretenue (station 03)	58
4	Parcelle labourée à moitié	64

Liste des tableaux

N°	Titre	Page
1	Données climatiques de Ouargla (2004-2013)	44
2	Aquifères du CI et CT à Ouargla (ANRH, 2004)	48
3	Caractéristiques physico-chimiques du sol sous les différents systèmes de cultures étudiés	78
4	Densité des microorganismes du sol sous les différents systèmes de culture étudiés	83
5	Analyse de la variance pour la variable bactéries du sol sous différents systèmes de culture	85
6	Test de Fisher (LSD) / Analyse des différences entre les modalités avec intervalle de confiance à 95% (variable bactéries du sol sous les différents systèmes de culture étudiés)	86
7	Analyse de la variance pour la variable champignons du sol sous les différents systèmes de culture étudiés	89
8	Test de Fisher (LSD) / Analyse des différences entre les modalités avec intervalle de confiance à 95% (variable Champignons du sol sous les différents systèmes de culture étudiés)	89
9	Résultats de la biomasse microbienne ($C_{\text{microbien}}$ et $N_{\text{microbien}}$) dans les sols sous les différents systèmes de culture étudiés	92
10	Analyse de la variance pour la variable $C_{\text{microbien}}$ du sol sous les différents systèmes de culture étudiés	93
11	Test de Fisher (LSD)/ Analyse des différences entre les modalités avec intervalle de confiance à 95% (variable $C_{\text{microbien}}$ du sol sous les différents systèmes de culture étudiés)	93
12	Analyse de la variance pour la variable $N_{\text{microbien}}$ du sol sous les différents systèmes de culture étudiés	95
13	Test de Fisher (LSD)/ Analyse des différences entre les modalités avec intervalle de confiance à 95% (variable $N_{\text{microbien}}$ du sol sous les différents systèmes de culture étudiés)	96
14	Analyse de la variance pour la variable β -glucosidase du sol sous les différents systèmes de culture étudiés	98
15	Test de Fisher (LSD)/ Analyse des différences entre les modalités avec intervalle de confiance à 95% (variable β -glucosidase dans les sols des différents systèmes de culture étudiés)	98
16	Analyses physico-chimiques du sol labouré et du sol non labouré	102
17	Densité des microorganismes dans le sol labouré et le sol non labouré	105
18	Caractéristiques physico- chimiques (Station 1 : palmeraie bien entretenue)	116
19	Caractéristiques physico-chimiques (Station 2 : palmeraie moyennement	118

	entretenu)	
20	Caractéristiques physico-chimiques (Station3 : palmeraie mal entretenue)	119
21	Densité des microorganismes dans les sols des 3 stations étudiés	120
22	Caractéristiques des analyses physico-chimiques des différents points du sol étudié	133
23	Résultats de la densité des microorganismes dans les différents points du sol étudié	135
24	Analyse de la variance de la variabilité spatiale des bactéries dans les différents points du sol	136
25	Test de Fisher (LSD)/ Analyse des différences entre les modalités avec intervalle de confiance à 95% (variabilité spatiale des bactéries)	136
26	Analyse de la variance de la variabilité spatiale des champignons dans les différents points du sol	140
27	Test de Fisher (LSD)/ Analyse des différences entre les modalités avec intervalle de confiance à 95% (variabilité spatiale des champignons)	140
28	Variabilité spatiale des valeurs du $C_{\text{microbien}}$ et du $N_{\text{microbien}}$ dans les différents points du sol	141
29	Analyse de la variance de la variabilité spatiale du $C_{\text{microbien}}$ dans les différents points du sol	141
30	Analyse de la variance de la variabilité spatiale du $N_{\text{microbien}}$ dans les différents points du sol	141
31	Analyse de la variance de la variabilité spatiale de l'activité de la β -glucosidase dans les différents points du sol	144
32	Caractéristiques physico-chimiques de la couche superficielle (0-30cm) du sol prélevé dans les deux saisons	147
33	Densité des principaux groupes microbiens du sol prélevé dans les deux saisons exprimée en (UFC g.s.s ⁻¹)	148
34	Résultats des analyses physico-chimiques des différents sols hydromorphes étudiés	156
35	Densités microbiennes des différents sols hydromorphes étudiés	160
36	Analyse de la variance (Bactéries)	161
37	Test de Fisher (LSD)/ Analyse des différences entre les modalités avec intervalle de confiance à 95% (Bactéries)	161
38	Analyse de la variance (Champignons)	162
39	Test de Fisher (LSD)/ Analyse des différences entre les modalités avec intervalle de confiance à 95% (Champignons)	163
40	Analyse de la variance (BSR)	164
41	Test de Fisher (LSD)/ Analyse des différences entre les modalités avec intervalle de confiance à 95% (BSR)	165
42	Teneurs en $C_{\text{microbien}}$ et $N_{\text{microbien}}$ et rendement microbien pour les différents sols hydromorphes étudiés	169

Table des matières

DEDICACE ET REMERCIEMENTS

RESUMES

SOMMAIRE

INTRODUCTION 01

PREMIERE PARTIE. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I. Le sol, une ressource dynamique vivante 07

I.1. Les caractéristiques du sol 07

I.1.1. Les composantes du sol 08

I.1.1.1. La phase minérale 08

I.1.1.2. La phase organique 08

I.1.1.2.1. La fraction organique morte 09

I.1.1.2.1.1. La fraction organique labile 09

I.1.1.2.1.2. La fraction organique meuble ou légère 09

I.1.1.2.1.3. La fraction organique lourde 09

I.1.1.2.2. La fraction organique vivante 10

I.1.1.2.2.1. La faune du sol 10

I.1.1.2.2.2. Les organes souterrains des végétaux 10

I.1.1.3. La phase liquide 11

I.1.1.4. La phase gazeuse : atmosphère du sol 11

I.2. Les microorganismes du sol 11

I.2.1. Les micro-organismes, une source de diversité génétique 11

I.2.1.1. Bactéries 13

I.2.1.2. Actinobactéries 14

I.2.1.3. Champignons 15

I.3. Fonctionnement microbiologique du sol 16

I.3.1. Facteurs abiotiques régulant les communautés microbiennes 16

I.3.1.1. Humidité du sol 16

I.3.1.2. pH du sol 17

I.3.1.3. Température du sol 17

I.3.1.4. Énergie lumineuse 18

I.3.1.5. Facteurs énergétiques 18

I.3.1.6. Salure 18

I.3.1.7. Texture 19

I.3.1.8. Porosité du sol 19

I.3.1.9. Structure 20

I.3.1.10. Travail du sol 20

I.3.1.11. Influence des saisons 21

I.3.1.12. Influence des travaux agricoles 21

I.3.1.13. Chaux et engrais acidogènes 21

I.3.1.14. Amendements et fumures organiques	21
I.3.2. Facteurs biotiques régulant les communautés microbiennes	22
I.3.2.1. Le compartiment aérien	22
I.3.2.2. Le compartiment sous-terrain	23
I.3.2.2.1. Interactions entre organismes du sol (Le réseau trophique du sol)	25
I.3.2.2.2. Interactions entre les microorganismes et les plantes	27
I.3.2.2.2.1 Interactions non symbiotiques	27
I.3.2.2.2.2 Interactions symbiotiques	28
I.3.2.2.2.2.1. Les symbioses mycorhiziennes	28
I.3.2.2.2.2.2. Les Symbioses fixatrices d'azote	28
Chapitre II. L'écosystème oasien	29
II.1. Présentation de l'écosystème oasien	29
II.2. Les composantes biologiques du système oasien	30
II.2.1. Les cultures oasiennes	30
II.2.1.1. Le palmier dattier	31
II.2.1.2 Les arbres fruitiers	31
II.2.1.3. Les cultures de l'étage inférieur	31
II.2.2. La végétation naturelle	32
II.3. La gestion de l'eau dans les oasis	32
II.4. L'écosystème oasien En Algérie	32
II.4.1. Notion du système de culture	33
II.4.2. Principaux systèmes de culture dans la région de Ouargla	33
II.4.2.1. La phœniciculture	34
II.4.2.2. La serriculture	35
II.4.2.3. La céréaliculture	35
Chapitre III. Généralités sur les sols sahariens	36
III.1. Définition des Sols des zones arides	36
III.2. Caractéristiques générales des Sols des zones arides	36
III.3. Principaux sols dans les régions arides	37
III.3.1. Les sols salés	37
III.3.2. Les sols calcaires	37
III.3.3. Les sols gypseux	37
III.3.4. Les sols peu évolués	38
DEUXIEME PARTIE. CONDITIONS LIMITOPHES DE L'ACTIVITE MICROBIENNE DU SOL DANS LA REGION DE OUARGLA ET CADRE DE L'ETUDE	
Chapitre IV. Conditions limitrophes de l'activité microbienne du sol dans la région de Ouargla	39

IV.1. Salinisation (stress osmotique)	39
IV.2. Faible teneur en matière organique (stress énergétique)	40
IV.3. Texture grossière (stress minéralogique)	41
IV.4. Hydromorphie des sols	41
Chapitre V. Cadre de l'étude	42
V.1. Localisation géographique	42
V.2. Climat	43
V.3. Hydrographie	44
V.4. Géomorphologie	45
V.4.1. Les plateaux ou hamadas	46
V.4.2. Les glacis	46
V.4.3. Les chotts et les sebkhas	46
V.4.4. Dunes	46
V.5. Géologie	46
V.6. Hydrogéologie	47
V.7. Pédologie	48
V.8. Flore naturelle et faune	50
TROISIEME PARTIE. MATERIEL ET METHODES	
Chapitre VI. Matériel d'études	52
VI.1. Choix des sites d'études	52
VI.1.1. Zone I	52
VI.1.2. Zone II	52
VI.1.3. Zone III	53
VI.1.4. Zone VI	53
VI.2. Zone d'étude I	53
VI.2.1. Choix du site expérimental	53
VI.2.2. Échantillonnage	54
VI.2.3. Conduite culturale	54
VI.3. Zone d'étude II	55
VI.3.1. Choix du site expérimental	55
VI.3.2. Echantillonnage du sol	56
VI.3.3. Conduite culturale	56

VI.4. Zone d'étude III	57
VI.4.1. Choix des sites expérimentaux	57
VI.4.2. Échantillonnage du sol	57
VI.4.3. Conduite culturale	59
VI.5. Zone d'étude IV	59
VI.5.1. Choix du site expérimental	59
Chapitre VII. Méthodes d'études	62
VII.1. Approches méthodologiques	62
VII.1.1. Impact des systèmes de culture sur la densité et l'activité microbienne des sols	62
VII.1.2. Effet de certaines pratiques culturales sur la densité microbienne des sols oasiens	64
VII.1.2.1. Effet du travail du sol sur la densité microbienne des sols oasiens	64
VII.1.2.2. Effet de l'humidité du sol sur la densité des principaux groupes microbiens telluriques	65
VII.1.3. Variation spatiotemporelle de la densité et l'activité microbienne des sols des palmeraies	65
VII.1.3.1. Variabilité spatiale de l'activité et la biomasse microbienne sous culture de palmier dattier	65
VII.1.3.2. Variations saisonnières de la densité microbienne des sols des palmeraies	66
VII.1.4. Mise en évidence des bactéries sulfato-réductrices dans les sols oasiens	67
VII.2. Méthodes d'analyses	68
VII.2.1. Analyses des sols	68
VII.2.1.1. Caractéristiques abiotiques	68
VII.2.1.1.1. Humidité	68
VII.2.1.1.2. Densité apparente (Da)	69
VII.2.1.1.3. Granulométrie	69
VII.2.1.1.4. pH	69
VII.2.1.1.5. Calcaire total	69
VII.2.1.1.6. Gypse	69
VII.2.1.1.7. Conductivité électrique (CE)	70
VII.2.1.1.8. Dosage du carbone organique	70
VII.2.1.1.9. Dosage de l'azote total	70
VII.2.1.1.10. Mesure de la DCO	71
VII.2.1.1.11. Mesure de la DBO ₅	71
VII.2.1.2. Caractéristiques biotiques	71
VII.2.1.2.1. Biomasse microbienne (Fumigation-extraction)	71
VII.2.1.2.1.1. Analyse du C _{microbien}	72
VII.2.1.2.1.2. Analyse du N _{microbien}	72
VII.2.1.2.2. Dénombrement de la microflore tellurique par la méthode de suspension-dilution	73
VII.2.1.2.2.1. Microflore bactérienne	73
VII.2.1.2.2.2. Microflore fongique	74
VII.2.1.2.2.3. Actinobactéries	74
VII.2.1.2.2.4. Microflore algale	74

VII.2.1.2.2.5. Bactéries sulfato-réductrices (BSR)	75
VII.2.1.2.3. Évaluation de l'activité enzymatique du sol	76
VII.2.1.3. Analyses statistiques	76

TROISIEME PARTIE. RESULTATS ET DISCUSSION

Chapitre VIII. Effets de quelques systèmes de culture sur la diversité microbienne des sols oasiens	77
VIII.1. Introduction	77
VIII.2. Caractéristiques abiotiques	78
VIII.3. Caractéristiques biotiques	82
VIII.3.1. Densité microbienne	82
VIII.3.1.1. Densité bactérienne	85
VIII.3.1.2. Champignon	88
VIII.3.2. $C_{\text{microbien}}$ et $N_{\text{microbien}}$	92
VIII.3.3. Activité enzymatique	96
VIII.4. Conclusion	99
Chapitre IX. Effets de quelques pratiques culturelles sur la densité microbienne de quelques sols oasiens	101
IX.1. Effet du travail du sol	101
IX.1.1. Introduction	101
IX.1.2. Caractéristiques abiotiques	103
IX.1.3. Caractéristiques biotiques	105
IX.1.3.1. Microflore totale	105
IX.1.3.2. Densité bactérienne	107
IX.1.3.3. Densité fongique	108
IX.1.3.4. Actinomycètes	112
IX.1.4. Conclusion	113
IX.2. Effet de l'humidité du sol sur la densité microbienne	115
IX.2.1. Introduction	115
IX.2.2. Caractéristiques abiotiques	116
IX.2.2.1. Station1 : palmeraie bien entretenue	116
IX.2.2.2. Station 2 : palmeraie moyennement entretenue	118
IX.2.2.3. Station3 : palmeraie mal entretenue	119
IX.2.3. Caractéristiques biotiques	120
IX.2.3.1. Station1 (palmeraie bien entretenue)	121
IX.2.3.2. Station 2 (palmeraie moyennement entretenue)	122
IX.2.3.3. Station 3 (palmeraie mal entretenue)	124
IX.2.4. Discussion et conclusion	128
Chapitre X. Variations spatio-temporelles de la biomasse microbienne dans les sols oasiens	131
X.1. Variabilité spatiale de l'activité microbienne sous culture de palmier dattier	131

X.1.1. Introduction	131
X.1.2. Caractéristiques abiotiques	132
X.1.3. Caractéristiques biotiques	135
X.1.3.1. Densité microbienne	135
X.1.3.1.1. Densité bactérienne	135
X.1.3.1.2. Densité fongique	139
X.1.3.2. $C_{\text{microbien}}$ et $N_{\text{microbien}}$	141
Rendement microbien	143
X.1.3.3. Activité enzymatique	143
X.1.3.4. Conclusion	146
X.2. Effet des variations saisonnières sur la densité microbienne des sols oasiens	147
X.2.1. Introduction	147
X.2.2. Caractéristiques abiotiques	147
X.2.3. Caractéristiques biotiques	148
X.2.3.1. Densité bactérienne	149
X.2.3.2. Densité fongique	151
X.2.3.3. Densité des actinobactéries	153
X.2.3.4. Densité Algale	153
X.2.4. Discussion	153
X.2.5. Conclusion	154
Chapitre XI. Mise en évidence du phénomène de sulfato-réduction dans les sols oasiens	155
XI.I. Introduction	155
XI.2. Caractéristiques abiotiques	156
XI.3. Caractéristiques biotiques	160
XI.3.1. Densité bactérienne	160
XI.3.2. Densité fongique	162
XI.3.3. Les bactéries sulfato – réductrices (BSR)	164
XI.3.4. $C_{\text{microbien}}$ et $N_{\text{microbien}}$	168
Rendement microbien	169
XI.4. Conclusion	170
CONCLUSION GENERALE	172
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	180
ANNEXES	216
LISTE DES TABLEAUX	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES PHOTOS	