



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université des Frères Mentouri Constantine
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

جامعة الإخوة منتوري قسنطينة
كلية علوم الطبيعة و الحياة

Département : Microbiologie

قسم : الميكروبيولوجيا

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : Biologie Moléculaire des Microorganismes

Intitulé :

Aperçu général sur la microflore bactérienne des déserts chauds (étude de cas : Algérie et Maroc)

Rédigé par : *DJEBBAR Manel*

BENSEBBANE Nada

Jury d'évaluation :

Présidente du jury : *Mme GUERGOURI Ibtissem* (MAA- UFM Constantine).

Rapporteur : *Melle ARABET Dallel* (MCA - UFM Constantine).

Examinatrice : *Mme ZERMANE Ferial* (MAA- UFM Constantine).

Année universitaire
2019 - 2020

Remerciements

Nous remercions tout d'abord le bon dieu qui nous a donné le courage et la patience pour terminer ce modeste travail.

*Nous exprimons nos remerciements et notre profonde gratitude à notre encadrant **Melle. ARABET Dallel** pour avoir accepté de diriger ce travail, pour l'aide qu'elle nous a apporté, son entière disponibilité et sa patience.*

*Nos vifs remerciements s'adressent aux membres de jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail **Mme. GUERGOURI Ibtissem** pour l'honneur qu'elle nous a fait d'avoir accepté de présider le jury d'examination, **Mme. ZERMANE Feriel** pour l'honneur qu'elle nous a accordé en examinant ce modeste travail.*

Nous exprimons également notre gratitude à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation universitaire.

Un grand merci à nos familles, à nos parents pour leur soutien, leurs encouragements et leur patience durant ces années d'études.

Enfin, merci à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

*Je dédie le fruit de ce modeste travail comme geste de
gratitude à :*

*Mes chers parents pour leur soutien et encouragements tout
au long de mes études,*

Ma chère sœur Soulef

Mes chers frères Abderraouf et Houssem

*Mes chères cousines : Ramla, Feriel, Raouda, Ines, Nesrine,
Sara, Khadija*

A toute ma famille chacun en son nom.

A mes adorables amies : Wissem, Radia, Doussa, Aya

A mon binôme : Nada

*Sans oublier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à
la réalisation de ce travail.*

Manel

Dédicaces

Ce modeste travail achevé avec l'aide de dieu le tout puissant, est dédié à tous ceux qui m'ont soutenue soit de près ou de loin.

A mes chers parents qui m'ont appris le sens de la persévérance tout au long de mes études, pour leur patience, sacrifices, soutiens, conseils et encouragements.

A ma chère sœur Khadidja

A mes chers frères : Mohamed Rafik, Housseem et Anis

A toute ma famille chacun en son nom

A tous mes amies en particuliers : Sandra, Lília, Inssaf et

Sonia

A mon binôme : Manel

Nada

Résumé

Le présent travail est une contribution qui apporte un aperçu sur l'étude de la diversité des souches bactériennes résistantes aux conditions extrêmes d'un sol saharien. Ces dernières ne sont jusqu'à présent pas assez étudiées notamment en ce qui concerne le nord africain. Les déserts de l'Algérie et du Maroc ont fait l'objet de quelques études non exhaustives parmi lesquelles nous avons choisi deux à analyser. Dans la première étude, des échantillons de différents côtés d'une dune du sud algérien (Région de Biskra) ont été collectés. Puis, ils ont subi des analyses physico-chimiques et des analyses microbiologiques. Les résultats des analyses physico-chimiques ont montré que l'ensemble des échantillons du sol étudié sont caractérisés par un taux d'humidité faible avec une moyenne de 4,92%, un taux de matière organique de 3,09% qu'est élevé par rapport au type de sol saharien qui en général ne dépassent pas 1%, ainsi qu'un pH qui tourne au tour de la neutralité (environ 7,37). De l'autre côté, les résultats des analyses microbiologiques ont révélé la présence de huit souches bactériennes d'aspects macroscopiques distincts. Ces dernières ont été distribuées de manière hétérogène sur la totalité de la dune sous l'influence de divers facteurs (caractéristiques physico-chimiques du sol, climat, couvert végétal, ...) ainsi que la capacité de résistance des bactéries au changement de ces paramètres. La majorité des souches isolées étaient des bacilles à Gram positif. En ce qui concerne la deuxième étude qui a été réalisée au Maroc, une caractérisation phénotypique suivie par des analyses génotypiques ont permis d'identifier 240 isolats thermophiles. Tous les isolats étaient à Gram positif, en forme de bâtonnet, sporulés et halotolérants alors que 225 isolats étaient positifs à la catalase et à l'oxydase. D'après le séquençage des gènes de l'ARNr 16S et la BOXA1R-PCR, les isolats récupérés étaient dominés par le genre *Bacillus* (97,5%). De plus, 71,25%, 50,41% et 5,41% des souches totales présentaient respectivement une activité amylolytique, protéolytique ou cellulolytique élevée. Malgré les conditions défavorables liées à la nature du sol et au climat, l'activité bactérienne dans les sols désertiques sahariens bien qu'elle soit faible, elle persiste.

Mots clés : Sol saharien, Microflore bactérienne d'un sol désertique, Conditions extrêmes, Activité enzymatique.



Abstract

This work is a contribution in purpose to give an overview about the diversity of bacterial strains resistant to extreme conditions in Saharian soils which are poorly studied particularly in North Africa. Some non-exhaustive studies were realized in Algerian and Moroccan soils, we chose two to be analyzed. In the first study, soil samples were taken from different sides of a dune in southern Algeria (Biskra Region). Then, they underwent to a physico-chemical and microbiological analyzes. The results of the physico-chemical analyzes showed that all the soil samples studied are characterized by a low humidity rate with an average of 4.92%, an organic matter rate of 3.09% which is high compared to the type of Saharian soil generally not more than 1%, and a pH of 7.37 which is a neutral pH. On the other side, the results of microbiological analyzes revealed the presence of eight bacterial strains with distinct macroscopic aspects. These strains were distributed in a heterogeneous manner over the entire dune under the influence of several factors (soil physico-chemical characteristics, climate, plant cover,) as well as the ability of bacteria to resist the change of these parameters. The majority of strains isolated were Gram positive bacilli. Regarding the second study carried out in Morocco, a phenotypic characterization followed by genotypic analyzes allowed to identify 240 thermophilic bacteria. All isolates were Gram positive, rod-shaped, spore forming and halotolerant while 225 isolates were positive for catalase and oxidase. Based on BOXA1R-PCR and 16S rRNA gene sequencing, the recovered isolates were dominated by the genus *Bacillus* (97.5%). Moreover, 71.25%, 50.41% and 5.41% of total strains exhibited high amyolytic, proteolytic or cellulolytic activity respectively. Despite the unfavorable conditions linked to the nature of the soil and the climate, bacterial activity in Saharian desert soils, is weak but still persists anymore.

Key words: Saharian soil, Bacterial microflora of a desert soil, Extreme condition, Enzymatic activity.

ملخص

هذا العمل هو مساهمة في تقديم نظرة عامة عن دراسة تنوع السلالات البكتيرية المقاومة للظروف القاسية للتربة الصحراوية. هذه الأخيرة لم تكن موضوع بحث الكثير من الدراسات خاصة بالنسبة لصحراء شمال افريقيا. قمنا باختبار دراستين احدهما اجريت بصحراء الجزائر و الاخرى بصحراء المغرب. في الدراسة الأولى ، تم أخذ عينات من التربة من الجوانب المختلفة لكثبة رملية تقع في جنوب الجزائر (منطقة بسكرة). بعد ذلك خضعت هذه العينات لتحاليل فيزيائية، كيميائية، و ميكروبيولوجية. أظهرت نتائج التحاليل الفيزيائية و الكيميائية أن جميع عينات التربة التي تمت دراستها تتميز بمستوى رطوبة منخفض بمعدل 4.92%، نسبة المادة العضوية 3.09% والتي تعتبر مرتفعة مقارنة بنوع التربة الصحراوية الذي لا يتجاوز 1% على العموم. أما درجة الحموضة فهي معتدلة أي حوالي 7.37. من ناحية أخرى ، كشفت نتائج التحليلات الميكروبيولوجية عن وجود ثماني سلالات بكتيرية ذات مظاهر مجهرية مميزة. توزع هذه السلالات غير متجانس على كل جوانب الكثبة الرملية وهذا راجع لتأثير عدة عوامل (الخصائص الفيزيائية-الكيميائية للتربة ، المناخ، والغطاء النباتي. . .) وكذلك قدرة البكتيريا على مقاومة تغيرات هذه المعايير. أغلبية السلالات المعزولة كانت عبارة عن عصيات موجبة الغرام. فيما يتعلق بالدراسة الثانية التي اجريت في المغرب ، فإن الوصف للنمط الظاهري متبوع بتحليل النمط الجيني أمكننا من تحديد 240 سلالة بكتيرية محبة للحرارة . جميع السلالات البكتيرية كانت موجبة الغرام ، على شكل عصيات، ذات أبواغ و شديدة التحمل للملوحة ، بينما 225 سلالة كانت موجبة للكاتلاز و الأوكسيداز. كذلك، بناءً على التحليل الجيني ARNr 16S و BOXA1R-PCR ، فإن النوع الغالب هو *Bacillus* بنسبة 97.5%. بالإضافة إلى ذلك، 71.25% ، 50.41% و 5.41 من السلالات المعزولة تمتلك نشاطاً إنزيمياً عالياً في تحليل النشاء، البروتين، أو السليلوز على التوالي. على الرغم من الظروف الغير ملائمة المتعلقة بطبيعة التربة والمناخ ، فإن النشاط البكتيري في التربة الصحراوية ، وإن كان ضعيفاً، يبقى مستمراً.

الكلمات المفتاحية : التربة الصحراوية، بكتيريا التربة الصحراوية، الظروف الصعبة، النشاط الانزيمي.

Liste des abréviations	
ARNr 16S	Acide Ribonucleique ribosomale 16 Svedberg
CMA	Champignons Mycorhiziens à Arbuscules
E	Est
FAO	Food and Agriculture Organization
FTAM	Flore Totale Aérobie Mésophile
GC%	Pourcentage en Guanine/Cytosine (Coefficient de Chargaff)
LB	Luria Bertani
MO	Matière Organique
N	Nord
O	Ouest
OMT	Organisation Mondiale de Tourisme
pH	Potentiel d'Hydrogène
S	Sommet
S (chiffre)	Souche et le chiffre indique le numéro de souche
Su	Sud
TSA	Tryptone Soja
UFC	Unité Formant Colonie
UV	Ultra –violet
V	Végétation
% H₂O	Pourcentage d'humidité

Liste des figures		
Figure 01	Carte des déserts du monde	Page 4
Figure 02	Distribution mondiale des déserts : déserts chauds et froids	Page 4
Figure 03	Le fameux désert froid, le désert de Gobi recouvert d'une épaisse croûte de glace	Page 5
Figure 04	Dunes de sable dans le désert du Sahara, Algérie	Page 6
Figure 05	<i>Schouwia thebaica</i> (Chou du désert)	Page 13
Figure 06	<i>Zilla macroptera</i> (Chebrok)	Page 14

Liste des tableaux

Tableau 01	Tableau récapitulatif des paramètres physicochimiques du sol étudié	Page 30
Tableau 02	Description macroscopique des colonies bactériennes isolées à partir des différents échantillons du sol dunaire	Page 32
Tableau 03	Les différentes espèces identifiées du sol désertique de Merzouga.	Page 38

Table des matières

Résumé.....	I
Abstract.....	II
ملخص.....	III
Liste des abréviations.....	IV
Liste des figures.....	V
Liste des tableaux.....	VI

Introduction.....	1
--------------------------	----------

Première partie : Synthèse bibliographique

Chapitre I : Caractères généraux d'un sol désertique

1. Quelques définitions.....	3
1.1. Notion de désert.....	3
1.1.1. Les déserts froids	5
1.1.2. Les déserts chauds	5
1.2. Notion d'aridité.....	6
1.2.1. Les déserts hyperarides ou absolus.....	6
1.2.2. Les déserts arides proprement dit.....	7
1.2.3. Les déserts semi-arides.....	7
2. Caractères physiques, chimiques et climatiques du sol saharien.....	7
2.1. Les caractères physiques.....	7
2.1.1. La texture	7
2.1.2. La structure	7
2.2. Les caractères chimiques.....	8
2.2.1. Le pH.....	8
2.2.2. La salinité.....	8
2.3. Les caractères climatiques.....	9
2.3.1. La précipitation.....	9
2.3.2. La température.....	10
2.3.3. Le vent.....	10
2.3.4. L'humidité.....	10
2.3.5. L'évaporation.....	11

Chapitre II : Le couvert végétal saharien

1. Les formes des plantes.....	12
1.1. Les éphémères ou encore appelées achebs	12
1.2. Les plantes permanente ou vivaces	13
2. L'effet de la végétation sur les microorganismes	14
3. Les interactions entre les micro-organismes du sol saharien et les plantes.....	15
3.1. Les interactions non symbiotiques	15
3.2. Les interactions symbiotiques.....	16
3.2.1. Les symbioses fixatrices d'azote	16
3.2.2. Les interactions mycorhiziennes	17

Chapitre III : Microorganismes rencontrés dans le sol désertique	
1. Les algues	19
2. Les champignons	20
3. Les bactéries	21
3.1. Les Actinobactéries	22
3.2. Les Protéobactéries.....	23
3.3. Les Bacteroidetes.....	25
3.4. Les Cyanobactéries.....	26
3.5. Les Firmicutes.....	27
3.6. Les Gemmatimonadetes.....	28
Deuxième partie : Evaluation de la diversité bactérienne dans le sol saharien (étude de cas : Algérie et Maroc)	
1. Étude de la biodiversité bactérienne d'un sol dunaire du sud.....	29
algérien (Région de Biskra)	
1.1. Résultats des analyses physicochimiques des échantillons du.....	30
sol dunaire	
1.2. Résultats des analyses microbiologiques des échantillons du sol étudié....	31
2. Étude de la biodiversité bactérienne d'un sol désertique au sud-est.....	36
marocain (Région de Merzouga)	
3. Comparaison entre les deux études précédentes.....	40
Conclusion générale.....	42
Références bibliographiques.....	44



Introduction

Une partie importante de la surface de notre planète est désertique (Belove *et al.*, 2018). Elle représente l'écosystème le plus dominant couvrant plus de 30% de la superficie du globe (OMT, 2006).

Le Sahara, le plus grand des déserts, représente l'un des environnements terrestres les plus extrêmes. C'est là où les conditions désertiques atteignent leur plus grande âpreté (Chehma, 2008).

Dans son sens originel, le mot Sahara désigne des régions inexplorées et désertiques. Pour certains, il évoque un paysage vaste et vide, à dunes interminables avec des rares oasis perdues dans l'immensité du désert (Berkal, 2006).

Le Sahara s'étend à travers le tiers septentrional du continent africain de l'atlantique à la mer rouge, sur une superficie de 9 millions de Km² (Chehma, 2008). Le Sahara algérien, l'un des plus vastes et des plus importants déserts chauds du monde s'étale sur près de 2 millions de km² correspondant à environ 85% de la surface totale du pays (Berkal, 2006). La zone bioclimatique hyper-aride couvre 89,5% de la surface et les régions arides et semi-arides 4,78% et 4,12%, respectivement (Chaich, 2018).

En fait, pendant longtemps, les sols désertiques ont été considérés comme étant complètement stériles et abiotiques suite aux contraintes qui les caractérisent telles que la sécheresse, les fluctuations extrêmes de la température, la faible abondance des nutriments, la salinité, et les niveaux élevés des rayonnements ultraviolets (UV), et qui entravent toute vie microbienne (Killian et Feher, 1939).

À la fin du 19^{ème} siècle, il a été démontré pour la première fois que les sols de désert contiennent de nombreux microorganismes en décrivant les caractéristiques microbiologiques du désert californien. Ainsi, les travaux de Nègre sur la flore bactérienne des sols sahariens d'Algérie, ont prouvé d'une manière irrévocable que les sols désertiques renferment des microorganismes et ont dénoncé les perceptions disant que les sols désertiques sont stériles (Killian et Feher, 1939). Ces travaux fondamentaux ont fourni une première orientation dans le domaine de la microbiologie des terres sahariennes (Bakelli, 2014).

L'existence de la vie dans ces écosystèmes extrêmes a conduit à s'interroger sur les stratégies et les mécanismes cellulaires, moléculaires et génétiques mis en jeu par ces microorganismes atypiques pour se maintenir dans de tels milieux, et la mise en évidence d'une extraordinaire biodiversité de ces formes de vie (Benabdellah, 2014).

Ainsi, les capacités étonnantes d'adaptation des microorganismes au stress physico-chimique et climatique offrent des perspectives en termes d'application biotechnologiques et conduit également à s'interroger sur leur capacité de produire de nouvelles substances métaboliques, tels que les protéases (Benabdellah, 2014 ; Naoum, 2016).

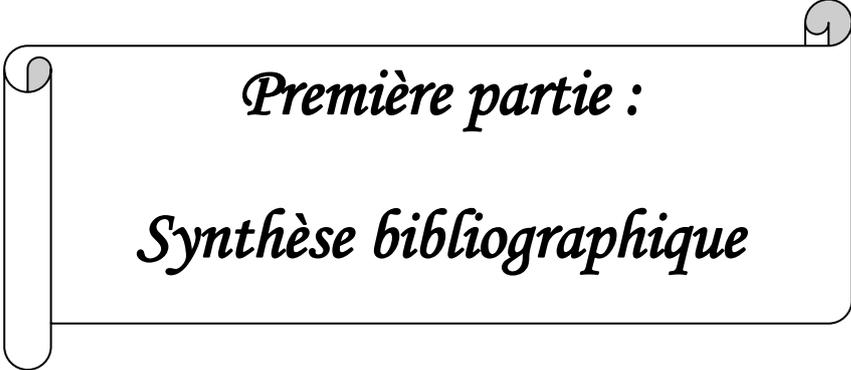
Cependant, en raison de la grande superficie et la diversité des étendues désertiques, les recherches scientifiques n'ont été menées que pour un nombre limité d'écotopes des déserts. Il est probable que la plus grande partie de la biodiversité des microorganismes inexplorés soit encore dissimulée dans ces habitats arides (Belove *et al.*, 2018).

Dans le Sahara algérien, vaste et riche, les études sur les caractéristiques microbiologiques restent relativement périphériques. En particulier en ce qui concerne la diversité de la microflore bactérienne colonisant ce milieu extrême qui n'a que très rarement fait l'objet d'étude. Pourtant le rôle du compartiment microbien dans la décomposition de la matière organique et dans les cycles de nombreux éléments nutritifs a été bien démontré.

Il est donc important, si l'on désire mieux connaître le milieu dynamique complexe constitué par les sols sahariens, et, en particulier, mieux comprendre les interactions, le fonctionnement, et la biodiversité de ces sols, d'étudier leur aspect microbiologique, parallèlement aux déterminations des propriétés physiques et chimiques.

Le présent travail de recherche est scindé en deux parties :

- La première partie présente le cadre général de l'étude par des rappels bibliographiques sur : les caractères généraux, la couverture végétale et les groupes de microorganismes rencontrés dans un sol désertique.
- La deuxième partie présente l'étude expérimentale des travaux déjà réalisés : les résultats obtenus après la réalisation des analyses physicochimiques et microbiologiques, les interprétations, les discussions éventuelles et une conclusion générale.



Première partie :

Synthèse bibliographique

CHAPITRE I

Caractères généraux d'un sol désertique

Au début, le terme désert ne signifiait que l'absence de la vie biologique. De proche en proche la notion de désert a été superposée à celle du milieu caractérisé par l'aridité et la sécheresse (Chaibou, 2005 ; Alismail, 2018).

L'aridité est la conséquence de l'insuffisance des précipitations et la pauvreté de couvert végétal. Elle ne se manifeste pas seulement aux déserts chauds, les déserts froids sont également inscrits parmi les régions les plus arides au monde (Alismail, 2018).

Les caractéristiques physiques, chimiques et climatiques que les zones désertiques offrent influencent fortement le fonctionnement et la structure des communautés microbiennes (Bakelli, 2014).

1. Quelques Définitions

1.1. Notion de désert

Selon Wang (2015), il est difficile d'avoir une définition exacte d'un désert, car les aspects climatiques, les caractéristiques géomorphologiques ainsi que la flore et la faune présentent des variations considérables. Cependant, l'aridité constitue le facteur commun dans tous les déserts (Bakelli, 2014).

Étymologiquement le mot « désert » dérive du latin classique «*deserta*» qui signifie «lieu inhabité» (Berkal, 2006).

Les déserts ont été décrits comme étant des régions particulièrement privées de vie et où les conditions climatiques et les facteurs environnementaux sont extrêmes (Berkal, 2006 ; Makhalanyane *et al.*, 2015). Ils sont caractérisés par une couverture végétale limitée ou pratiquement absente et une faune rare (OMT, 2006). Les communautés microbiennes sont probablement les principaux moteurs de ces systèmes vu qu'elles sont les médiatrices des processus biologiques (Makhalanyane *et al.*, 2015).

Les espaces désertiques occupent un tiers des surfaces émergées de la planète, soit environ 50 millions de kilomètres carrés. Ils sont répartis suivant deux zones discontinues de part et d'autre de l'équateur et se trouvent généralement à l'intérieur des continents (OMT, 2006).

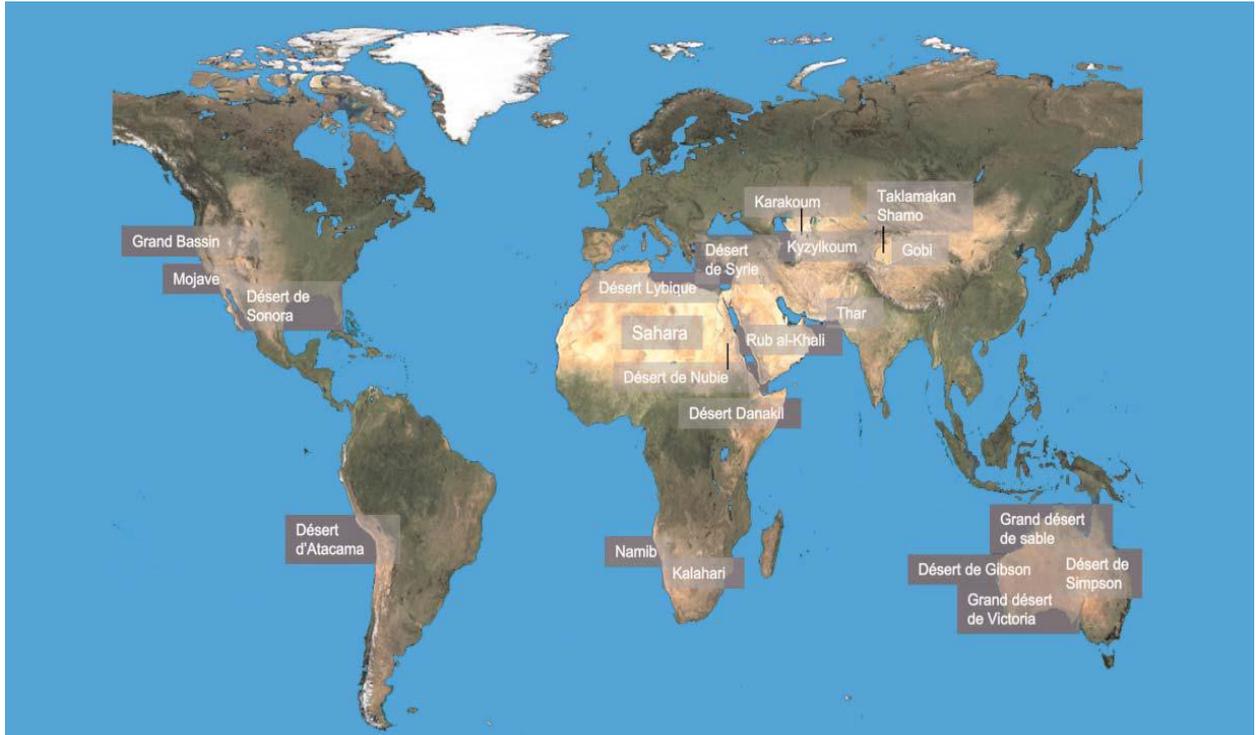


Figure 01 : Carte des déserts du monde (OMT, 2006).

Leur classification repose sur des combinaisons de la quantité totale de précipitations annuelles, de la température, de l'humidité ou d'autres facteurs (Wang, 2015). Selon le critère température, il existe deux principales catégories de déserts : les déserts chauds et les déserts froids (Figure 02) (OMT, 2006).

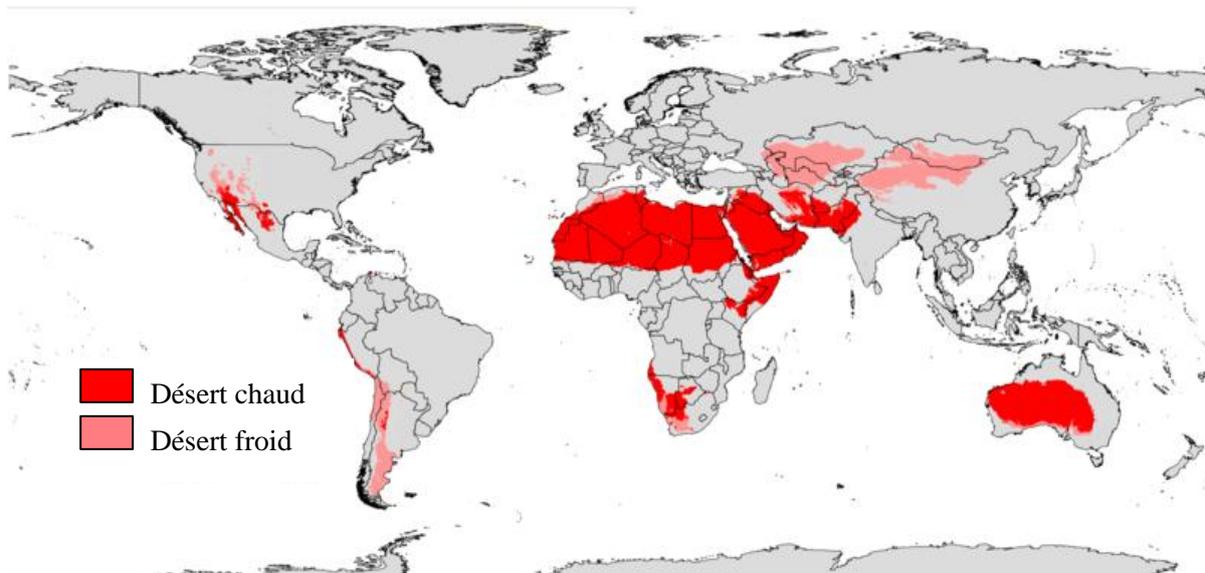


Figure 02 : Distribution mondiale des déserts : déserts chauds et froids

(<https://www.pinterest.fr/>).

1.1.1. Les déserts froids

Les déserts froids sont principalement situés dans les régions de l'Arctique canadien et de l'Antarctique (Mayer, 2014). Ces déserts sont recouverts de glace, diurne tout le long de l'année en haute altitude (OMT, 2006).

Dans les déserts froids, la température est basse et généralement de l'ordre de (-30°C). Les déserts d'Asies sont considérés parmi les déserts les plus froids dans le monde, en hiver leur température peut descendre à (-50°C) vu qu'ils reçoivent des influences polaires. Le désert de Gobi (Figure 03) représente l'exemple des déserts froids le plus connu (OMT, 2006).

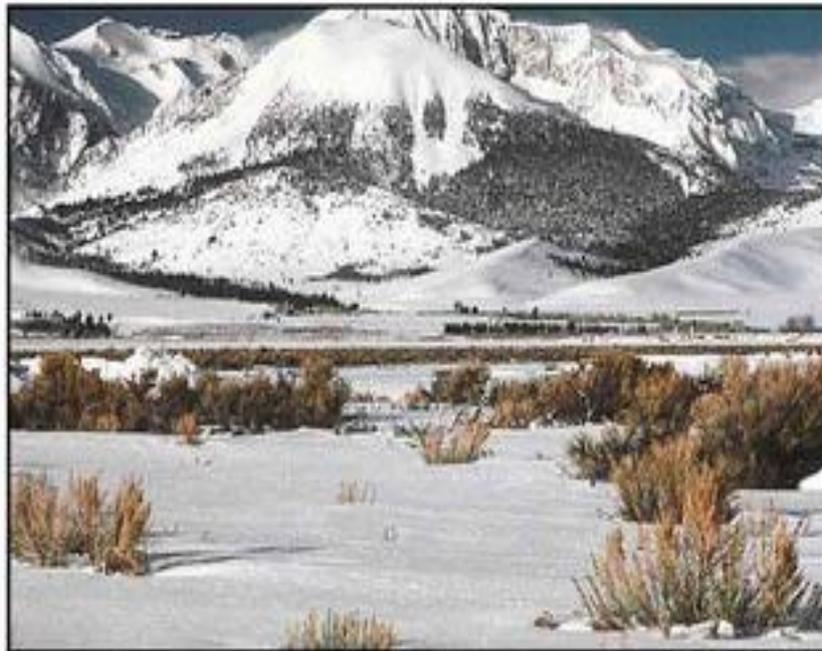


Figure 03 : Le fameux désert froid, le désert de Gobi recouvert d'une épaisse croûte de glace (Wang, 2015).

1.1.2. Les déserts chauds

Les déserts chauds et secs sont les déserts les plus étendus à la surface terrestre (Jebbar *et al.*, 2012). Leur température est très élevée avec des maximales pouvant atteindre 60° à 70°C (OMT, 2006).

Le plus grand désert chaud du monde est le Sahara qui occupe 10% de la superficie du continent africain. Le Sahara algérien (Figure 04), couvre plus de 2 millions de kilomètres, il est l'une des régions les plus sèches et les plus chaudes dans le monde (Chaïch, 2018).



Figure 04 : Dunes de Sable dans le désert du Sahara, Algérie (www.larousse.fr).

1.2. Notion d'aridité

L'aridité est un concept qui définit un climat sec caractérisé par la faiblesse des précipitations moyennes annuelles et par le déficit de celle-ci par rapport à l'évapotranspiration (Berkal, 2006).

L'aridité constitue un véritable facteur possédant une importante influence sur les communautés microbiennes des sols désertiques en raison de la relation négative entre elle et la disponibilité des ressources nutritives (Wang, 2015).

Le degré d'aridité n'est pas identique dans tous les déserts, ce qui fait qu'ils sont subdivisés en trois principaux domaines (Boudjellal, 2009 ; Wang, 2015) :

1.2.1. Les déserts hyperarides ou absolus : ils reçoivent des précipitations inférieures à 50 mm par an. Ces déserts sont les plus rares et ils couvrent environ 7,5% de la superficie terrestre mondiale.

1.2.2. Les déserts arides proprement dit : dont les précipitations sont comprises entre 50 et 150 mm par an. Ils occupent pratiquement 12.5% de la surface terrestre.

1.2.3. Les déserts semi-arides : ils reçoivent de 150 à 250 mm, voire jusqu'à 500 mm des précipitations par an. La superficie occupée par ces déserts est d'environ 17,7%.

En Algérie la zone aride représente près de 95% du territoire national dont 89% dans le domaine hyperaride (Madani, 2008).

2. Caractères physiques, chimiques et climatiques du sol saharien

Les sols sahariens peuvent contenir une grande variété de communautés microbiennes. Cependant, diverses caractéristiques physiques, chimiques et climatiques peuvent jouer un rôle dans le profil de ces communautés (Naoum, 2016).

2.1. Les caractères physiques

2.1.1. La texture

La texture est définie par ses proportions relatives en argile, limon et sable (www.fao.org). Sur les topographies élevées, les sols sahariens ont une texture grossière, ils sont sableux et truffés de cailloux (Hamadas, regs, ergs) mais dans les dépressions, la texture peut être fine (Karabi, 2017).

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

2.1.2. La structure

La structure se définit comme le mode d'arrangement ou d'agrégation interne des particules du sol. Elle est fortement influencée par la quantité de matière organique liant ces particules (www.fao.org).

D'après Messaoud (2018), L'absence ou la présence ainsi que la forme de ces agrégats définissent le type de structure. Cette dernière joue un rôle important dans la distribution des

microorganismes en raison de la relation inverse entre la densité microbienne et la taille des particules du sol (An, 2012 ; Naoum, 2016).

Généralement les sols sahariens possèdent une structure particulière, ils sont essentiellement des sols minéraux formés dans leur quasi-totalité de sable. La fraction organique est très faible et souvent inférieure à 1% ce qui ne permet pas une bonne agrégation (Chaich, 2018).

En dépit de la pauvreté de la structure particulière en matière organique, cette structure des sols sahariens favorise la croissance des microorganismes du fait qu'elle permette une bonne circulation de l'air et de l'eau (Karabi, 2017).

2.2. Les caractères chimiques

2.2.1. Le pH

Les sols sahariens présentent un pH proche de la neutralité (Hatimi et Tahrouch, 2007). Le pH influence la composition microbienne du sol et certains aspects de l'activité des microorganismes. Ainsi, chaque espèce microbienne est active entre des limites de pH qui lui sont propres. Par exemple, les bactéries et les actinomycètes sont très sensibles à l'acidité et elles sont prédominantes dans des sols neutres ou légèrement alcalins tandis que les champignons sont prépondérants dans les sols acides (Dari, 2013). Ceci nous laisse stipuler que les bactéries, et notamment les actinomycètes, seraient plus rencontrées dans les sols sahariens.

D'autre part le pH a un effet indirect sur les microorganismes par son influence sur les propriétés physico-chimiques du sol ce qui modifie la biodisponibilité des éléments nutritifs (Calvet, 2013).

2.2.2 La salinité

Les sols salés occupent des surfaces étendues de terre et ils sont localisés presque entièrement au niveau des zones arides et semi-arides (Soffih, 2017). Selon Boumaraf (2013), les sols sahariens d'Algérie sont caractérisés par une salinité élevée.

Le taux de la salinité a une grande influence sur l'évolution de la microflore du sol vu que la salinité élevée agit négativement sur le nombre des microorganismes et leurs activités

microbiennes (Messaoud, 2018). Bien que certains des groupes, comme les bactéries halophiles, peuvent résister au stress salin (Naoum, 2016).

En effet, le taux élevé de la salinité entraîne une augmentation de la pression osmotique. Celle-ci inhibe le développement des microorganismes et par conséquent la diminution de l'activité microbienne dans les sols salins ce qui conduit à une accumulation de la matière organique non dégradée, et agit négativement sur la disponibilité des nutriments nécessaires à la croissance végétale (Karabi, 2017).

De tous les processus biologiques, la nitrification est la plus touchée, ainsi que la réduction de la respiration (Dari, 2013).

2.3. Les caractères climatiques

Le climat des régions sahariennes est un climat hyper-aride caractérisé par la faiblesse et l'irrégularité des précipitations, une luminosité intense, des températures extrêmement élevées et des vents violents qui contribuent à augmenter l'évapotranspiration (Berkal, 2006 ; Chehma 2005).

2.3.1. La précipitation

Selon Chehma (2008), les précipitations ont pratiquement toujours eu lieu sous forme de pluies.

Les précipitations dans les régions sahariennes sont très faibles, mais sont parfois très violentes. Les plus orageuses sont celles des saisons estivales (Berkal, 2006).

À la rareté des précipitations dans les zones arides s'ajoute la grande irrégularité du régime pluviométrique dans l'année, qui varie entre l'été et l'hiver et d'une année à l'autre. Il s'écoule plusieurs mois, voir plusieurs années entre deux pluies, ce qui accentue la sécheresse (Ozenda, 1991 ; Boudjellal, 2009).

Dans les écosystèmes arides et semi-arides, les précipitations ont un impact significatif sur l'activité biologique des communautés microbiennes. Quand la fréquence des précipitations augmente, la biomasse microbienne augmente (Nielsen et Ball, 2015).

2.3.2. La température

Au Sahara, les moyennes des températures maximales sont enregistrées en juillet pouvant dépasser 50°C et celles des minima en janvier pouvant atteindre (-8°C), avec de fortes amplitudes thermiques aussi bien entre le jour et la nuit (journalière) que celle enregistrée sur l'année (annuelle) (Berkal, 2006).

En surface du sol la température peut dépasser 70°C. Cependant, en profondeur, les températures diminuent rapidement et s'équilibrent (Chehma, 2005).

Dans les zones arides, la température du sol représente un facteur écologique très important qui régit la multiplication des microorganismes dans ces régions. Pour chaque espèce, il existe un seuil au-dessous duquel l'activité est nulle. De même, un optimum de température correspond à une activité maximale, autrement dit, une limite supérieure au-delà de laquelle la cellule vivante est détruite (température létale). D'une manière générale, la plupart des bactéries et actinomycètes ont un développement optimal entre 25 et 40°C. Quant aux champignons, leur température optimale se situe aux environs de 26°C (Dari, 2013).

2.3.3. Le vent

Le vent est un facteur particulièrement actif et fréquent dans les régions arides désertiques (Berkal, 2006). Les endroits où se produisent les tempêtes de sable sont notamment les régions du Sahara et du Sahel en Afrique du Nord et les déserts de Gobi, et Taklamakan d'Asie (An, 2012).

Ces effets se traduisent par le transport et l'accumulation du sable, le façonnement du relief saharien et l'évolution des sols en accentuant le déficit hydrique (Chehma 2005). Aussi, le vent peut avoir un impact important sur la qualité de l'air et la propagation des microorganismes en raison des petites particules qui y abondent, notamment le sel, les bactéries, et les spores fongiques (An, 2012).

2.3.4. L'humidité

La disponibilité de l'eau est le principal facteur de contrôle de l'activité, de la diversité et de la structure des communautés microbiennes dans les sols désertiques (An, 2012).

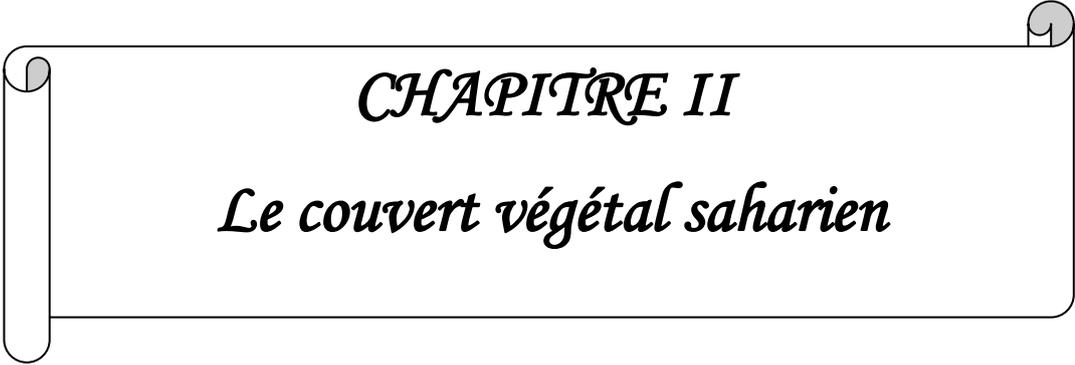
Au Sahara, l'humidité est faible. Pour cela, les sols secs ne présentent qu'une activité microbienne faible. Cette activité augmente progressivement avec l'augmentation de la teneur en eau du sol (Morel, 1989 ; Chehma, 2005).

Selon Dari (2013), un manque chronique d'eau entraîne une sélection de certains groupes microbiens tels que les bactéries sporulantes. Cependant d'autres microorganismes arrivent à résister à la dessiccation du sol (Karabi, 2017).

2.3.5. L'évaporation

L'évaporation est aussi un des traits marquants et incontournables des climats des régions sahariennes. Selon Chehma (2008), le Sahara apparaît comme la région du monde qui possède l'évaporation la plus élevée. En outre, le taux d'évaporation d'une surface libre est inversement proportionnel à l'humidité, ce qui influe indirectement l'activité microbienne (Berkal, 2006 ; Kaddou, 2014).

Les conditions physiques, chimiques et climatiques qui règnent au Sahara sont les plus hostiles, non seulement pour la vie des microorganismes, mais aussi pour la vie végétale. Malgré tout, l'écosystème saharien est loin d'être dépourvu de végétation.



CHAPITRE II

Le couvert végétal saharien

Comme précédemment expliqué, le Sahara est caractérisé par des conditions édapho-climatiques très contraignantes, rudes et particulièrement inadéquates à la vie des êtres vivants. Néanmoins, cet écosystème reste un milieu vivant caractérisé par un couvert végétal très diversifié qui arrive quand même à subsister et proliférer grâce au développement de stratégies d'adaptations spécifiques (Chehema *et al.*, 2005 ; Bouallala, 2013).

Dans cet écosystème, 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). La végétation des zones arides, en particulier celle du Sahara, est très clairsemée, à aspect en général nu et désolé. Les arbres sont aussi rares que dispersés et les herbes n'y apparaissent que pendant une période très brève de l'année quand les conditions deviennent favorables (UNESCO, 1960).

1. Les formes des plantes

Selon leur mode d'adaptation à la sécheresse les plantes sahariennes peuvent être divisées en deux catégories (Ozenda, 1991) :

1.1. Les éphémères ou encore appelées achebs

Ce sont des plantes annuelles qui n'apparaissent qu'après les périodes de pluies. Elles accomplissent tout leur cycle de vie durant une courte période humide avant que le sol ne soit desséché. La longueur de ce cycle est très variable d'une espèce à une autre et dure généralement de un à quatre mois (Chehema, 2005).

Les éphémères sont de petite taille, ont des racines peu profondes, mais elles sont capables de former des peuplements denses, et d'occuper que sporadiquement et fugacement le terrain (www.fao.org).

Ces plantes sont des thérophytes. Pendant la période de sécheresse elles raccourcissent leur cycle de développement de manière à supprimer toute leurs parties aériennes et survivre sous forme de graines pendant plusieurs années, jusqu'à ce qu'une pluie pénétrante leur permette de germer et de fleurir rapidement. C'est le cas par exemple de *Schouwia thebaica* (Chou du désert) (Figure 05) et *Rumex vesicarius* (Oseille sauvage) (Archives de documents de la FAO <http://www.fao.org/>).



Figure 05 : *Schouwia thebaica* (Chou du désert) (<http://nezumi.dumousseau.free.fr>).

Plante annuelle vert-bleuâtre à larges feuilles, fleurs violettes, fruits aplatis bordés par une aile. Elle pousse vite après la pluie.

1.2. Les plantes permanentes ou vivaces

Ce sont de véritables xérophytes (www.fao.org). En outre, d'une adaptation physiologique encore mal connue, ces plantes sont munies d'un ensemble de mécanismes d'adaptations morphologiques et anatomiques performant qui leur permet de survivre en vie ralentie durant des périodes de sécheresse prolongées.

En effet, ce type de végétation est moins sujet aux variations saisonnières malgré qu'elles sont moins riches en espèces que les éphémères (Chehema, 2011).

À l'inverse des éphémères, ces plantes maintiennent leurs parties aériennes vu qu'elles sont dotées de dispositifs anatomiques qui ont pour effet de leur assurer une meilleure alimentation en eau par accroissement du système absorbant (Chehema, 2005). Pour limiter les pertes d'eau par évapotranspiration, les feuilles sont souvent réduites sous formes d'épines dont les scientifiques pensent qu'elles peuvent servir également à réfléchir les rayons incidents et peut être à dissiper la chaleur. Un nombre de plantes sont succulentes ; emmagasinant de l'eau dans les feuilles, les tiges et les racines (Boudjellal, 2009). On peut citer à titre d'exemples les

Cactus qui sont des vivaces succulentes typiques (Archives de documents de la FAO <http://www.fao.org/>), et *Zilla macroptera* (Figure 06) une plante vivace non succulente (Chehma, 2008).



Figure 06 : *Zilla macroptera* (Chebrok) (Chehma, 2008).

Plante vivace, épineuse, très rameuse poussant en grandes touffes pouvant atteindre plus d'un mètre

2. L'effet de la végétation sur les microorganismes

La plupart des communautés microbiennes des déserts semblent être structurées uniquement par des processus abiotiques. Cependant, divers facteurs biotiques, notamment la présence végétale, peuvent influencer sélectivement la survie et la résistance de groupes particuliers de microorganismes (An, 2012 ; Naoum, 2016).

En effet, la végétation influe fortement 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 microorganismes (Karabi, 2017).

3. Les interactions entre les microorganismes du sol saharien et les plantes

Les interactions entre les microorganismes du sol et les plantes peuvent être regroupées en deux types (Morel, 1989) :

1. Des interactions non symbiotiques : incluant la répartition des microorganismes dans le sol, il s'agit ici de l'effet rhizosphère.
2. Des interactions symbiotiques : couvrant les symbioses mycorhiziennes d'une part et les associations fixatrices d'azote d'autre part.

3.1. Les interactions non symbiotiques

La rhizosphère est la région du sol autour des racines des plantes. C'est un milieu complexe aux multiples interactions (Lynch et Whipps, 1990).

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 (Dari, 2013).

En effet, le couvert végétal apporte à la microflore non seulement de la matière organique mais encore il modifie le microclimat et les associations microbiennes au niveau des racines, produisant ce qu'on appelle un effet rhizosphère (Dari, 2013).

D'autre part, le développement de la communauté microbienne rhizosphérique a une variété d'impact direct ou indirect sur la prolifération et la croissance des plantes. Beaucoup de bactéries sont responsables du recyclage et de la solubilisation des éléments minéraux (azote, phosphore, calcium), de la synthèse des composés organiques qui stimulent la croissance des plantes et le développement de leurs systèmes racinaires tels que les vitamines, les acides aminés et les auxines ou bien d'autres substances qui peuvent inhiber les organismes pathogènes des plantes (Djigal, 2003).

Les impacts indirects résultent de l'effet notable 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 et la stabilisation 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 (Djigal, 2003).

Les interactions entre les microorganismes et les plantes peuvent être négatives ou néfastes dans le cas de certaines bactéries et champignons phytopathogènes qui peuvent envahir les tissus des racines et provoquer de nombreuses maladies. Ces maladies apparaissent souvent chez les plantes sous forme de nécrose, de pourritures, de troubles vasculaires, de tumeurs et/ou de lésions (Karabi, 2017).

Dans d'autres cas, la compétition entre les microorganismes et les racines des plantes sur l'azote est également reconnue comme une interaction négative. Cet élément est indispensable aussi bien pour la croissance des plantes que celle des microorganismes, il est considéré comme un facteur limitant dans les sols pauvres (Karabi, 2017).

La rhizosphère dans les sols du désert présente l'emplacement le plus important pour les activités microbiennes, vu qu'elle est considérée comme une source importante de la matière organique des sols arides pauvres. L'effet de la rhizosphère a donc plus d'avantage dans les déserts, qualitativement et quantitativement que dans d'autres sols (Bakelli, 2014).

3.2. Les 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 (Lynch et Whipps, 1990 ; Dari, 2013 ; Karabi, 2017).

3.2.1. 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 de la famille des Fabacées, et des Frankias, bactéries filamenteuses sporulantes associées à des plantes dites actinorhiziennes comme les Casuarinacées (Djigal, 2003).

Dans cette association à bénéfices réciproques; le microorganisme induit l'apparition de structures différenciées, appelées nodules, chez le partenaire végétal dans lesquels se réalise la transformation de l'azote atmosphérique (N) gazeux, en azote combiné (NH_4^+) assimilable par les organismes vivants et nécessaire à leur croissance (Chaich, 2018). De plus, les bactéries fixatrices d'azote émettent des phytohormones stimulant la croissance des plantes qui les hébergent, et sans doute aussi des plantes voisines. En outre, la plante digère les bactéries

qu'elle héberge, au fur et à mesure de leur renouvellement, profitant ainsi de leurs protéines et d'autres substances. En contrepartie, la légumineuse fournit des substances hydrocarbonées comme source d'énergie indispensables à la croissance des bactéries (Dari, 2013).

La capacité spontanée des espèces appartenant à la famille des fabacées de s'associer en symbiose avec les rhizobia leur confère des potentialités d'adaptation pour mieux se développer sur des sols pauvres et dégradés des régions arides. Ces espèces jouissent d'un rôle clé pour la durabilité de l'écosystème naturel saharien (Chaïch, 2018).

La fixation biologique constitue la voie principale pour l'introduction de l'azote dans les régions désertiques. Elle est extrêmement importante dans le maintien de la fertilité en azote des sols (Chaïch, 2018).

3.2.2. Les interactions mycorhiziennes

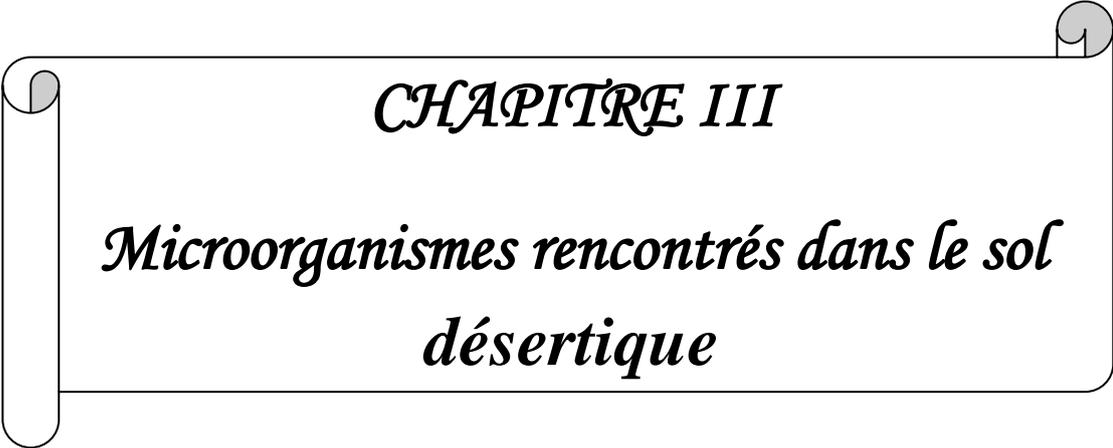
Les mycorhizes sont des associations bénéfiques entre les racines des végétaux et les filaments mycéliens de certains champignons du sol (Duponnois *et al.*, 2012).

La formation des mycorhizes est parfois primordiale dans tout ou une partie du cycle de la plante. En effet, certains végétaux ne peuvent croître normalement sans leur symbiote fongique (Gobat *et al.*, 2003). Le fonctionnement de la symbiose mycorhizienne est basé sur des échanges réciproques entre les racines des végétaux et les filaments mycéliens des champignons. Dans ces interactions bidirectionnelles, le champignon hétérotrophe profite des ressources carbonées synthétisées par la plante via la photosynthèse et qu'il ne peut pas obtenir dans le sol. En retour, les hyphes fongiques améliorent la nutrition hydrique et minérale de la plante hôte grâce à l'augmentation du volume de sol prospecté et à la production de diverses enzymes extracellulaires notamment la phosphatase et la phytase susceptibles de libérer du phosphore à partir des composés complexes organiques et inorganiques du sol (Gobat *et al.*, 2003).

La plupart des plantes des régions arides (espèces sauvages ou cultivées) sont associées à des Champignons Mycorhiziens à Arbuscules (CMA) qui effectuent une symbiose endomycorhizienne (Duponnois *et al.*, 2012). La symbiose endomycorhizienne semble aussi jouer un rôle dans la floraison et la fructification des plantes, l'amélioration de leur tolérance aux agents pathogènes du sol et contre divers stress environnementaux tels que la sécheresse ou la présence de contaminants organiques et inorganiques lourds (Bethiaume, 2014).

Il est donc évident que les relations entre la communauté microbienne et la végétation qui vivent dans cet écosystème sont très importantes. Ces relations influencent la répartition des microorganismes dans le sol saharien vu que la densité et l'activité microbienne sont particulièrement intenses à proximité des racines des plantes.

Même si le Sahara constitue un modèle extrême pour la vie des microorganismes, il est surprenant qu'il soit caractérisé par une diversité microbienne notamment bactérienne bien adaptée à toutes les conditions contraignantes qui caractérisent ce milieu.



CHAPITRE III

*Microorganismes rencontrés dans le sol
désertique*

Les microorganismes sont les principaux producteurs primaires sur notre planète. Grâce à leur diversité, ils sont capables de coloniser les environnements les plus hostiles en termes de déficit hydrique, de température, de salinité, de pression et de pH (Jebbar *et al.*, 2012).

Les déserts constituent un modèle de milieu extrême pour la vie de tous les organismes vivants y compris les microorganismes. Cependant, ils renferment une surprenante diversité microbienne qui a su s'adapter à tout. En d'autres termes, les déserts sont les habitats des organismes qui ont adapté leur métabolisme à des conditions environnementales extrêmement hétérogènes et changeantes (Jebbar *et al.*, 2012 ; Belov *et al.*, 2018).

La population microbienne dans le sol désertique peut varier autant que n'importe quelle autre zone climatique. Dans les sols sablonneux du désert saharien la population microbienne est minime par rapport à la plupart des déserts. La répartition horizontale des microorganismes est en fonction du type de végétation. Leur nombre dans le sol désertique semble être associé à l'abondance de nutriments carbonés disponibles (Naam et Ferhat, 2019). De point de vue de la distribution verticale, la majorité des microorganismes se trouvent dans la couche superficielle du sol, la mieux aérée et la plus riche en substances nutritives. Leur nombre diminue progressivement avec la profondeur (Dari, 2013).

Ce sont les bactéries, les champignons et les algues, qui entrent dans la composition des microbiocénoses des sols arides. Ils peuvent jouer un rôle important dans la stabilité du sol, les cycles des nutriments et la santé environnementale (Dari, 2013 ; Wang, 2015).

1. Les algues

Ce sont des organismes autotrophes grâce à leur chlorophylle (Dari, 2013). Les algues peuvent être de forme unicellulaire ou en colonies filamenteuses, elles sont souvent abondantes dans le sol, mais restent localisées à la surface ou dans les larges fissures pour recevoir un minimum d'éclairage nécessaire pour la photosynthèse (Messaoud, 2018).

Selon Jeffery *et al* (2013), les algues représentent une partie importante de la microflore édaphique. À travers la photosynthèse, les algues colonisent rapidement les surfaces minérales brutes et accélèrent leurs altérations par des substances dissolvantes. De plus elles apportent du carbone organique dans l'écosystème sol ce qui favorise sa structuration.

Les algues participent aussi à la cohésion des particules solides par la production des polysaccharides extracellulaires (Messaoud, 2018). Selon leurs pigmentations, on distingue les groupes suivants : les chlorophycées (algues vertes), les rhodophycées (algues rouges), les phéophycées (algues brunes), xanthophycées (algues jaunes), chrysophycées (algues jaunes dorées) (Mehimdat, 2013). Une algue rouge calcaire : *Cheggatella denticula* est décrite à partir du carbonifère supérieur du bassin de Béchar (Sahara algérien) (Poncet, 1989).

Les algues peuvent supporter la dessiccation, par des mécanismes d'adaptation aux conditions climatiques rencontrées à la surface des sols. Cependant, la vitesse de dessiccation peut influencer fortement la survie des algues. Bien plus de cellules algales survivent à des événements de dessiccation courts et intenses qu'à de longues périodes d'assèchement lent des sols. Elles protègent les environnements arides ou désertiques contre l'érosion en formant des croûtes à la surface du sol (Jeffery *et al.*, 2013 ; Messaoud, 2018).

2. Les champignons

Les champignons sont des organismes eucaryotes, hétérotrophes et immobiles (Naam et Ferhat, 2019). Actuellement, ils sont regroupés dans un règne séparé des procaryotes, des plantes et des animaux : les Fungi. Ces derniers renferment Cinq phyla : *Basidiomycota*, *Ascomycota*, *Zygomycota*, *Glomeromycota* et *Chytridiomycota* (Brock *et al.*, 2007 ; Le calvez, 2009).

Les champignons peuvent exister sous deux formes différentes, soit comme des organismes unicellulaires appelés levures, soit sous forme mycélienne pluricellulaire constituée d'hyphes. Certaines espèces ont la capacité d'adopter les deux formes. Ils sont principalement des aérobies, mais certaines levures peuvent être aéro-anaérobie et participent à des processus de fermentation (Le calvez, 2009).

Les populations fongiques sont souvent hébergées dans les sols riches en matière organique (Ameur, 2014 ; Naam et Ferhat, 2019). En ce qui concerne leur mode de vie, la plupart des champignons sont des saprophytes, leur rôle est important dans la dégradation de la matière organique résistante telle que la cellulose et la lignine. Aussi, certains champignons peuvent être des parasites et d'autres vivent en symbiose avec les plantes supérieures (mycorhizes) (Ameur, 2014).

D'après Makhalanyane *et al* (2015), les champignons jouent un rôle écologique important dans le fonctionnement des écosystèmes désertiques. Ils ont montré des capacités d'assimilation des polymères végétaux plus élevée que celles des autres taxons fongiques de la même espèce isolée à partir d'autres environnements.

Dans le Sahara, nombreux genres fongiques ont été signalés, ce qui correspond à la perception générale qui considère que les champignons sont l'une des formes de vie eucaryotes les plus tolérantes au stress sur Terre (Makhalanyane *et al.*, 2015). À titre d'exemple les genres : *Penicillium*, *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Helminthosporium* et *Alternaria*, ont été isolés à partir des poussières provenant du Sahara de l'Afrique du Nord (Marone *et al.*, 2018). Dans le Sahara d'Algérie, les espèces fongiques identifiées appartiennent aux genres suivants : *Aspergillus*, *Penicillium*, *Alternaria* et *Trichoderma* (Bazzine et Hamdi-Aissa, 2014).

3. Les bactéries

Les bactéries présentent le groupe majeur des microorganismes du sol désertique, aussi bien sur le plan quantitatif que fonctionnel (Messaoud, 2018).

La diversité génétique des bactéries dans le sol est plus importante que celle des autres types d'environnements. En effet, cette diversité est à l'origine de nombreuses propriétés physiologiques, d'activités métaboliques et aussi de fonctions que les bactéries peuvent accomplir dans le sol (Berkani *et al.*, 2017).

D'après Jebbar *et al* (2012), la diversité bactérienne dans les déserts chauds est presque identique à celle des milieux tempérés alors que le nombre des bactéries est nettement plus faible.

Plusieurs études ont rapporté que les phyla bactériens abondants dans les sols désertiques sont (Hatimi et Tahrouch, 2007 ; Bakelli, 2014; Wang, 2015) :

- ❖ Les Actinobactéries
- ❖ Les Protéobactéries et,
- ❖ Les Bacteroidetes

3.1. Les Actinobactéries

Les Actinobactéries ou encore appelées *Actinomycetes* sont des bactéries à Gram positif, possédant un coefficient de Chargaff (GC%) élevé, supérieur à 55% et généralement compris entre 60 et 70% ce qui les différencie des autres bactéries (Kitouni, 2007 ; Saker, 2015).

Les différents groupes d'Actinobactéries sont caractérisées par une très grande diversité morphologique, pouvant aller de simples bacilles diphtéroïdes et des cocci à des formes mycéliennes complexes (Boudemagh, 2007 ; Saker, 2015).

La plupart des Actinobactéries sont immobiles, leur croissance est plus lente de celle des autres bactéries, elles croissent en l'espace de quelques jours à quelques semaines. Leur développement donnerait lieu à des colonies circulaires souvent pigmentées constituées de filaments qui irradient par croissance centrifuge tout autour du germe qui leur a donné naissance. Les Actinobactéries sont des aérobies plus rarement anaérobies. Elles préfèrent un pH neutre ou peu alcalin, elles sont généralement des mésophiles, non halophiles et croient dans des conditions humides, il existe cependant une diversité physiologique étonnante puisque l'on retrouve également des thermophiles, des psychrophiles, des halophiles et des espèces qui peuvent se développer dans des endroits où l'activité de l'eau (AW) est très basse. Cette grande diversité fait que les Actinobactéries soient retrouvées pratiquement partout dans l'environnement y compris les milieux les plus extrêmes où la vie était considérée comme étant impossible (Boudemagh, 2007 ; Saker, 2015).

Dans le sol, elles sont présentes depuis la surface jusqu'à plus de 2 mètres de profondeur et leur nombre diminue au fur et à mesure que la profondeur augmente (Boudemagh, 2007 ; Kitouni, 2007 ; Saker, 2015). Ce sont généralement des microorganismes hétérotrophes, dont la majorité comprend des saprophytes mais il existe des formes parasites et symbiotiques des plantes ou des animaux. Les Actinobactéries saprophytes sont capables de dégrader des polymères relativement complexes telles que les hémicelluloses, la pectine, la kératine et la chitine et participent par la suite dans la formation de l'humus (Kitouni, 2007).

Le phylum des Actinobactéries comprend maintenant cinq classes, 21 ordres et plus de 50 familles, les cinq classes sont *Actinobacteria*, *Acidimicrobiia*, *Nitriliruptoria*, *Rubrobacteria* et *Thermophila* (Saker, 2015).

Il est connu que dans les divers types de sols, les Actinobactéries sont les microorganismes les plus recherchés pour leur capacité de produire plusieurs molécules bioactives telles que les

antibiotiques, les enzymes, les vitamines, les immunosuppresseurs, les insecticides et les herbicides (Saker, 2015).

D'après nombreuses études, les Actinobactéries sont le phylum le plus dominant dans les environnements arides, notamment dans les déserts chauds. En effet ces microorganismes peuvent constituer jusqu'à 50% de la population bactérienne dans ces écosystèmes (Hatimi et Tahrouch, 2007 ; Wang, 2015 ; Makhalanyane *et al.*, 2015 ; Belov *et al.*, 2018). Leur dominance revient à la capacité de ces bactéries de sporulation, leur grand pouvoir métabolique et de dégradation, leurs avantages compétitifs via la synthèse de métabolites secondaires, ainsi que leurs multiples capacités de réparation UV (Makhalanyane *et al.*, 2015).

Dans les sols désertiques du Namib, il a été montré que les populations bactériennes étaient dominées par des membres d'Actinobactéries présentant une homologie élevée avec les genres *Rubrobacter*, *Arthrobacter*, *Thermopolyspora* et *Streptomyces* (Makhalanyane *et al.*, 2015). Une autre étude sur le sol saharien d'Égypte a révélé que les Actinobactéries constituent 20,7% des communautés bactériennes et elles sont représentées principalement par le genre *Rhodococcus* (Belov *et al.*, 2018).

En Algérie, les sols sahariens renferment un potentiel assez riche en Actinobactéries particulièrement les celles rarement isolées de part le monde tels que les genres *Planomonospora*, *planobispora*, *Nocardiopsis*, *Actinomadura* et *Saccharothrix* qui se sont révélés être de grands producteurs de nouvelles molécules antimicrobiennes (Habibche, 2013). Récemment une nouvelle espèce d'Actinobactéries, *Saccharothrix tamanrassetensis* a été isolée à partir du sol saharien d'Algérie et elle a montré une activité antimicrobienne contre diverses bactéries et champignons (Belov *et al.*, 2018).

3.2. Les Protéobactéries

Les Protéobactéries constituent la division la plus importante et phénotypiquement la plus diversifiée parmi les procaryotes (Itävaara *et al.*, 2016). Les bactéries appartenant à ce phylum sont des Gram négatif avec une membrane externe constituée en grande partie de lipopolysaccharides (Rizzatti *et al.*, 2017). Elles se présentent sous forme de bâtonnets, de coques simples, de bourgeons, de graines ou peuvent même développer des fructifications complexes. La plupart de ces bactéries ont des flagelles utilisés pour la locomotion, d'autres se déplacent par glissement ou ne sont pas mobiles (Prescott *et al.*, 2010).

Les microorganismes appartenant à ce phylum présentent une diversité physiologique et métabolique considérable (Spain, 2009). Ils peuvent être des photolithotrophes, chimiolithotrophes, et chimioorganotrophes (Garrity *et al.*, 2005). Ce sont principalement des anaérobies. Cependant, certains sont des anaérobies facultatifs, tandis que d'autres sont des aérobies obligatoires (www.biologyonline.com).

Actuellement, sur la base de l'analyse phylogénétique des séquences du gène de l'ARNr 16S, l'embranchement des Protéobactéries est divisé en 6 classes : *Alphaproteobacteria*, *Betaproteobacteria*, *Gammaproteobacteria*, *Deltaproteobacteria*, *Epsilonproteobacteria* et *Zetaproteobacteria* (Rizzatti *et al.*, 2017). L'énorme diversité des morphologies et des physiologies observées au sein de cet embranchement bactérien lui donne un avantage concurrentiel pour survivre dans diverses niches écologiques. Il a été observé que les Protéobactéries sont omniprésentes dans divers environnements comprenant les habitats oligotrophes (Shin, 2015 ; Chengyou *et al.*, 2017).

Selon Wang (2015), les Protéobactéries sont considérées comme des membres importants des sols désertiques. Les Alpha, Bêta et Gammaprotéobactéries sont souvent liées à des sols avec des taux plus élevés d'apports en carbone organique. Cependant, des études ont montré que certains membres de ce phylum sont capables de photosynthèse dépendante de la bactériochlorophylle d'où leur importance dans les environnements arides limités en nutriments (Boldareva-Nuianzina *et al.*, 2013). En plus, leurs rôles fonctionnels sont liés à des processus tels que la fixation de l'azote et l'oxydation du fer, du soufre et du méthane (Itävaara *et al.*, 2016).

Il a été rapporté que le groupe des Protéobactéries est l'un des phylums dominant dans le désert hyper-aride d'Atacama du Nord Chili (Chengyou *et al.*, 2017). Ainsi, les analyses moléculaires des communautés bactériennes dans la rhizosphère de plusieurs plantes cultivées dans un sol saharien de la région de Ghardaïa (Sahara algérien) ont montré la présence des Alphaprotéobactérie tels que *Rhizobia*, *Bradyrhizobia*, des Bétaprotéobactéries tels que les *Nitrosomans*, *Bukholderia*, des Gammaprotéobactéries tels que les *Pseudomonas*, *Vibrio* et *Erwinia* (Bakelli, 2014).

3.3. Les Bacteroidetes

Les *Bacteroidetes* sont des bactéries à Gram négatif, de forme bacille et non sporulantes (Wexler, 2007). Elles peuvent être mobiles grâce à des flagelles ou par glissement, cependant d'autres sont immobiles (Thomas *et al.*, 2011).

Le phylum des *Bacteroidetes* comprend quatre classes: *Bacteroidia*, *Flavobacteria*, *Sphingobacteria* et *Cytophagia*, représentant environ 7000 espèces différentes. La classe la plus importante est celle des Flavobactéries, regroupant environ quatre fois plus d'espèces que les trois autres (Thomas *et al.*, 2011). Auparavant, les *Bacteroidetes* ont été considérés comme des anaérobies (Wexler, 2007). Mais actuellement, ce phylum regroupe également des espèces aérobies strictes appartenant à la classe *Flavobacteria* (Sails, 2014).

Les membres de ce phylum sont rencontrés dans diverses niches écologiques y compris le tractus gastro-intestinal des animaux malades, les océans, les eaux douces et les sols de différents endroits. La capacité de ces bactéries de s'adapter pratiquement à tous les types d'habitats sur terre revient à leur plasticité génomique. Les *Bacteroidetes* sont responsables de la dégradation de la matière organique complexe dans le sol, en particulier les glucides et les protéines. En effet, ces bactéries possèdent une action enzymatique couvrant un large spectre de substrats d'origine végétale, algale et animale (Thomas *et al.*, 2011). Le phylum des *Bacteroidetes* est largement présent dans les sols désertiques. D'après Wang (2015), des espèces appartenant aux genres *Cytophaga*, *Flavobacterium* et *Bacteroides* sont abondantes dans le désert chaud de Tataouine au sud de la Tunisie et dans le désert hyperaride de Taklamakan en Chine. Dans la vallée de la mort, un désert chaud en Californie (États Unis d'Amérique), il a été montré la présence des *Bacteroidetes* appartenant à des membres de l'ordre *Flavobacteriales* et du genre *Adhaeribacter* de la classe des *Sphingobacteria* (Makhalanyane *et al.*, 2015). Aussi, les membres de ce phylum sont également signalées dans le sol désertique du Namib et le sol saharien d'Égypte (Wang, 2015 ; Belov *et al.*, 2018).

De plus, nombreuses espèces appartenant au genre *Pontibacter* de la famille des Cytophagacées ont été observées dans le désert de Taklamakan (Wang, 2015). Selon Xu *et al* (2014), *Pontibacter diazotrophicus* est une nouvelle espèce bactérienne fixatrice d'azote isolée pour la première fois à partir de cet écosystème oligotrophe ou elle possède un rôle majeur comprenant essentiellement l'apport de l'azote et la stabilisation du sol contre l'érosion.

D'autres études ont montré que les phyla bactériens suivants sont également bien représentés dans les sols désertiques (Heulin, 2013 ; Fawaz, 2013 ; Makhalanyane *et al.*, 2015) :

- ❖ Les Cyanobactéries
- ❖ Les Firmicutes et,
- ❖ Les Gemmatimonadetes

3.4. Les Cyanobactéries

Les Cyanobactéries (anciennement nommées algues bleues) sont des microorganismes photosynthétiques, leur activité est identique à celle des algues et des végétaux (Gobat *et al.*, 2003).

Ce sont des procaryotes photo-autotrophes, des Gram négatif, présentant une grande diversité morphologique pouvant aller des petites formes unicellulaires dont la taille est inférieure à 2-3 μm , jusqu'aux formes de plus grandes tailles, coloniales, filamenteuses ou ramifiées (Jeffery *et al.*, 2013 ; Bernard, 2014). Elles peuvent vivre en état libre ou en associations symbiotiques avec divers organismes (Gobat *et al.*, 2003). Certains genres sont impliqués avec les champignons, il en résulte de nouveaux organismes appelés les lichens (Kaasalainen *et al.*, 2012).

Les Cyanobactéries photosynthétiques sont bien représentées dans diverses communautés édaphiques chaudes et froides (Makhalanyane *et al.*, 2015). Elles sont répertoriées dans la plupart des habitats, aussi bien dans les milieux aquatiques que dans les milieux désertiques (Mezouari, 2017). Selon Wang (2015), les Cyanobactéries peuvent être les principaux habitants des milieux arides, et vivent généralement à quelques millimètres sous la surface de roches translucides, comme le quartz, les galets de grès, l'halite et le gypse. La distribution des communautés cyanobactériennes dans les trottoirs du désert se présente plus fréquemment sous forme de plaques, et leur schéma de distribution spatiale dans différents sites est corrélé avec les précipitations et les températures moyennes annuelles (Warren-Rhodes *et al.*, 2007).

Les Cyanobactéries constituent un phylum d'une seule classe (*Cyanobacteria*), comprenant environ 150 genres et approximativement 2000 espèces (Garrity *et al.*, 2001). Les Cyanobactéries dominantes retrouvées dans le désert du Thar sont : *Chroococcus minutus*, *Oscillatoria pseudogeminata*, *Phormidium tenu* et *Nostoc* sp. (Bakelli, 2014). Ces taxons photosynthétiques sont particulièrement importants dans les environnements arides oligotrophes car ils sont impliqués dans les processus clés des cycles biogéochimiques tels que l'utilisation du carbone ou de l'azote (Chan *et al.*, 2013). Elles sont relativement résistantes et capables de maintenir un métabolisme photosynthétique et de fixer de l'azote atmosphérique tout en étant protégées des conditions désertiques (rayonnement élevé, dessiccation, stress salin, etc.) (Warren-Rhodes *et al.*, 2007 ; Jeffery *et al.*, 2013). En effet, les Cyanobactéries possèdent certains mécanismes de protection et de réparation pour contrer les effets de l'irradiation UV (Makhalanyane *et al.*, 2015).

Une telle indépendance trophique combinée à une grande adaptabilité aux variations des facteurs édaphiques, confère aux Cyanobactéries une ubiquité remarquable et une aptitude élevée à coloniser les milieux abiotiques ou caractérisés par des conditions édaphiques extrêmes tels que les déserts (Reynaud, 1984).

3.5. Les *Firmicutes*

Les *Firmicutes* sont des bactéries à Gram positif, possédant un coefficient de Chargaff (GC%) faible (Alauzet, 2009). Elles présentent une grande diversité morphologique, le plus souvent sont des bacilles mais il existe aussi des formes cocci et spiralées (Forêt, 2018). En fonction de leur métabolisme respiratoire, les *Firmicutes* sont hautement hétérogènes et elles regroupent des bactéries aérobies strictes et d'autres qui sont anaérobies strictes ou facultatives (Alauzet, 2009).

Ce phylum regroupe actuellement trois classes : *Bacilli*, *Clostridia* et *Erysipelotrichi* et comporte plus de 200 genres (Bally, 2015).

Les membres des *Firmicutes* sont caractérisés par leur grande capacité à coloniser différents types d'environnements tels que les sols, les océans, les sédiments marins et les tractus digestifs de mammifères (Terrat *et al.*, 2018). Ils sont largement répartis dans les sols désertiques. En effet, ces bactéries font partie de la communauté microbienne de nombreux déserts notamment le désert de Gibson (Australie), de Taklamakan, du Namib et aussi du Sahara d'Égypte (Heulin, 2013 ; Wang, 2015 ; Belov *et al.*, 2018).

D'après Belov *et al* (2018), ce phylum est bien adapté aux environnements oligotrophes arides et aux rayons UV. Aussi, certains genres des *Firmicutes* tels que *Bacillus* et *Paenibacillus* sont capables de former des endospores qui peuvent faciliter leur survie dans des conditions de dessiccation. D'autres taxons aérobies se caractérisent par une germination rapide des spores, un temps de génération court et une croissance non exigeante, ce qui convient parfaitement aux environnements désertiques (Wang, 2015).

3.6. Les *Gemmatimonadetes*

Le phylum *Gemmatimonadetes* a été proposé sur la base du seul isolat, *Gemmatimonas aurantiaca* qui représente l'espèce type. À ce jour, peu de souches ont été isolées et caractérisées (Zhang, 2003 ; Fawaz, 2013).

Ce sont des Gram négatif en forme de bâtonnet, mobiles. Les cellules se divisent par fission binaire mais présentent parfois des formes bourgeonnantes. Des mésophiles, aérobies, la teneur en G+C de l'ADN génomique de l'espèce type est de 66 % (Zhang, 2003). Elles sont plus abondantes dans les sols au pH proche de la neutralité que dans les sols acides (Debruyne, 2011).

Les bactéries appartenant à ce phylum sont communément présentes dans divers environnements de sols, de sédiments et d'eaux usées, ce qui suggère la présence des métabolismes polyvalents qui ont contribué à leur succès cosmopolite. Dans les banques de gènes d'ARNr 16S du sol, les *Gemmatimonadetes* font partie des principaux embranchements les plus fréquemment détectés, constituant 0,2 à 6,5% des communautés bactériennes du sol ce qui implique leur importance (Fawaz, 2013). Selon Debruyne (2011), les plus fortes proportions de *Gemmatimonadetes* ont été trouvées dans des sols arides ce qui suggère une adaptation aux environnements à faible humidité. En effet, une étude a démontré que ces bactéries sont parmi les membres prédominants des communautés bactériennes dans les régions hyperarides du désert Atacama (Fawaz, 2013). D'autres études moléculaires ont rapporté l'abondance de ces membres dans les déserts de l'Utah ce qui renforce la croyance que ce phylum s'est adapté aux sols les plus secs (Wang, 2015).

Deuxième partie :

*Évaluation de la diversité bactérienne
dans le sol saharien (étude de cas :
Algérie et Maroc)*

Malgré qu'il a été démontré que le Sahara est loin d'être une étendue stérile, dénuée de vie, les études relatives aux microorganismes vivant dans les sols sahariens ont été totalement négligées jusqu'à présent.

La structuration de ces microorganismes varie en fonction des propriétés chimiques, physiques et climatiques de leur environnement. Cela crée un défi pour les microbiologistes ayant l'intention de les identifier et aussi de comprendre les relations existantes entre les communautés microbiennes et les facteurs qui les contrôlent dans les sols sahariens.

1. Étude de la biodiversité bactérienne d'un sol dunaire du sud algérien (Région de Biskra)

La première étude choisie est menée au laboratoire du département de Microbiologie de l'université des Frères Mentouri Constantine, en collaboration avec le laboratoire de Bioénergétique et Ingénierie des Protéines (France). Elle a été finalisée en 2017 par Bioud Rayene et Matarfi Ibtissem sous la direction de Dr. ARABET afin d'amorcer la recherche sur la diversité de la population bactérienne autochtone du désert algérien parallèlement à la détermination de ses caractéristiques physicochimiques.

A cet égard, six (06) échantillons au total ont été prélevés à partir de la couche superficielle d'une dune située à la région de Biskra en mois de Février 2017 et réparties comme suit :

- Un échantillon prélevé du Sommet de la dune nommé (**S**)
- Un échantillon prélevé du côté Nord de la dune nommé (**N**)
- Un échantillon prélevé du côté Sud de la dune nommé (**Su**)
- Un échantillon prélevé du côté Est de la dune nommé (**E**)
- Un échantillon prélevé du côté Ouest de la dune et nommé (**O**)
- Un échantillon de la végétation existante sur la dune ciblant sa partie rhizosphérique et nommé (**V**). Ce dernier n'a été utilisé que dans l'étude microbiologique.

Cette méthode d'échantillonnage a été utilisée dans le but d'avoir une vue globale sur l'ensemble de la dune et aussi d'estimer les différences microbiologiques en fonction de changement des paramètres physicochimiques du sol étudié notamment l'ensoleillement.

L'étude a d'abord entrepris les analyses physicochimiques qui ont permis de déterminer la teneur du sol étudié en humidité, en matière organique et enfin de mesurer son pH. Ces paramètres ayant un impact direct sur les communautés microbiennes tant en terme de diversité que d'effectifs.

Les analyses microbiologiques ont été ensuite réalisées afin d'étudier la distribution et la diversité de la flore bactérienne mésophile aérobie (FTAM) dans l'ensemble du sol dunaire ainsi que de déterminer les caractéristiques morphologiques de ces bactéries. Toutes les cultures bactériennes ont été faites sur le milieu Luria Bertani (LB) et incubées 24h à 30°C.

1.1. Résultats des analyses physicochimiques des échantillons du sol dunaire

Les caractéristiques physicochimiques influencent fortement les propriétés biologiques des sols. Des relations étroites ont d'ailleurs été mises en évidence entre les caractéristiques physicochimiques et biologiques, et ceci aussi bien pour la microflore.

Dans cette étude, les analyses physicochimiques réalisées ont permis d'avoir un aperçu sur le taux de dessiccation auquel les bactéries ont été soumises, la quantité de matière organique disponible et enfin de mesurer l'un des principaux facteurs limitant pour les microorganismes : le pH.

Les résultats de ces analyses ont été résumés dans le tableau suivant :

Tableau (01) : Tableau récapitulatif des caractéristiques physicochimiques du sol étudié (Bioud et Matarfi, 2017).

Cotés	% humidité	% MO	pH
Nord (N)	5.89	3.26	7.36
Sud (Su)	3.77	2.45	7.40
Est (E)	4.99	2.70	7.39
Ouest (O)	4.23	2.19	7.38
Sommet (S)	5.76	4.85	7.36
Moyenne	4.92	3.09	7.37

De manière générale, l'ensemble des échantillons du sol ont montré un taux d'humidité faible. Ceci peut s'expliquer par l'aridité du climat (le taux d'évaporation est supérieur à celui des précipitations), ou par le fait que la capacité de rétention en eau du sol ayant une texture sableuse est très faible environ 8% en volume d'eau disponible, le reste s'infiltrerait rapidement vers le sous-sol (Naam et Ferhat, 2019).

Les taux d'humidité mesurés ont également montré une variabilité selon l'endroit du prélèvement du sol. Les échantillons « **E** », « **O** » et « **Su** » ont présenté des taux d'humidité presque égaux alors que les échantillons « **N** » et « **S** » ont signalé des valeurs plus importantes.

Il est important de souligner que les taux de matière organique observés dans les échantillons sont considérés comme élevés par rapport à ce qui est habituellement enregistré. En effet, comme ça a déjà été mentionné, les sols des zones arides, y compris les sols sahariens, sont généralement caractérisés par une faible teneur en matière organique qui ne dépasse pas 1%. Ces résultats peuvent s'expliquer soit par la présence d'une quantité assez importante de débris végétaux ou par l'absence de l'effet d'érosion exercé par les vents violents, ces derniers sont à l'origine de la diminution de la teneur en matière organique des sols dans les régions désertiques.

Il est à signaler également que la teneur de la matière organique était importante dans les échantillons « **N** » et « **S** » tandis que les autres échantillons ont présenté des valeurs proches. Cette observation laisse s'attendre à trouver une flore bactérienne beaucoup plus abondante dans les échantillons « **N** » et « **S** » où la teneur en humidité et en matière organique était plus élevée.

Les mesures de pH ont montré que les échantillons du sol étudié présentent des valeurs presque similaires et proches de la neutralité. Ces résultats n'étaient pas surprenants du fait que la plupart des sols désertiques sont caractérisés par un pH neutre à alcalin (Mchugh *et al.*, 2017). Cette qualité de pH est très favorable pour la prolifération des communautés bactériennes qui préfèrent les sols neutres ou légèrement alcalins.

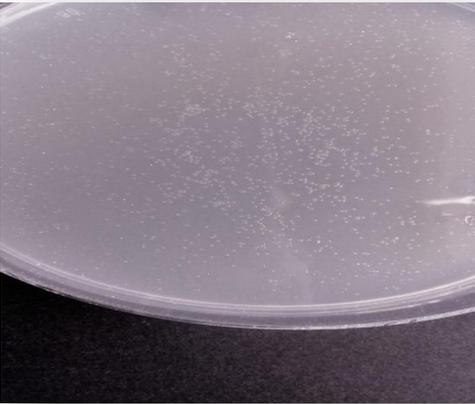
1.2. Résultats des analyses microbiologiques des échantillons du sol étudié

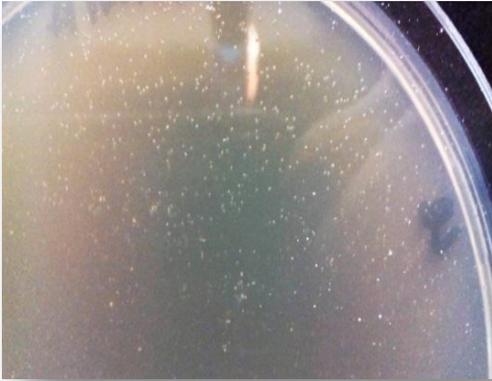
Une comparaison a été établie entre la biodiversité bactérienne des échantillons du sol collectés ainsi que de la partie végétation « **V** ». Cette partie du travail permet d'avoir un aperçu sur la flore bactérienne existante dans ce type de sol ainsi que sa distribution sur les

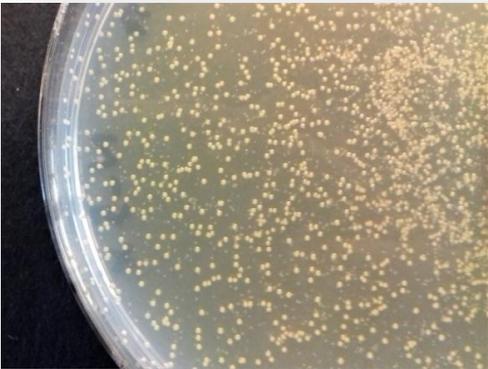
différents côtés de la dune. Elle permet aussi d'affirmer ce qui a déjà été stipulé selon les résultats des analyses physicochimiques.

Au total, uniquement huit (08) souches bactériennes distinctes ont été observées sur l'ensemble des échantillons étudiés. Le tableau suivant (Tableau 02) décrit les caractères macroscopiques des isolats de bactéries et détermine les échantillons où elles étaient observées.

Tableau (02) : Description macroscopique des colonies bactériennes isolées à partir des différents échantillons du sol dunaire (Bioud et Matarfi, 2017).

Indice de la souche	Échantillon d'isolement	Figure des souches	Description macroscopique
S1	Observée dans les échantillons : « N », « S », « O », « E », « Su » et « V ».		Colonies de taille très petite, arrondies, de couleur jaune et de texture visqueuse. Elles se présentent souvent en chainettes.
S2	Observée dans les échantillons : « N » et « O » uniquement.		Colonies très petites de taille, bien arrondies, de couleur blanche et de texture visqueuse.

<p>S3</p>	<p>Observée exclusivement dans les échantillons : « E » et « O ».</p>		<p>Grosses colonies, d'aspect irrégulier, de couleur marron et de texture plus ou moins sèche.</p>
<p>S4</p>	<p>Observée uniquement dans l'échantillon : « O ».</p>		<p>Très petites colonies transparentes et brillantes.</p>
<p>S5</p>	<p>Observée dans les échantillons : « N », « S », « O », « E » et « Su »</p>		<p>Colonies moyennes de taille, arrondies, de couleur marron et de texture lisse et visqueuse.</p>

<p>S6</p>	<p>Observée uniquement dans l'échantillon : « Su ».</p>		<p>Colonies grosses, arrondies, de couleur blanche et de texture visqueuse et brillante.</p>
<p>S7</p>	<p>Observé dans les échantillons : « Su » et « V ».</p>		<p>Grosses colonies, d'aspect irrégulier, de couleur grisâtre avec une texture plus ou moins sèche à poudreuse.</p>
<p>S8</p>	<p>Observée uniquement dans l'échantillon : « Su ».</p>		<p>Très petites colonies, de couleur jaune, d'aspect irrégulier, bombées et plus ou moins sèches.</p>

Deux souches se sont montrées dominantes dans cette étude, il s'agit des souches S1 et S5, tandis que la souche S4 n'a été observée que dans l'échantillon « **O** ». Les souches S6 et S8 ont été isolées exclusivement de l'échantillon « **Su** ».

En l'occurrence avec les conditions physico-chimiques déjà présentées, les huit souches isolées confirment encore une fois, la capacité des bactéries à résister aux conditions extrêmes du sol saharien. Les aspects macroscopiques reflètent la diversité existante dans le sol étudié

qui pourrait être bien plus importante si d'autres méthodes d'isolement plus performantes auraient été employées (Isolement des souches non cultivables par les techniques moléculaires).

La méthode assez particulière d'échantillonnage s'est montrée très fiable et représentative. En effet, elle a pu confirmer que les souches sont distribuées selon la teneur en matière organique et l'influence des autres conditions physico-chimiques. À titre d'exemple, le sommet (échantillon « S ») se trouve pratiquement sous le soleil tout au long de la journée. Ceci s'applique également sur le côté Est (échantillon « E ») qui reçoit les rayons du soleil pendant les parties les plus chaudes de la journée (matinée et début d'après-midi). Ces conditions influenceraient fortement la richesse de la flore bactérienne du sol aussi bien sur le plan qualitatif que quantitatif, ce qui pourrait bien expliquer la pauvreté des échantillons collectés de ces deux côtés de la dune particulièrement.

Les échantillons « N » et « S » qui sont les plus riches en matière organique, ne se sont pas avérés les plus peuplés en bactéries mais plutôt les échantillons « O » et « Su ». Ceci a montré que les caractéristiques physico-chimiques du sol ne sont pas les seuls facteurs qui gèrent la variété de la population bactérienne. D'après Mchugh *et al* (2017), le climat peut jouer un rôle plus important que les propriétés du sol dans la structuration des communautés microbiennes dans les sols arides. En plus, les bactéries vivant dans ce type d'écosystème sont censées être bien adaptées aux conditions extrêmes et en particulier la carence en éléments nutritifs (Naoum, 2016).

Une autre observation également inattendue était le nombre de souches isolées à partir de l'échantillon « V » qui correspond à la partie rhizosphérique de la végétation rencontrée au niveau de la dune. En effet, seules deux souches ont été isolées à partir de cet échantillon. L'une était la souche (S1) dominante et présente sur toute la dune et l'autre était la souche (S7) rencontrée également sur le côté sud de la dune. Ces résultats ne sont pas en concordance avec ce qui est décrit dans la littérature. Plusieurs études ont montré que la densité et l'activité bactérienne à proximité des racines sont particulièrement intenses en raison des échanges mutuels d'éléments minéraux et organiques entre la bactérie et la plante (Lynch et Whipps, 1990 ; Karabi, 2017).

D'une manière générale, les échantillons de sol étudié ont présenté une diversité bactérienne faible. La pauvreté de la population bactérienne rencontrée, ainsi que sa distribution inattendue rendent les résultats obtenus assez particuliers. Et donc afin de plus

approfondir l'étude et confirmer les résultats, une coloration de Gram accompagnée d'une observation microscopique minutieuse de la forme des cellules bactériennes ont été réalisées (Voir mémoire de Master Bioud et Matarfi, 2017). Il en est sorti que la majorité des souches sont des bacilles à Gram positif notamment pour ce qui est de la souche dominante S1. Ceci correspond bien aux résultats de certaines études qui stipulent que 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 (Gobat *et al.*, 2003 ; Karabi, 2017).

Les résultats obtenus suite à la coloration de Gram et l'observation macroscopique ne renseignent pas sur la nature des souches rencontrées ni sur leur classification phylogénétique. Il serait très intéressant de continuer les études et de pouvoir identifier les souches déjà décrites. Ces dernières étant de grande capacité de résistance, pourraient même être utilisées pour enrichir et remédier certains sols qui étaient dévastés par des pratiques humaines.

2. Étude de la biodiversité bactérienne d'un sol désertique au sud-est marocain (Région de Merzouga)

Le second travail choisi a été élaboré par une équipe de chercheurs (Aanniz *et al*) sous l'intitulé : *Thermophilic bacteria in Moroccan hot springs, salt marshes and desert soils*, mené dans le laboratoire de Microbiologie et Biologie Moléculaire au centre National pour la Recherche Scientifique et Technique au Maroc et il a été publié en 2015 dans « *Brazilian Journal of Microbiology* ».

Cet article a été finalisé afin d'étudier la diversité des bactéries thermophiles dans quatre sources chaudes, trois marais salants et douze sites du sol désertique de Merzouga au Maroc entre Mars 2009 et juillet 2010.

En effet, l'étude des bactéries thermophiles est devenue un domaine de recherche majeur. En raison de leur potentiel important dans la production de biomolécules hautement stables aux conditions physico-chimiques extrêmes, ces organismes suscitent un intérêt biotechnologique particulier.

Pour entreprendre cette étude, Trente-trois échantillons ont été prélevés dans des conditions stériles, puis transportés à l'aide de boîtes thermiques au laboratoire où plusieurs analyses ont été mises en œuvre afin de réaliser :

❖ **Étude phénotypique**

Cette étude a permis de réaliser un dénombrement microbiologique sur milieu solide Tryptone soja (TSA), dont le nombre des bactéries obtenu a été exprimés en unité formant colonie (UFC). Aussi, de faire une caractérisation morphologique des colonies, une coloration de Gram et des spores en vert de malachite.

Ensuite, de tester la présence de catalase et d'oxydase (tests fondamentaux pour l'orientation dans l'identification en bactériologie systématique), la capacité des isolats à se développer à différentes températures, en les incubant à 55, 60, 65, 70, 75 et 80°C pendant 48 h, et aussi leur capacité à tolérer des concentrations de NaCl variant de 0,5 à 15%, en les incubant à 55°C pendant 48 h. La croissance a été déterminée par une observation visuelle et tous les tests ont été effectués en trois exemplaires.

Enfin, d'étudier la capacité des isolats à produire des thermo-enzymes principalement les amylases, cellulases, protéases et les lipases.

❖ **Étude génotypique**

Une combinaison de deux techniques a été utilisée : la BOXA1R-PCR et le séquençage du gène de l'ARNr 16S, pour identifier tous les isolats thermophiles obtenus.

Un ensemble de 240 isolats bactériens a été obtenue, 108 isolats ont été récupérés du sol désertique de Merzouga. La densité bactérienne dans les sols sableux était de l'ordre de 5×10^3 UFCg⁻¹.

Sur les 240 isolats 235 étaient de couleur beige, 3 étaient blancs et 2 étaient jaunes. Tous les isolats étaient Gram positif, en forme de bâtonnet et formant des endospores. 225 isolats étaient positifs à la catalase et à l'oxydase.

En ce qui concerne l'effet de la température, toutes les bactéries isolées ont été considéré comme thermophiles avec une croissance optimale à 55°C. Le nombre de souches en croissance est réduit entre 55°C et 65°C alors qu'à 70°C, il est réduit de façon drastique. Seuls 4 isolats tolèrent 75°C et aucun n'a pu se développer à 80°C.

Toutes les bactéries isolées sont des halotolérantes (croissance à des concentrations de NaCl entre 0,5% et 10%). Le nombre de souches en croissance est réduit lorsque la concentration en sel augmente dans le milieu. Tous les isolats sont capables de se développer à 3% de NaCl, alors que le nombre des isolats obtenu à des concentrations de 5% et 10% de

NaCl étaient 220 et 183 respectivement. Aucune croissance bactérienne soulignée à 15% de NaCl.

Les résultats de la production de thermo-enzymes ont montré que 171 souches (71,25%) ont produit des amylases, 121 souches (50,41%) ont produit des protéases et seulement 16 souches (5,41%) ont produit des cellulases. Aucun des isolats n'a produit de lipases. En outre, 9 souches combinaient les trois enzymes testées et 85 souches produisaient deux enzymes. 35 souches n'ont produit aucune des enzymes testées.

Sur la base du séquençage du gène de l'ARNr 16S et de la BOXA1R-PCR, deux genres appartenant au phylum des *Firmicutes* ont été identifiés. Le premier genre était *Bacillus* le plus dominant (97,5%) puis le genre *Aeribacillus* (2,5%). Le tableau suivant présente les différentes espèces identifiées et détermine leur nombre totales et ceux isolées du sol désertique de Merzouga.

Tableau (03) : Les différentes espèces identifiées du sol désertique de Merzouga (Aanniz *et al.*, 2015).

Genre	L'espèce identifiée	Nombre des souches totales	Nombre des souches du sol désertique
<i>Bacillus</i>	<i>B. licheniformis</i>	119	49
	<i>B. aerius</i>	44	23
	<i>B. sonorensis</i>	30	11
	<i>B. subtilis</i>	8	3
	<i>B. amyloliquefaciens</i>	8	4
	<i>B. tequilensis</i>	3	1
	<i>B. pumilus</i>	3	1
	<i>Bacillus sp.</i>	19	15
<i>Aeribacillus</i>	<i>A. pallidus</i>	4	4
	<i>Aeribacillus sp</i>	2	1
	Total	240	108

D'une manière générale, la densité bactérienne du sol sableux de Merzouga (5×10^3 UFCg⁻¹) est nettement faible par rapport à celle habituellement rencontrée. Ceci pourrait être expliqué par trois facteurs : une sélection sévère de microorganismes capables de développer des

stratégies de survie telles que la dormance et la polyvalence face aux conditions de stress intense dans cet environnement désertique. Aussi, l'absence totale de végétation augmente la sélection, car un effet positif de la rhizosphère sur la diversité et la densité des bactéries ont été démontrées, et enfin la rareté nutritionnelle de ce sol sableux (Gommeaux *et al.*, 2005). De plus, la densité bactérienne du site de Merzouga est équivalente à un autre environnement extrême retrouvé dans un volcan de boue saline.

Les caractéristiques morphologiques, physiologiques et microscopiques des isolats récupérés étaient conformes à la description du genre *Bacillus*. Cependant, les résultats du séquençage des gènes de l'ARNr 16S et la BOXA1R-PCR ont montrés que 97,5% des isolats sont attribués au genre *Bacillus* et 2,5% au genre *Aeribacillus*. La combinaison des deux techniques a permis d'identifier 219 isolats (91,25%) au niveau de l'espèce ce qui indique que ces techniques n'étaient pas seulement un outil puissant d'identification de bactéries thermophiles au niveau des espèces mais a également révélé une diversité inter-espèce considérable. 21 isolats sont restés non identifiés au niveau de l'espèce ; 19 ont été attribués à *Bacillus* sp. et 2 à *Aeribacillus* sp. Cela pourrait être une indication de la présence d'une éventuelle nouvelle espèce thermophile. Ces isolats doivent être analysés plus en détail.

En effet, les souches du genre *Bacillus* sont bien adaptées aux environnements chauds et secs, elles possédant plusieurs mécanismes de résistance à la dessiccation telle que la sporulation. De plus, leurs besoins nutritionnels sont généralement simples, et donc elles n'ont pas besoin de nutriments spécifiques pour leur croissance d'où leur capacité de coloniser des niches oligotrophes comme les sols désertiques.

L'étendue de la diversité bactérienne dans cette étude n'est pas surprenante car la majorité des bactéries trouvées dans le biotope étudié se trouvent couramment dans l'environnement et ont été décrites dans de nombreux environnements différents étudiés ailleurs. Néanmoins, *B. aerius* et *B. tequilensis* ont été signalées, pour la première fois, comme des bactéries thermophiles dans cette étude.

Plusieurs études ont rapporté que les isolats récupérés des sols désertiques appartiennent au genre *Bacillus*. Ngoc-Phuc *et al.* (2007), ont signalé la dominance de *B. licheniformis* et la présence de *B. subtilis* dans un désert japonais. Lester *et al.* (2007), ont signalé la présence de *B. subtilis* et de *B. pumilus* dans des sols extrêmement arides du désert d'Atacama. *B. sonorensis* est couramment observé dans les zones arides, comme les déserts du Sahara, de Mojave, de Sonoran et de Gobi (Palmisano *et al.*, 2001).

Au Maroc, une autre étude précédente à évaluer la diversité bactérienne du sol désertique de Merzouga (Gommeaux *et al.*, 2005). Le résultat du séquençage du gène de l'ARNr 16S des isolats a révélé la présence de trois divisions bactériennes: les *Firmicutes*, les Protéobactéries, et les *Bacteroidetes*. Les *Firmicutes* étaient globalement plus abondantes, représentés par le genre *Bacillus* et *Planococcus*.

Il a été signalé que des bactéries thermophiles, principalement des souches de *Bacillus*, produisaient des thermo-enzymes de grande valeur (Meintanis *et al.*, 2008). Conformément à leur mode de vie saprophyte, les souches de *Bacillus* sécrètent de nombreuses enzymes qui hydrolysent les polysaccharides, les protéines, les lipides et d'autres nutriments.

Les souches obtenues dans le cadre de cette étude ont produit un assortiment d'enzymes extracellulaires qui peuvent contribuer au cycle des nutriments dans la nature. Ce résultat indique également que les souches testées peuvent avoir développé une capacité génétique et physiologique à utiliser la matière organique disponible, via la production d'exo-enzymes. Cela pourrait également s'expliquer par la tendance des sociétés microbiennes à survivre avec une faible teneur en matières organiques dans ces niches et par le développement de systèmes adaptables pour l'absorption de toute nourriture disponible.

3. Comparaison entre les deux études précédentes

Une première étape nécessaire à notre compréhension de la vie dans des environnements extrêmes comme le Sahara, est une description et une caractérisation des communautés microbiennes habitant ces écosystèmes.

Les deux études choisies dans ce travail avaient comme but d'évaluer la diversité bactérienne dans les sols sahariens. Les résultats obtenus dans ces travaux ont montré la présence d'une flore bactérienne plus ou moins diversifiée dans des écosystèmes aussi pauvres et arides. Ceci implique la capacité de ces microorganismes à utiliser divers mécanismes de résistance qui leur permettant non seulement de survivre dans ces conditions défavorables, mais aussi de se développer souvent de manière optimale.

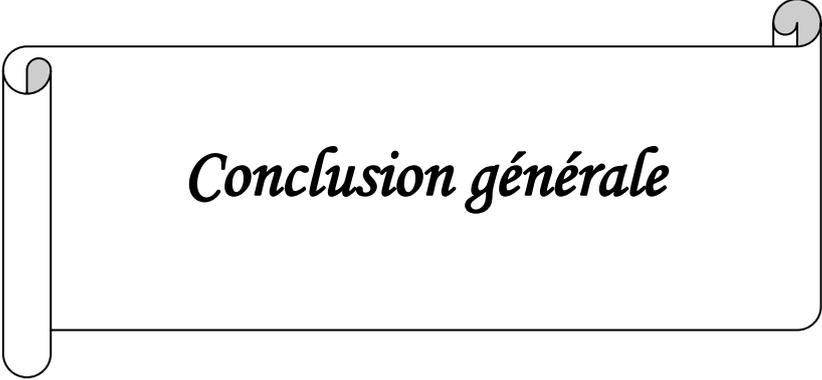
La première étude a porté sur une étude phénotypique seulement. Selon les résultats obtenus de la description macroscopique, 8 souches d'aspects différents ont été observées. Les résultats étaient intéressants mais demeurent de loin, insuffisants et très peu informatifs.

La deuxième étude s'est orientée vers une étude phénotypique suivie d'une étude génotypique. Cette dernière a révélé la présence de 108 souches bactériennes appartenant au genre *Bacillus* et *Aerobacillus*.

Il est donc clair que, la caractérisation phénotypique, bien qu'elle constitue une étape fondamentale et préliminaire, elle reste sommaire et imprécise. Afin d'attribuer des profils acceptables et fiables aux souches sélectionnées, une identification moléculaire s'avère indispensable et obligatoire. En effet, l'expression des phénotypes microbiens est hautement dépendante des variables environnementales (le pH, la température, le milieu de culture sélectif ou non sélectif, la présence de facteurs de stress, etc.), et par conséquent, des incohérences dans le processus d'identification peuvent s'introduire.

De plus, un autre point important traité par la deuxième étude offre des perspectives en termes d'exploitation biotechnologique des souches bactériennes identifiées. Grâce à leurs potentiels à produire de nombreuses enzymes thermostables. Ces espèces sont considérées comme une source inépuisable de nouveaux catalyseurs pour la bio-industrie.

On peut conclure que l'étude réalisée sur le sol saharien d'Algérie ne peut être qu'un simple premier pas dans un long chemin à faire pour pouvoir comprendre l'architecture de la population bactérienne de ce milieu extrême. Ceci demande l'application de différentes techniques biochimiques et moléculaires telles que l'analyse du gène codant l'ARNr 16S des souches isolées afin de pouvoir les identifier et déterminer leur capacité de résistance mais aussi leurs utilisations éventuelles. La région examinée n'est qu'un tout petit point du grand Sahara algérien, une cartographie microbiologique de cet écosystème aussi vaste que mystérieux, demeure un objectif lointain pour les microbiologistes algériens.



Conclusion générale

Les sols désertiques étaient supposés pendant longtemps, comme des milieux complètement stériles suite aux conditions environnementales extrêmes et persistantes. Mais les travaux d'exploration ont montré qu'il existe une microflore abondante et diversifiée.

Le Sahara algérien occupe une place très importante sur le plan géographique, économique et environnemental. Ce milieu désertique extrême représente une véritable richesse écologique. Cependant, il n'a été que rarement étudié. Le sol du Sahara algérien demeure inconnu sur le plan microbiologique. Il sera alors intéressant de s'adresser à l'étude de ce milieu assez particulier.

À partir des analyses physicochimiques réalisés dans une étude du sol désertique de Biskra, il a été démontré que le sol dunaire étudié est caractérisé par :

- Un taux d'humidité et de matière organique assez acceptable.
- Un pH qui tourne autour de la neutralité.

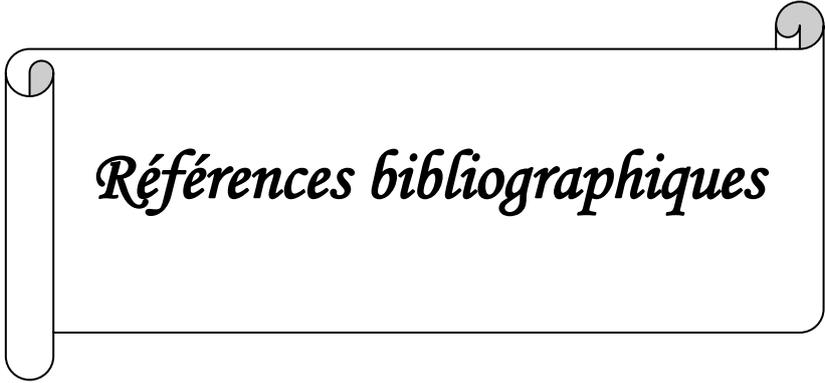
De l'autre côté, les analyses microbiologiques ont permis d'identifier huit souches bactériennes distinctes et de montrer que la distribution de la flore bactérienne ne dépend pas seulement des caractéristiques physicochimiques du sol mais aussi d'autres facteurs sont impliqués tels que le climat et la capacité de résistance des bactéries. Sur le plan microbiologique, les bacilles à Gram positifs étaient dominants. Cependant, aucune identification des espèces des souches isolées n'a pu être réalisée, ce qui laisse l'étude non exhaustive.

Dans le deuxième travail réalisé au Maroc, un ensemble de 240 isolats bactériens a été obtenue dont 108 isolats ont été récupérés du sol désertique de Merzouga. Suite aux conditions défavorables de ce sol sableux, la densité bactérienne soulignée était nettement faible (5×10^3 UFCg⁻¹) ce qui est en ressemblance avec l'étude algérienne. L'utilisation des techniques moléculaires dans ce deuxième travail a fourni davantage d'information sur la nature, la phylogénie et la diversité des souches isolées. Ceci montre l'importance primordiale de l'intégration de ce genre de techniques dans les études des écosystèmes et particulièrement dans le cas des déserts où le nombre des bactéries non cultivables risque fortement d'être plus important.

Ce que l'on peut déduire des deux études, c'est que la présence d'une telle diversité dans les sols désertiques implique la capacité de ces bactéries à utiliser divers mécanismes de résistance afin de s'adapter aux conditions extrêmes qui les entourent.

La compréhension de la structuration des populations bactériennes dans le milieu saharien demande l'application d'une approche polyphasique où il y a une combinaison entre les différentes techniques phénotypiques (tests biochimiques, coloration de Gram, des spores...) et les techniques moléculaires comme l'analyse du gène codant l'ARNr 16S afin de pouvoir identifier la position phylogénétique des bactéries isolées, de déterminer leur capacité de résistance ainsi que leurs utilisations éventuelles.

Il serait donc un très grand apport de pouvoir identifier et déterminer les mécanismes de résistance des souches isolées du désert algérien. Ces dernières pourraient être de nouvelles potentielles productrices des molécules d'intérêt industriel.



Références bibliographiques

Aanniz, T., Ouadghiri, M., Melloul, M. et al. (2015). Thermophilic bacteria in Moroccan hot springs, salt marshes and desert soils. *Brazilian Journal of Microbiology* [en ligne], 46 (2), 443-453. (page consultée le 28 août 2020)

URL : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26273259/>

Alauzet, C. (2009). Taxonomie des bactéries anaérobies : de la reclassification à la découverte de nouveaux pathogènes [en ligne]. Thèse de doctorat : Biologie de santé et environnement. Lorraine : Nancy Université, 318 p. (page consultée le 17 avril 2020)

URL: http://docnum.univ-lorraine.fr/public/SCD_T_2009_0123_ALAUZET.pdf

Alismail, S. (2018). Les espaces intermédiaires en architecture du désert [en ligne]. Mémoire de magister : Architecture. Biskra : Université Mohamed Khider, 112 p. (page consultée le 28 mai 2020)

URL: https://issuu.com/sabahalismail/docs/00_portfolio

Ameur, H. (2014). Effet d'osmoprotecteurs naturels sur la restauration de croissance de *Streptomyces* et de plantes d'intérêt agricole sur sol salé ou aride [en ligne]. Thèse de doctorat : Microbiologie. Sétif : Université Ferhat Abbas Sétif 1, 145 p. (page consultée le 30 avril 2020)

URL: <https://www.univ-setif.dz/Tdoctorat/facultes/facultes/snv/2014/AMEUR%20Hanane.pdf>

An, S. (2012). Characterization of bacterial diversity in three oligotrophic environments using high-throughput sequencing technology [en ligne]. Thèse de doctorat : Microbiologie. Paris : Université Paris Sud – Paris XI, 190 p. (page consultée le 8 juin 2020)

URL: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00859417/document>

Archives de documents de la Food and Agriculture Organization (FAO). Foresterie en zones arides [en ligne]. (page consultée le 29 mars 2017)

URL: <http://www.fao.org/3/t0122f/t0122f03.htm?fbclid=IwAR2ckXgVoy9ZJiTxAzMDC-6q6v1diJ4OsJHQI5RE6mX-EoUr0DywCE3pbR8>

Bakelli, A. (2014). Etude quantitative et qualitative des communautés microbiennes rhizosphériques au cours du développement in-situ de la luzerne commune (*Medicago sativa* L.) sur un sol Saharien [en ligne]. Mémoire de magister : Ecologie microbienne de la Rhizosphère. Alger : Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 77 p. (page consultée le 27 mars 2020)

URL: <http://repository.usthb.dz/bitstream/handle/123456789/2689/TH8016.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Bally, P. (2015). Microbiote intestinal et développement de l'obésité : Une approche par métagénomique et métabolomique du concept de répondeur et non-répondeur. Thèse de doctorat : Sciences Agronomiques. Paris : Université Paris-Sud. 204 p. (page consultée le 15 mai 2020)

URL: <https://www.theses.fr/2015PA112085/abe>

Bazzine, M., Hamdi-Aissa, B. (2014). Etudes des croutes biologiques de quelques sols gypseux salins du milieu Saharien : Cas de la cuvette de Ouargla (Sahara septentrional Algérien). Algerian journal of arid environment [en ligne], 4 (1), 45-52. (page consultée le 19 avril 2020)

URL: <https://journals.univ-ouargla.dz/index.php/AJAE/article/download/100/74/>

Belov, A.A., Cheptsov, V.S., Vorobyova, E.A. (2018). Soil bacterial communities of Sahara and Gibson deserts: Physiological and taxonomical characteristics. AIMS Microbiology [en ligne], 4(4), 685–710. (page consultée le 18 avril 2020)

URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6613332/>

Benabdallah, A.M. (2014). Screening de souches extrêmophiles halophiles du genre *Bacillus* de la Sebkhia D'Oran (caractérisation phénotypique). Mémoire Master Recherche : biologie Moléculaire et cellulaire. Tlemcen : Université de Tlemcen, 101 p. (page consultée le 19 avril 2020)

URL: <http://dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/5638>

Berkal, I. (2006). Contribution à la connaissance des sols du Sahara d' Algérie [en ligne]. Mémoire de magister : Sciences agronomiques. Alger : Institut National Agronomique, 108p. (page consultée le 24 mars 2020)

URL: http://dspace.ensa.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/98/1/berkal_i.pdf

Berkani, N., Khelaifia, M., Mebarki, F.Z. (2017). Isolement des bactéries du sol résistantes aux métaux lourds [en ligne]. Mémoire Master Recherche: Biologie moléculaire des procaryotes. Guelma : Université 8 mai 1945, 40 p. (page consultée le 19 mai 2020)

URL: <http://dspace.univ-guelma.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1796/M570.741%20BIOLOGIE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Bernard, C. (2014). Les cyanobactéries et leurs toxines. Revue Francophone des Laboratoires [en ligne], 2014 (460), 53-68. (page consultée le 2 mai 2020)

URL:https://lacreteil.fr/IMG/pdf/bernard_c_2014_revue_cyanobacteries.pdf?1069/797ce9eaf7570f12417f918cb73a9c72e7a905a1

Berthiaume, S. (2014). Développement de marqueurs moléculaires pour l'identification et la quantification de deux espèces de champignons arbusculaires en utilisant la PCR en temps réel. Mémoire de maîtrise : Sciences Biologiques. Montréal : Université de Montréal, 118 p. (page consultée le 12 mars 2020)

URL: <https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/handle/1866/12600>

Biology Online [en ligne]. (page consultée le 7 mai 2020)

URL: <https://www.biologyonline.com/dictionary/proteobacteria>

Bioud, R., Matarfi, I. (2017). Évaluation de la biodiversité bactérienne d'un sol dunaire du sud Algérien (Région de Biskra)[en ligne]. Mémoire Master Recherche: Microbiologie Générale et Biologie Moléculaire des Microorganismes. Constantine: Université des Frères Mentouri, 47 p. (page consultée le 20 février 2020)

URL:[https://fac.umc.edu.dz/snv/faculte/biblio/mmf/2017/Evaluation%20de%20la%20biodiversit%C3%A9%20bact%C3%A9rienne%20d%E2%80%99un%20sol%20dunaire%20du%20sud%20Alg%C3%A9rien%20\(R%C3%A9gion%20de%20Biskra\).pdf](https://fac.umc.edu.dz/snv/faculte/biblio/mmf/2017/Evaluation%20de%20la%20biodiversit%C3%A9%20bact%C3%A9rienne%20d%E2%80%99un%20sol%20dunaire%20du%20sud%20Alg%C3%A9rien%20(R%C3%A9gion%20de%20Biskra).pdf)

Boldareva-Nuianzina, E.N., Bláhová, Z., Sobotka R. et al. (2013). Distribution and origin of oxygen-dependent and oxygenindependent forms of Mg-protoporphyrin monomethylester cyclase among phototrophic proteobacteria Applied and Environmental Microbiology [en ligne], 79 (8), 2596-2604. (page consultée le 2 mai 2020)

URL:https://www.researchgate.net/publication/235441773_Distribution_and_Origin_of_Oxygen-Dependent_and_Oxygen-Independent_Forms_of_Mg-Protoporphyrin_Monomethylester_Cyclase_among_Phototrophic_Proteobacteria

Bouallala, M. (2013). Etude floristique et nutritive spatio-temporelle des parcours camelins du Sahara Occidental algérien. Cas des régions de Béchar et Tindouf. Thèse de doctorat : Sciences agronomiques. Ouargla : Université Kasdi Merbah, 208 p.

Boudemagh, A. (2007). Isolement, à partir des sols Sahariens, de bactéries actinomycétales productrices de molécules antifongiques, identification moléculaire de souches actives [en ligne]. Thèse de doctorat : Microbiologie Appliquée. Constantine : Université Mentouri, 132 p. (page consultée le 21 avril 2020)

URL: <https://bu.umc.edu.dz/theses/biologie/BOU4975.pdf>

Boudjellal, L. (2009). Rôle de l'oasis dans la création de l'îlot de fraîcheur dans les zones chaudes et arides : cas de l'oasis de chetma -Biskra –Algérie [en ligne]. Mémoire de magister : Architecture Bioclimatique. Constantine : Université Mentouri, 145 p. (page consultée le 21 février 2020)

URL: <https://bu.umc.edu.dz/theses/architecture/BOU6126.pdf>

Boumaraf, B. (2013). Caractéristiques et fonctionnement des sols dans la vallée d'Oued Righ, Sahara nord oriental, Algérie[en ligne]. Thèse de doctorat : Pédologie. Ardenne : Université de Reims Champagne, 97 p. (page consultée le 18 mars 2020)

URL: <https://www.theses.fr/2013REIML002.pdf>

Brock, T.D., Madigan, M., Martinko, J. (2007). Biologie des micro-organismes. Paris : Pearson éducation France. 1047 p.

Calvert, R. (2013). Le sol. 2ème éd. Paris : France Agricole. 678 p. – (Agri production).

Chaibou, M. (2005). Productivite zootechnique du désert : le cas de bassin laitier d'Agadez au Niger [en ligne]. Thèse de doctorat : Biologie des populations et écologie. Montpellier : Université de Montpellier II, 379 p. (page consultée le 26 mai 2020)

URL: http://camelides.cirad.fr/fr/science/pdf/these_chaibou.pdf

Chaïch, K. (2018). Diversité des associations Rhizobium-Légumineuses de quelques espèces spontanées du Sahara septentrional [en ligne]. Thèse de doctorat : Sciences Agronomiques. Ouargla : Université Kasdi Merbah, 86 p. (page consultée le 8 mars 2020)

URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/2085/a4f12af389f1817edf62f4cbd5e384da9170.pdf>

Chan, Y., Van Nostrand, J.D., Zhou, J. et al. (2013). Functional ecology of an Antarctic Dry Valley. P Natl Acad Sci USA [en ligne], 110 (22), 8990–8995. (page consultée le 2 mai 2020)

URL: <https://www.pnas.org/content/110/22/8990>

Chehma, A. (2005). Etude floristique et nutritive des parcours camelins du Sahara septentrional Algérien : cas des régions de Ouargla et Ghardaia [en ligne]. Thèse de doctorat : Biologie Appliquée. Annaba : Université Badji Mokhtar, 148p. (page consultée le 23 mars 2020)

URL: http://camelides.cirad.fr/fr/science/pdf/these_chehma.pdf

Chehma, A. (2008). Phytomasse et valeur nutritive des principales plantes vivaces du Sahara septentrional algérien [en ligne]. Alger : Dar Elhouda. 68 p. (page consultée le 15 mars 2020)

URL:https://www.researchgate.net/publication/271833656_Phytomasse_et_valeur_nutritive_des_principales_plantes_vivaces_du_sahara_septentrional_algerien

Chehma, A. (2011). Caractéristiques floristiques et nutritionnelles faces aux variations climatiques [en ligne]. L'effet du Changement Climatique sur l'élevage et la gestion durable des parcours dans les zones arides et semi-arides du Maghreb, Université Kasdi Merbah, 24 novembre 2011, Ouargla, 7 p. (page consultée le 2 mars 2020)

URL:<http://manifest.univ-ouargla.dz/documents/Archive/Archive%20Faculte%20des%20Sciences%20de%20la%20Nature%20et%20de%20la%20Vie%20et%20des%20Sciences%20de%20la%20Terre%20et%20d>

[e%20l'Univers/WORKSHOP-INTERNATIONAL-SUR-L-effet-du-changement-climatique-sur-l-elevage-et%20la-gestion-durable-21-24-Novembre-2011/Abdelmadjid-Chehma1.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Abdelmadjid-Chehma1/publication/271833362_Etude_floristique_spatio-temporelle_des_parcours_sahariens_du_Sud-Est_algerien/links/54d32f200cf2b0c6146d07a5.pdf)

Chehma, A., Djebbar , M.R., Rouabeh, L. (2005). Étude floristique spatio-temporelle des parcours sahariens du Sud-Est algérien. *Sécheresse*, 16 (4), 275-85. (page consultée le 28 février 2020)

URL:[https://www.researchgate.net/profile/Abdelmadjid_Chehma2/publication/271833362_Etude_floristique_spatio-temporelle_des_parcours_sahariens_du_Sud-Est_algerien/links/54d32f200cf2b0c6146d07a5.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Abdelmadjid-Chehma2/publication/271833362_Etude_floristique_spatio-temporelle_des_parcours_sahariens_du_Sud-Est_algerien/links/54d32f200cf2b0c6146d07a5.pdf)

Chengyou, C., Ying, Z., Zhenbo., C. et al. (2017). Soil bacterial community responses to revegetation of moving sand dune in semi-arid grassland. *Applied Microbiology Biotechnology*, 101 (15), 6217-6228

Dari, R. (2013). Dénombrement de la biomasse microbienne des sols arides exemple d'un sol salé sous deux types de cultures [en ligne]. Mémoire de fin d'études : Sciences Agronomiques. Faculté des sciences de la nature et de la vie et sciences de la terre et de l'univers : Université Kasdi Merbah-Ouarla, 52 p. (page consultée le 3 mars 2020)

URL: <https://bu.univ-ouargla.dz/ingenieur/pdf/dari-azika.pdf?idmemoire=1197>

Debruyne, J.M., Nixon, L.T., Fawaz, M.N. et al. (2011). Global biogeography and quantitative seasonal dynamics of Gemmatimonadetes in Soil. *Applied and Environmental Microbiology* [en ligne], 77 (17), 6295-6300. (page consultée le 11 mai 2020)

URL: <https://aem.asm.org/content/77/17/6295>

Djigal, D. (2003). Interactions entre la communauté microbienne du sol (bactéries et champignons mycorhiziens) et les nématodes bactéricivores : effets sur la nutrition minérale et la croissance de différentes plantes [en ligne]. Thèse de doctorat : Biologie végétale. Dakar : Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 143 p. (page consultée le 14 mars 2020)

URL: <https://bibnum.ucad.sn/viewer.php?c=ths&d=THS-6880>

Duponnois, R., Hafidi, M., Wahbi, S. et al. (2012). La Grande Muraille Verte : Capitalisation des recherches et valorisation des savoirs locaux. Marseille : IRD Éditions. 1184 p.- (Synthèses). (page consultée le 4 mars 2020)

URL : <http://books.openedition.org/irdeditions/3304>

Fawaz, N.M. (2013). Revealing the Ecological Role of Gemmatimonadetes Through Cultivation and Molecular Analysis of Agricultural Soils [en ligne]. Thèse de doctorat : Sciences de l'environnement et du sol. Knoxville : Université de Tennessee, 118 p. (page consultée le 13 mai 2020)

URL: https://trace.tennessee.edu/utk_gradthes/1652/

Forêt, R. (2018). Dictionnaire des sciences de la vie [en ligne]. Paris : De Boeck Supérieur. 1424 p. (page consultée le 14 mai 2020)

URL:https://books.google.dz/books?id=Z8J3DwAAQBAJ&pg=PA629&lpg=PA629&dq=les+firmitutes+de+sol&source=bl&ots=MU-93-pcG5&sig=ACfU3U0nSpjJMeyj9Kje0kktfV-qFQXfzA&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwjFi_rW1bPpAhWv3eAKHZk7AEg4FBD0ATAHegQIChAB#v=onepage&q=les%20firmitutes%20de%20sol&f=false

Garrity, G.M., Boone, D.R., Castenholz, R.W. et al. (2001). Bergey's Manual of Systematic Bacteriology: Volume One: The Archaea and the Deeply Branching and Phototrophic Bacteria. 2 ème éd. New York : Springer-Verlag New York. 722 p.

Garrity, G.M., Brenner, D.J., Krieg, N.R. et al. (2005). Bergey's Manual of Systematic Bacteriology: Volume Two: The Proteobacteria, Part A Introductory Essays. 2ème éd. New York : Springer US. 304 p.

Gobat, J.M., Aragno, M., Matthey, W. (2003). Le sol vivant. 2ème éd. Lausanne : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. 568 p.

Gommeaux, M. (2005). Bactéries du sable de Merzouga [en ligne]. Thèse de doctorat : Géosciences de l'environnement. Marseille : Université Aix-Marseille III, 156 p. (page consultée le 29 août 2020)

URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00261542/document>

Habibeche, L. (2013). Isolement et sélection de souches d'actinomycètes productrices d'antibiotiques. Mémoire Master Recherche : Biotechnologie Microbienne. Bejaia : Université Abderrahmane Mira, 41 p. (page consultée le 23 février 2020)

URL : <http://www.univ-bejaia.dz/jspui/handle/123456789/10247>

Hatimi, A., Tahrouch, S. (2007). Caractérisations chimique, botanique et microbiologique du sol des dunes littorales du Souss- Massa. Biomatec Echo [en ligne], 2 (5), 85-97. (page consultée le 21 mars 2020)

URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/4430/f61784f69e8837e390cb43c91c340b664c26.pdf>

Heulin, T. (2013). Adaptations des bactéries aux déserts chauds et secs. Le Sahara, impacts de changements environnementaux extrêmes sur la biodiversité, CEREGE, 28-29 novembre 2013, Aix-en-Provence, 29 p. (page consultée le 15 mai 2020)

URL: http://www.arbois-med.com/assets/201311_Aix_Sahara.pdf

Itävaara, M., Salavirta, H., Marjamaa, K. et al. (2016). Advances in Applied Microbiology : volume 94 [en ligne]. 1ère éd. London : Academic Press. 192 p. (page consultée le 7 mai 2020)

URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065216415300010>

Jebbar, M., Godfroy, A., Heulin, T. (2012). Des milieux extrêmes bien vivants. Biofutur [en ligne], 31 (336), 28-31. (page consultée le 21 février 2020)

URL:<https://wwz.ifremer.fr/umr6197/content/download/81346/file/Des%20Milieux%20Extr%C3%A4mes%20Bien%20Vivants.pdf>

Jeffery, S., Gardi, C., Jones, A. et al. (2013). Atlas européen de la biodiversité du sol [en ligne]. Luxembourg : Bureau des publications de l'Union européenne. 128 p. (page consultée le 2 mai 2020)

URL: <https://agriculture-de-conservation.com/sites/agriculture-de-conservation.com/IMG/pdf/atlas-diversite-sol.pdf>

Kaasalainen, U., Fewer, D.P., Jokela, J. et al. (2012). Cyanobacteria Produce a High Variety of Hepatotoxic Peptides in Lichen Symbiosis. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [en ligne], 109 (15), 5886-5891. (page consultée le 5 mai 2020)

URL: <https://www.pnas.org/content/pnas/109/15/5886.full.pdf>

Kaddou, Z. (2014). Réduction de l'évaporation des plans d'eau : effet des grains de sable sur les performances des films mono-moléculaires. Mémoire master académiques : Génie de l'eau. Ouargla : Université kasdi merbah Ourgla, 31 p.

Karabi, M. (2017). Fonctionnement microbiologique des sols oasiens : cas de quelques sols de la région de Ouargla [en ligne]. Thèse de doctorat : Sciences Agronomiques. Ouargla : Université Kasdi Merbah, 221 p. (page consultée le 5 mars 2020)

URL: <https://dspace.univ-ouargla.dz › jspui › bitstream › Mokhtar-KARABI-D>

Killian, C., Feher, D. (1939). Recherches sur la microbiologie des sols désertiques. Paris : Paul Lechevalier. 127p. – (Encyclopédie biologique)

Kitouni, M. (2007). Isolement de bactéries actinomycétales productrices d'antibiotiques à partir d'écosystèmes extrêmes : identification moléculaire des souches actives et caractérisation préliminaire des substances élaborées. Thèse de doctorat : Microbiologie Appliquée. Constantine : Université Mentouri, 176 p. (page consultée le 19 février 2020)

URL: <https://bu.umc.edu.dz/theses/biologie/KIT5003.pdf>

Lavelle, P., Spain, A. (2001). *Soil Ecology* [en ligne]. Allemagne : Springer Science & Business Media. 654. - (illustrée). (page consultée le 19 mars 2020)

URL: https://books.google.fr/books/about/Soil_Ecology.html?id=iCC1sOmFTSMC

Le Calvez, T. (2009). Diversité et fonctions écologiques des champignons en écosystème hydrothermal marin profond. Thèse de doctorat : Sciences de la Vie et de l'Environnement. Rennes : Université Rennes 1, 225 p. (page consultée le 30 avril 2020)

URL: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00465055/document>

Lester, E.D., Satomi M., Ponce, A. (2007). Microflora of extreme arid Atacama Desert soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(2), 704-708

Lynch, J.M., Whipps, J.M. (1990). Substrate flow in the rhizosphere. *Plant and Soil* [en ligne], 129, 1-10. (page consultée le 4 mars 2020)

URL: https://www.academia.edu/25659176/Substrate_flow_in_the_rhizosphere

Madani, D. (2008). Relation entre le couvert végétale et les conditions édaphiques en zones à déficit hydrique. Mémoire de magister : Protection de l'environnement. Batna : Université El Hadj Lakhdar, 119 p. (page consultée le 25 mars 2020)

URL:https://www.google.com/search?ei=gDnzXuapBqWUlwT284WIAQ&q=Madani%2C+D.+%282008%29.+Relation+entre+le+couvert+v%3%A9g%3%A9tale+et+les+conditions+%3%A9daphiques+en+zones+%3%A0+d%3%A9ficit+hydrique.+&oq=Madani%2C+D.+%282008%29.+Relation+entre+le+couvert+v%3%A9g%3%A9tale+et+les+conditions+%3%A9daphiques+en+zones+%3%A0+d%3%A9ficit+hydrique.+&gs_lcp=CgZwc3ktYWIQDFDcVljcVmCKX2gBcAB4AIABAIgBAJIBAJgBAKABAAaABAqoBB2d3cy13aXqwAQQA&sclient=psy-ab&ved=0ahUKEwjm6YuBrZrqAhUlyoUKHfZ5AREQ4dUDCA

Makhalanyane, T.P., Valverde, A., Gunnigle, E. et al. (2015). Microbial ecology of hot desert adaphic systems. *FEMS Microbiology reviews* [en ligne], 39 (2), 203-221. (page consultée le 25 mars 2020)

URL: <https://academic.oup.com/femsre/article>

Marone, A., Mbengue, M., Thiouye, A. et al. (2018). Caractérisation des champignons en aérosol à partir des événements de poussières à Dakar, Sénégal, Afrique de l'Ouest. *Afrique Science* [en ligne], 14(3), 304 – 315. (page consultée le 7 mai 2020)

URL:https://www.researchgate.net/publication/331977232_Caracterisation_des_champignons_en_aerosol_a_partir_des_evenements_de_poussieres_a_Dakar_Senegal_Afrique_de_l'Ouest

Mayer, R.É. (2014). *Notions de Géographie physique* [en ligne]. Paris: Archives contemporaines. 285 p. (page consultée le 26 mai 2020)

URL: <https://books.google.com/books?id=PYtlBAAAQBAJ>.

Mchugh, T.A., Compson, Z., Van Gestel., N. et al. (2017). Climate controls prokaryotic community composition in desert soils of the southwestern United States. *FEMS Microbiology Ecology* [en ligne], 93 (10), 1-13. (page consultée le 10 mai 2020)

URL: <https://academic.oup.com/femsec/article/93/10/fix116/4111145>

Mehimdat, H. (2013). Contribution à l'écologie et l'inventaire des algues macrophytes bio-indicatrices d'eaux douces dans la région de Guelma [en ligne]. Mémoire master recherche : Phytopathologie et Phytopharmacie. Guelma : Université 8 Mai 1945 Guelma, 48 p. (page consultée le 6 mai 2020)

URL: <http://dspace.univ-guelma.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/2066/M570.398%20ECOLOGIE.PDF?sequence=1&isAllowed=y>

Meintanis, C., Chalkou, K.I., Kormas K.A. et al. (2008). Application of rpoB sequence similarity analysis, REP-PCR and BOXPCR for the differentiation of species within the genus *Geobacillus*. *Letters in Applied Microbiology* [en ligne], 46 (3), 395–401. (page consultée le 30 août 2020)

URL: <https://sfamjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1472-765X.2008.02328.x>

Messaouad, H. (2018). Contribution à l'étude cinétique des extraits enzymatiques de quelques souches de *Streptomyces* sp isolées du sol de la région de Mostaganem. Mémoire Master Recherche : Génétique Fondamentale et Appliquée. Mostaganem : Université Abdelhamid Ibn Badis, 54 p. (page consultée le 22 mars 2020)

URL: <http://e-biblio.univ-mosta.dz/bitstream/handle/123456789/6247/MEMOIRE%20FIN%20d%27tude.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Mezouari, S. (2017). Isolement et caractérisation des microorganismes à intérêt biotechnologique de la région de Sidi Bel Abbes [en ligne]. Thèse de doctorat : Microbiologie Moléculaire et Protéomique. Sidi Bel Abbes : Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, 93 p. (page consultée le 29 avril 2020)

URL: http://rdoc.univ-sba.dz/bitstream/123456789/1953/3/D3C_Sbio_MEZOUARI_Soumia.pdf

Morel, R. (1989). Les sols cultivés. Tech et Doc et Lavoisier, paris, 272p.

Naam, S., Ferhat, S. (2019). Contribution à l'étude de la biomasse bactérienne et fongique tellurique de quelques biotopes dans la région d'Ouargla [en ligne]. Mémoire Master Académique : Ecologie Végétale et Environnement. Ouargla : Université Kasdi Merbah, 86 p. (page consultée le 4 avril 2020)

URL: <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/21988/1/NAAM-FERHAT.pdf>

Naoum, J.O. (2016). Study of bacterial populations from oligotrophic soil ecosystems using high throughput sequencing technologies [en ligne]. Thèse de doctorat : Sciences de la Vie et de la Santé. Paris : Université Paris-Saclay, 196 p. (page consultée le 19 avril 2020)

URL: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01407360/document>

Ngoc-Phuc, H., Fumihisa, K., Yasunobu, I. et al. (2007). Detailed identification of desertoriginated bacteria carried by Asian dust storms to Japan. *Aerobiologia*, 23 (4), 291-298

Nielsen, U.N., Ball, B.A. (2015). Impacts of altered precipitation regimes on soil communities and biogeochemistry in arid and semi-arid ecosystem. *Global change biology* [en ligne], 21 (4), 1407-1421. (page consultée le 22 mars 2020)

URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcb.12789>

Organisation mondiale du tourisme (OMT). (2006). Développement durable du tourisme dans les déserts : Lignes directrices à l'intention des décideurs (Version française) [en ligne]. Espagne : Organisation mondiale du tourisme (OMT). 74 p. (page consultée le 28 mars 2020)

URL: <https://www.e-unwto.org/doi/book/10.18111/9789284411924>.

Ozenda, P. (1991). Flore du Sahara. 3ème éd. Paris : CNRS. 662 p.

Palmisano, M.M., Nakamura L.K., Duncan K.E. et al. (2001) *Bacillus sonorensis* sp. nov., a close relative of *Bacillus licheniformis*, isolated from soil in the Sonoran Desert, Arizona. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 51(5), 1671–1679

Poncet, J. (1989). *Cheggatella denticula* n. gen., n. sp, Algue rouge calcaire du Carbonifère supérieur du bassin de Béchar (Sahara algérien). *Geobios* [en ligne], 22 (5), 677-682. (page consultée le 20 avril 2020)

URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016699589801214>

Prescotte, L.M., Harley, J.P., Klein, D.A. et al (2010). *Microbiologie*. 3ème éd. Bruxelles : De Boeck université rue des minimes. 1088p.

Reynaud, P. (1984). *Ecophysiologie des Cyanobactéries fixatrices d'Azote, libres ou en symbiose (Azolla) dans la zone tropicale sèche : perspectives agronomiques* [en ligne]. Thèse de doctorat : spécialité. Marseille : Université d'Aix-Marseille, 257 p. (page consultée le 29 avril 2020)

URL: http://horizon.documentation.ird.fr/exldoc/pleins_textes/pleins_textes_7/TDM_7/24780.pdf

Rizzatti, G., Lopetuso, L.R., Gibiino, G. et al (2017). *Proteobacteria: A Common Factor in Human Diseases*. *BioMed Research International* [en ligne], 2017 (9), 1-7. (page consultée le 8 mai 2020)

URL : <https://doi.org/10.1155/2017/9351507>

Sails, A. (2014). *Molecular Medical Microbiology* [en ligne]. 2ème éd. London : Academic Press. 2216 p. (page consultée le 10 mai 2020)

URL : <https://books.google.dz/books?id=rlxzAwAAQBAJ&pg=PA917&lpg=PA917&dq=les+bacteroidetes+th%C3%A8se&source=bl&ots=rc8Uk5dWyQ&sig=ACfU3U0SnFdIYwVDRnM0V->

[LFp_ZVNVkJRQ&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwjBn5zjjqjpAhUH8hQKHXXYDXQ4ChDoATAFegQIChAB#v=onepage&q=les%20bacteroidetes%20th%C3%A8se&f=false](https://books.google.dz/books?id=rlxzAwAAQBAJ&pg=PA917&lpg=PA917&dq=les+bacteroidetes+th%C3%A8se&source=bl&ots=rc8Uk5dWyQ&sig=ACfU3U0SnFdIYwVDRnM0V-LFp_ZVNVkJRQ&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwjBn5zjjqjpAhUH8hQKHXXYDXQ4ChDoATAFegQIChAB#v=onepage&q=les%20bacteroidetes%20th%C3%A8se&f=false)

Saker, R. (2015). Recherche de nouveaux taxons d'actinobactéries halophiles des sols sahariens et potentialités antagonistes [en ligne]. Thèse de doctorat : Microbiologie. Sétif : Université Ferhat Abbas Sétif 1, 181 p. (page consultée le 6 mars 2020)

URL: <https://www.univ-setif.dz/Tdoctorat/2015/SNV/SAKER.pdf>

Shin, N.S., Whon, T.W., Bae, J.W. (2015). Proteobacteria : microbial signature of dysbiosis in gut microbiota. Trends in biotechnology [en ligne], 33 (9), 496-503. (page consultée le 14 mai 2020)

URL:http://scholar.google.com/scholar_url?url=http://microbecol.khu.ac.kr/PDF_paper/TiB2015.pdf&hl=fr&sa=X&scisig=AAGBfm0jrvL9Y0eawgSQAmLY3cc5rBiLsQ&nossl=1&oi=scholar

Soffih, M. (2017). Contribution au diagnostic de l'état de salinisation des sols de la plaine d'EL Hmadena [en ligne]. Mémoire de fin d'études : Gestion durable de l'environnement. Mostaganem : Université Abdelhamid Ibn Badis, 118 p. (page consultée le 22 mars 2020)

URL: <http://e-biblio.univ-mosta.dz/handle/123456789/4498>

Spain, A.M., Krumholz, L.R., Elshahed, M.S. (2009). Abundance, composition, diversity and novelty of soil Proteobacteria. The ISME Journal [en ligne], 3 (8), 992–1000. (page consultée le 10 mai 2020)

URL: <https://www.nature.com/articles/ismej200943>

Terrat, S., Karimi B., Dequiedt, S. et al. (2018). La caractérisation des communautés microbiennes du sol à l'échelle de la France pour évaluer l'effet de l'usage des sols. Innovations Agronomiques [en ligne], 69 (3), 27-37. (page consultée le 15 mai 2020).

URL:https://www.researchgate.net/publication/329013963_La_caracterisation_des_communautes_microbiennes_du_sol_a_l%27echelle_de_la_France_pour_evaluer_l%27effet_de_l%27usage_des_sols

Thomas, F., Hehemann, J.H., Rebuffet, E. et al. (2011). Environmental and gut Bacteroidetes: the food connection. Frontiers in cellular and infection microbiology [en ligne], 2 (93), 1-16. (page consultée le 18 avril 2020)

URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2011.00093/full>

UNESCO. (1960). Les Plantes médicinales des régions arides [en ligne]. Paris : Organisation des Nations Unies. 99 p. – (Recherches sur la zone aride) (page consultée le 29 février 2020)

URL: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000068198_fre

Wang, Y. (2015). The bacterial communities of sand-like surface soils of the San Rafael Swell (Utah, USA) and the Desert of Maine (USA) [en ligne]. Thèse de doctorat : Sciences de la Vie et de la Santé. Orsay : Université Paris-Saclay, 176 p. (page consultée le 23 février 2020).

URL: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01261518>.

Warren-Rhodes, K.A., Kevin, L.R., Boyle, L.N. et al. (2007). Cyanobacterial ecology across environmental gradients and spatial scales in China's hot and cold deserts. *FEMS Microbiology Ecology* [en ligne], 61 (3), 470-482. (page consultée le 2 mai 2020)

URL: <https://academic.oup.com/femsec/article/61/3/470/464275>

Wexlar, H.M. (2007). Bacteroides : the Good, the Bad, and the NittyGritty. *Clinical Microbiology Reviews* [en ligne], 20 (4), 593-621. (page consultée le 15 avril 2020).

URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2176045/>

Xu, L., Zeng, X-C., Nie, Y. et al. (2014). *Pontibacter diazotrophicus* sp. nov., a Novel NitrogenFixing Bacterium of the Family Cytophagaceae. *Plos One* [en ligne], 9 (3), 1-9. (page consultée le 20 avril 2020)

URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0092294>

Zhang, H., Sekiguchi, Y., Hanada, S. et al. (2003). *Gemmatimonas aurantiaca* gen. nov., sp. nov., a Gram-negative, aerobic, polyphosphateaccumulating micro-organism, the first cultured representative of the new bacterial phylum Gemmatimonadetes phyl. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* [en ligne], 53 (4), 1155–1163. (page consultée le 11 mai 2020)

URL: <https://cyber.sci-hub.tw/MTAuMTA5OS9panMuMC4wMjUyMC0w/zhang2003.pdf#view=FitH>

Références des figures

Chehema, Abdelmadjid. *Zilla macroptera* (Chebrok). (sans date) [photo]. **In** : Phytomasse et valeur nutritive des principales plantes vivaces du Sahara septentrional algérien. Alger : Dar Elhouda, 2008, p. 68.

GEO - Déserts du Monde. Carte des déserts du monde. (sans date) [carte]. **In** : Organisation mondiale du tourisme (OMT). Développement durable du tourisme dans les déserts : Lignes directrices à l'intention des décideurs (Version française). Espagne : Organisation mondiale du tourisme (OMT), 2006, p.74.

Larousse. Dunes de Sable dans le désert du Sahara, Algérie. (sans date) [photo] **In** : Encyclopédie Larousse en ligne - Algérie : géographie physique. Disponible sur : < https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/Alg%C3%A9rie_g%C3%A9ographie_physique/185613 > (Consulté le 20 février 2020)

Membre de Click-FR®, Réseau francophone Paie-Par-Click. *Schouwia thebaica* (Chou du désert). (sans date) [photo] **In** : La végétation du désert algérien. Disponible sur : < <http://nezumi.dumousseau.free.fr/alg/veget.htm> > (Consulté le 21 février 2020)

Pinterest. Distribution mondiale des déserts : déserts chauds et froids. (sans date) [carte] **In** : Regions with desert climates-Pinterest. Disponible sur : <<https://www.pinterest.com/pin/828943875143504293/>>(Consulté le 18 février 2020)

Wang, Y. Le fameux désert froid, le désert de Gobi recouvert d'une épaisse croûte de glace. (sans date) [photo]. **In** : Wang, Y. The bacterial communities of sand-like surface soils of the San Rafael Swell (Utah, USA) and the Desert of Maine (USA). Thèse de doctorat : Sciences de la Vie et de la Santé, 2015, 176 p.

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : Biologie Moléculaire des Microorganismes

Aperçu général sur la microflore bactérienne des déserts chauds (étude de cas : Algérie et Maroc)

Le présent travail est une contribution qui apporte un aperçu sur l'étude de la diversité des souches bactériennes résistantes aux conditions extrêmes d'un sol saharien. Ces dernières ne sont jusqu'à présent pas assez étudiées notamment en ce qui concerne le nord africain. Les déserts de l'Algérie et du Maroc ont fait l'objet de quelques études non exhaustives parmi lesquelles nous avons choisi deux à analyser. Dans la première étude, des échantillons de différents côtés d'une dune du sud algérien (Région de Biskra) ont été collectés. Puis, ils ont subi des analyses physico-chimiques et des analyses microbiologiques. Les résultats des analyses physico-chimiques ont montré que l'ensemble des échantillons du sol étudié sont caractérisés par un taux d'humidité faible avec une moyenne de 4,92%, un taux de matière organique de 3,09% qu'est élevé par rapport au type de sol saharien qui en général ne dépassent pas 1%, ainsi qu'un pH qui tourne au tour de la neutralité (environ 7,37). De l'autre côté, les résultats des analyses microbiologiques ont révélé la présence de huit souches bactériennes d'aspects macroscopiques distincts. Ces dernières ont été distribuées de manière hétérogène sur la totalité de la dune sous l'influence de divers facteurs (caractéristiques physico-chimiques du sol, climat, couvert végétal, ...) ainsi que la capacité de résistance des bactéries au changement de ces paramètres. La majorité des souches isolées étaient des bacilles à Gram positif. En ce qui concerne la deuxième étude qui a été réalisée au Maroc, une caractérisation phénotypique suivie par des analyses génotypiques ont permis d'identifier 240 isolats thermophiles. Tous les isolats étaient à Gram positif, en forme de bâtonnet, sporulés et halotolérants alors que 225 isolats étaient positifs à la catalase et à l'oxydase. D'après le séquençage des gènes de l'ARNr 16S et la BOXA1R-PCR, les isolats récupérés étaient dominés par le genre *Bacillus* (97,5%). De plus, 71,25%, 50,41% et 5,41% des souches totales présentaient respectivement une activité amylolytique, protéolytique ou cellulolytique élevée. Malgré les conditions défavorables liées à la nature du sol et au climat, l'activité bactérienne dans les sols désertiques sahariens bien qu'elle soit faible, elle persiste.

Mots clés : Sol saharien, Microflore bactérienne d'un sol désertique, Conditions extrêmes, Activité enzymatique.

Membre du jury :

Présidente du jury : *Mme GUERGOURI Ibtissem* (MAA- UFM Constantine)

Rapporteur : *Melle ARABET Dallel* (MCA - UFM Constantine)

Examinatrice : *Mme ZERMANE Feriel* (MAA- UFM Constantine)

Présentée par : Djebbar Manel
Bensebbane Nada

Année universitaire : 2019 -2020