

UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA

Faculté des Sciences de la nature et de la Vie

Département des Sciences Agronomiques



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Protection de la Ressource Sol - Eau et Environnement

Thème

Caractérisation physico-chimique et microbiologique de quelques croûtes biologiques. Cas de la station de Hassi El khfif (Ouargla) et de la station de M'rara (El M'Ghair)

Présenté par : M^{lle} GUERZIZ Aya

M^{lle} DAOUI Fatima

Soutenu publiquement

le : 19 / 06 / 2025

Devant le jury :

M.	IDDER	Med Abdelhak	M.C.A.	Président	UKM Ouargla
M ^{me}	OUSTANI	Mabrouka	M.C.A.	Examinatrice	UKM Ouargla
M.	KARABI	Mokhtar	M.C.A.	Encadrant	UKM Ouargla

Année Universitaire : 2024 / 2025

Dédicaces

Je dédie ce travail

À mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs prières, leurs sacrifices et leur soutien moral tout au long de mon parcours. Que Dieu les garde et les récompense pour tout ce qu'ils ont pour moi.

À mes frères et sœurs, pour leur encouragement constant et leur présence rassurante.

À mon encadrant M. KARABI M., pour son accompagnement précieux.

À mes enseignants, qui m'ont guidé, soutenu et transmis leur savoir avec générosité.

À mes amies fidèles, qui m'ont accompagné dans les moments difficiles comme dans les moments de joie.

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

« GUERZIZ Aya »



Dédicaces

Je dédie ce travail

À mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs prières, leurs sacrifices et leur soutien moral tout au long de mon parcours. Que Dieu les garde et les récompense pour tout ce qu'ils ont fait pour moi.

À mes frères et sœurs, pour leur encouragement constant et leur présence rassurante.

À mon encadrant M. KARABI M., pour son accompagnement précieux.

À mes enseignants, qui m'ont guidé, soutenu et transmis leur savoir avec générosité.

À mes amies fidèles, qui m'ont accompagné dans les moments difficiles comme dans les moments de joie.

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

« DAOUI Fatima »



Remerciements

Louange à Dieu, qui nous a accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail, fruit de plusieurs années d'apprentissage. Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant pour Son aide précieuse tout au long de notre parcours universitaire.

À mes chers parents, que Dieu vous protège et vous bénisse, Merci du fond du cœur pour votre amour inconditionnel, vos prières silencieuses et vos sacrifices discrets qui ont illuminé mon chemin. Je vous dédie humblement ce travail, en témoignage de ma profonde gratitude, de mon respect sincère, et de mes prières pour que Dieu vous accorde santé, sérénité, et vous récompense ici-bas et dans l'au-delà.

Nous tenons à remercier notre encadrant M. KARABI Mokhtar, maître de conférences "A" à l'Université de Ouargla, qui a accepté de nous encadrer et de diriger ce travail, pour son inlassable énergie, sa gentillesse, sa disponibilité, son dévouement, ses encouragements indispensables, son aide précieuse et son optimisme à toute épreuve.

Nous remercions également M. IDDER Mohamed Abdelhak, maître de conférences "A" à l'Université de Ouargla, pour sa gentillesse, ses encouragements, ainsi que pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de présider ce jury.

Nous adressons également nos plus sincères remerciements à M^{me} OUSTANI Mabrouka, maître de conférences "A", pour l'honneur qu'elle nous a fait en acceptant de rejoindre ce jury.

Nous remercions également M. DJILI Brahim, M^{me} YUCEF Fouzia, ainsi que notre collègue LEMDEK Abdelbasset pour leurs précieux conseils et leur aide tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous exprimons aussi notre gratitude à M^{me} BENZINE Ibtissem, technicienne au niveau du laboratoire Biogéochimie des Milieux Désertiques, pour sa gentillesse et la qualité de ses interactions.

Nous exprimons également notre reconnaissance à nos familles respectives, pour leur soutien moral constant et leurs encouragements inconditionnels tout au long de cette aventure académique.

Que toutes les personnes qui nous ont soutenus, de près ou de loin, trouvent ici l'expression de notre sincère reconnaissance et de notre profonde gratitude pour leur contribution à la réalisation de ce modeste travail.

Liste des abréviations

GN : gélose nutritive

PDA : *Potato Dextrose Agar*

MO : Matière Organique

CE : Conductivité électrique

UFC. g.s.s⁻¹ : Unité Formant Colonie par gramme de sol sec

FAO: *Food and Agriculture Organisation*

UNCCD: *United Nations Convention to Combat Desertification*

INRAE : Institut National de Recherche pour l'Alimentation et l'Environnement

UNESCO: *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*

MEDD : Ministère de l'Environnement et du Développement Durable

CPCS : Commission de Pédologie de Cartographie des Sols

Liste des tableaux

N°	Titre	Page
Tableau I	Superficies et répartitions des zones arides et semi-arides en Algérie	6
Tableau II	Classification suggérée des différents types des croûtes biologiques du sol	14
Tableau III	Conditions de culture des différents groupes de microorganismes étudiés	37
Tableau IV	Caractéristiques physico-chimiques du sol des deux stations d'étude	41
Tableau V	Résultats du dénombrement microbien des sols dans les stations étudiées	45

Liste des Figures

N°	Titre	Page
01	Carte bioclimatique de l'Algérie	5
02	Structure du gypse	9
03	Organismes colonisant les croûtes biologiques du sol	12
04	Répartition des croûtes biologiques du sol dans les régions arides et non arides du monde	13
05	Différents types des croûtes biologiques du sol (organismes dominants, localités et morphologie)	15
06	Différents types de croûtes biologiques associées aux roches	16
07	Localisation géographique des régions d'étude	26
08	Méthodologie de travail	28
09	Localisation des stations d'étude	29
10	Espèces végétales dominantes dans la station 01	30
11	Espèces végétales dominantes dans la station 02	32
12	Echantillons de la station 01	33
13	Echantillons de la station 02	33
14	Préparation des suspensions dilutions du sol	37
15	Représentation graphique comparative des propriétés physico-chimiques des sols des deux stations	44
16	Variation de la densité de microflore bactérienne dans les sols des deux stations d'étude	47
17	Aspect macroscopique des colonies bactériennes	49
18	Microphotographies observées au microscope optique présentant les aspects microscopiques des bactéries après coloration de Gram ($G \times 100$)	49
19	Variation de la densité de la microflore fongique dans les sols des deux stations d'étude	51
20	Aspects macroscopiques des champignons	52
21	Aspects microscopiques des champignons	53

Liste des Photos

N°	Titre	Page
01	Etat de surface de la station 01	31
02	Etat de surface de la station 02	33

Table des matières

Dédicaces	
Dédicaces	
Remerciements	
Liste des abréviations	
Liste des tableaux	
Liste des Figures	
Liste des Photos	
Table des matières	
Introduction	1
Partie I. Synthèse bibliographique	
Chapitre I. Zones arides	4
1. Notion de l'aridité	4
2. Répartition des zones arides	5
2.1. Dans le monde	5
2.2. Dans l'Algérie	5
3. Sols des zones arides	6
3.1. En Algérie	7
3.1.1. Sols sans accumulation de sels	8
3.1.2. Sols calcaires	8
3.1.3. Sols gypseux	8
3.1.4. Sols calcaires et gypseux	9
3.1.5. Sols salés	9
4. Caractéristiques des sols en zones arides	10
Chapitre II. Croûtes biologiques	11
1. Définition	11
2. Processus de formation des croûtes biologiques	12
3. Répartition des croûtes biologiques	13

4. Différents types des croûtes biologiques	14
4.1. Croûtes biologiques associées au sol (selon la morphologie)	14
4.2. Croûtes biologiques associées aux roches (Selon l'emplacement des organismes).	15
4.2.1. Croûtes Hypolithiques	16
4.2.2. Croûtes Épilitiques	16
4.2.3. Croûtes Endolithiques.....	16
5. Influence des facteurs écologiques sur les micro-organismes des croûtes biologiques	17
5.1. Influence du sol	17
5.1.1. Texture.....	17
5.1.2. Composition chimique.....	17
5.2. Influence du climat	17
5.2.1. Précipitations.....	17
5.2.2. Température	17
5.3. Saison.....	18
5.4. Influence de la végétation.....	18
6. Fonctions écologiques des croûtes biologiques	18
6.1. Fixation de l'azote	19
6.2. Fixation du carbone	19
6.3. Protection du sol contre l'érosion	19
6.4. Amélioration de la fertilité et stabilisation de la structure des sols	20
6.5. Établissement des plantes vasculaires	21
7. Micro-organismes composants les croûtes biologiques du sol	21
7.1. Bactéries	21
7.2. Lichens.....	22
7.3. Champignons	22
7.4. Bryophytes.....	22
7.5 Actinomycètes	23
7.6. Algues.....	23
Partie II. Matériel et Méthodes	
Chapitre I. Présentation de la région d'étude	25
1. Situation géographique	25
1.1. Région de Ouargla	25

1.2.Région d'El M'Ghair.....	25
2. Données climatiques des régions d'étude	26
A / Ouargla	26
B / El M'Ghair.....	27
Chapitre II. Méthodologie de travail.....	28
1.Choix des stations	29
❖ Station 01 : M'rara	30
❖ Station 02 : Hassi el Khfif	31
2. Echantillonnage	33
2.1.Prélèvements pour les analyses physicochimiques	34
2.2. Prélèvement pour les analyses microbiologiques.....	34
2.2.1. Conservation des échantillons.....	34
3. Méthodes et techniques utilisées	34
3.1. Analyses physicochimiques.....	34
3.1.1. Conductivité électrique (CE)	34
3.1.2. pH.....	34
3.1.3. Dosage de carbone organique (C).....	34
3.1.4. Matière organique	35
3.1.5. Humidité	35
3.1.6. Calcaire total	35
3.1.7. Dosage du gypse	36
3.2. Analyses microbiologiques.....	36
3.2.1. Techniques d'étude et de dénombrement de la microflore telluriques.....	36
3.2.1.1. Préparation des suspensions dilutions.....	36
3.2.1.2. Ensemencement.....	37
3.2.1.3. Incubation.....	37
3.2.1.4. Lecture des résultats et dénombrements.....	38
3.2.1.5. Préparation microscopique.....	38
3.2.1.5.1. Observations microscopiques.....	38

a. Coloration de Gram pour les bactéries.....	38
3.2.1.6. Identification.....	38
Partie III Résultats Discussion.....	
1. Caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés	41
1.1. Humidité.....	41
1.2. Texture.....	42
1.3. pH.....	42
1.4. CE.....	42
1.5. Calcaire total.....	43
1.6. C _{organique}	43
1.7. Gypse.....	43
2. Résultats des analyses microbiologiques	44
2.1. Résultats de dénombrement microbien des sols dans les deux stations étudiées	44
2.1.1. Microflore bactérienne	46
2.1.2. Microflore fongique.....	49
Conclusion.....	55
Référence bibliographiques	55
Annexes	58
Résumé	73

A red gradient oval with a white-to-red gradient, centered on the page. The word "Introduction" is written in bold black text inside the oval.

Introduction

Introduction

Le sol constitue un milieu vivant complexe, longtemps considéré comme un simple support physique à la production agricole. Toutefois, les avancées scientifiques ont mis en évidence son rôle fondamental en tant qu'interface entre la biosphère, l'atmosphère et l'hydrosphère. Il participe activement à la régulation des grands cycles biogéochimiques (eau, carbone, azote) et constitue un pilier essentiel du maintien de la biodiversité terrestre (**Huggett, 2023**).

À l'échelle mondiale, de vastes zones caractérisées par des conditions climatiques extrêmes, telles que les régions arides et froides, offrent un environnement peu favorable à l'établissement et au développement de la végétation. Les sols arides, en particulier, se distinguent par leur faible teneur en matière organique et en éléments nutritifs, une structure souvent dégradée, ainsi qu'une sensibilité accrue à l'érosion. Ces caractéristiques limitent fortement leur fertilité et complexifient leur gestion durable (**Moreno-Jiménez et al., 2022**).

Représentant plus du tiers de la surface continentale de la planète, soit environ 45 %, les zones arides forment le biome terrestre le plus étendu (**Peel et al., 2007 ; Pointing et Belnap, 2012 ; Huang et al., 2017**). Dans ces milieux, les sols, bien qu'essentiels au bon fonctionnement des écosystèmes, sont confrontés à de multiples contraintes : chaleur intense, faible humidité, texture sablonneuse, rayonnement UV élevé, salinité marquée, potentiel redox élevé, et carence en nutriments. freinent le développement de la diversité microbienne et restreignent leurs fonctions écologiques (**Chamizo et al., 2012**).

Dans les déserts hyperarides, ces facteurs extrêmes accentuent le stress sur les microorganismes, réduisant leur abondance et leur diversité. Néanmoins, certaines espèces microbiennes parviennent à s'adapter, formant des croûtes biologiques dominées par des cyanobactéries, ainsi que par des algues, des lichens, des mousses et des champignons. Ces croûtes jouent un rôle fondamental dans la stabilisation du sol, la régulation hydrique, la fixation du carbone et de l'azote, et la promotion de la biodiversité (**Mehda, 2022**).

En apparence stériles, les surfaces désertiques; roches, pierres et sable, abritent pourtant une fine couche de microorganismes capable de se développer à la surface, dans les fissures rocheuses, ou juste sous le sable (**Belnap, 2003**). Ces biocroûtes, bien qu'elles existent dans divers environnements, sont particulièrement cruciales dans les régions arides, où elles

constituent l'un des principaux composants vivants du sol (**Belnap et al., 2003 ; Concostrina-Zubiri et al., 2014**).

Leur fonctionnement repose sur des réseaux de filaments microbiens qui agrègent les particules de sol, formant une couche cohésive résistante à l'érosion hydrique et éolienne. Par ailleurs, elles enrichissent les sols dénudés en carbone et en azote grâce à la photosynthèse, la sécrétion de polymères extracellulaires et la dégradation de leur biomasse après leur mort.

Ainsi, les croûtes biologiques apparaissent comme des alliées naturelles dans la stabilisation des sols fragiles et participent activement à la restauration écologique des milieux dégradés, comme souligné par **Belnap et Lange (2001) et Belnap (2005)**.

Les croûtes biologiques demeurent encore mal comprises en ce qui concerne leur composition spécifique et leurs rôles écologiques, en raison du faible nombre d'études qui leur ont été consacrées. À titre d'exemple, la région de Hassi El Khefif n'a jamais fait l'objet d'investigations scientifiques antérieures, contrairement à la région de M'rara qui a déjà été étudiée dans des travaux antérieurs, on cite entre autres les travaux de **Kaboul (2016) ; Mehda (2022) ; Barka et Rachedi (2022)**.

C'est dans cette optique que s'inscrit notre travail. Cette étude vise à caractériser les croûtes biologiques du sol à travers une analyse de leurs propriétés physico-chimiques et microbiologiques, afin de mieux comprendre leur composition, leur fonction écologique, et leur rôle dans la stabilité et la fertilité des sols

Ce mémoire s'articule en trois parties

- **La première partie** : revue bibliographique comportant deux chapitres. Le premier aborde les généralités sur les zones arides ; le second est consacré aux croûtes biologiques.
- **La deuxième partie** : étude expérimentale organisée en deux chapitres. Le premier présente le contexte écologique des zones d'étude ; le second détaille la méthodologie des analyses physico-chimiques et microbiologiques.
- **La troisième partie** est réservée aux résultats et discussion.



Partie I

Synthèse bibliographique

Chapitre I. Zones arides

1. Notion de l'aridité

Des études récentes montrent qu'environ 77 % des terres émergées ont connu une augmentation significative de l'aridité au cours des trente dernières années, avec une extension des zones arides de 4,3 millions de km², couvrant désormais 40,6 % de la surface terrestre mondiale (UNCCD, 2024 ; Le Figaro, 2024). Cette intensification est principalement liée au changement climatique, entraînant des transitions abruptes dans le fonctionnement des écosystèmes, notamment à travers trois seuils critiques : baisse de la productivité végétale, dégradation de la fertilité des sols et perte de biodiversité, menant à la désertification (INRAE, 2023).

L'aridité ne se limite donc pas à une faible pluviométrie ; elle englobe également l'irrégularité spatiale et temporelle des précipitations, ainsi que les niveaux élevés d'évapotranspiration qui accentuent le stress hydrique, en particulier dans les zones hyperarides comme le sud-est algérien (Lacheheb et al., 2023).

D'une façon générale, les zones sont caractérisées à la fois par son climat toujours peu pluvieux, et parfois très sec, et très irrégulier, et par sa végétation herbacée ou frutescente, rarement arborée.

Selon une actualisation des classifications bioclimatiques proposée par Nedjraoui (2003), les zones arides peuvent être subdivisées en trois grands domaines en fonction de la pluviométrie annuelle moyenne : le domaine semi-aride, où les précipitations varient entre 300 et 600 mm ; le domaine aride, caractérisé par des précipitations comprises entre 100 et 300 mm ; et enfin le domaine saharien ou hyperaride, où les précipitations sont inférieures à 100 mm par an. Cette typologie, largement utilisée en Afrique du Nord, notamment en Algérie, est également soutenue par les données de la FAO (2005), qui confirment la pertinence de ces seuils dans l'analyse des dynamiques agroécologiques et de la vulnérabilité des écosystèmes en contexte aride.

Ces approches récentes permettent de dépasser les classifications classiques d'Emberger (1955) ou de Le Houérou (1975), en intégrant les réalités climatiques actuelles liées au changement global et à l'anthropisation croissante des milieux.

2. Répartition des zones arides

2.1. Dans le monde

Selon la **FAO (2020)**, la classification des zones arides repose sur le rapport entre les précipitations annuelles et l'évapotranspiration potentielle annuelle (indice d'aridité de l'UNEP).

Sur cette base, les zones arides sont réparties comme suit :

- ✓ Les zones hyperarides couvrent environ 11 millions de kilomètres carrés, représentant près de 8 % des terres émergées, avec une concentration notable dans le désert du Sahara.
- ✓ Les zones arides, semi-arides et subhumides sèches s'étendent sur près de 54 millions de kilomètres carrés, principalement réparties en Asie et en Afrique, bien qu'on en trouve également sur d'autres continents.

2.2. Dans l'Algérie

La classification bioclimatique proposée par **Emberger**, ensuite adaptée par **Sauvage** et largement utilisée dans les régions méditerranéennes, reste une référence en Algérie. Elle distingue cinq étages bioclimatiques : saharien, aride, semi-aride, subhumide et humide, en fonction des précipitations, des températures et de l'indice pluviothermique (**Figure 01**).

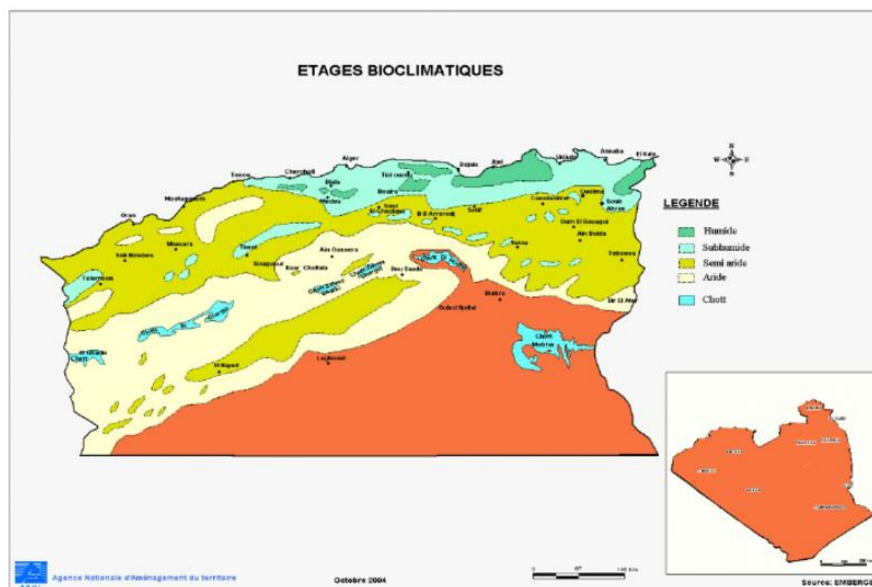


Figure 01. Carte bioclimatique de l'Algérie (Agence national d'aménagement du territoire, 2004)

On distingue selon **Nedjraoui (2003)** :

- L'étage semi- aride : 300 - 600 mm.
- L'étage aride : 300 - 100 mm.
- L'étage saharien < 100 mm qui occupe 89,5% la superficie totale de l'Algérie.

La superficie et la répartition des zones arides et semi-arides en Algérie sont représentées dans le **tableau 01**.

Tableau 01. Superficies et répartition des zones arides et semi-arides en Algérie
(Bougherira et Belhamra, 2020)

Zone climatique	Superficie approximative (km²)	Pourcentage du territoire (%)	Pluviométrie annuelle (mm)	Localisation géographique
Zone semi-aride	~250 000	~10 %	300 - 600	Bordure sud du Tell, zones de transition vers le Sahara
Zone aride	~600 000	~25 %	100 - 300	Grandes plaines et plateaux méridionaux, proche du Sahara
Zone hyper-aride	~400 000	~16 %	< 100	Sahara profond, désert central et sud algérien

3. Sols des zones arides

Dans les zones arides, les sols présentent généralement des contraintes majeures pour leur mise en valeur. Ils sont fréquemment recouverts de croûtes calcaires ou gypseuses, souvent salins, et sujets à l'érosion ainsi qu'à des processus de salinisation secondaire (**FAO, 2020**).

Actuellement, on estime que près de 40 % des terres émergées mondiales, soit environ 5,2 milliards d'hectares, sont classées comme arides, hébergeant plus de 2 milliards d'habitants. Le continent africain en contient environ 37 % (**UNCCD, 2017**).

Les sols de ces régions sont typiquement peu profonds, avec une roche-mère proche de la surface, un pH généralement basique et des dynamiques de salinisation neutres à alcalines.

En dehors des bassins endoréiques, la pédogenèse reste très limitée, dominée par des processus physiques, alors que les processus chimiques et biologiques sont quasi absents. Il en résulte des sols minéraux peu développés, à texture souvent sableuse, très pauvres en matière organique, avec une faible capacité de rétention en eau et en éléments nutritifs, et très vulnérables à l'érosion éolienne (UNESCO, 2021).

La productivité des sols dans les milieux arides et semi-arides est largement déterminée par leur capacité à retenir l'eau, qui dépend à la fois de la profondeur du sol et de sa teneur en matière organique. À ce titre, les sols argileux surpassent les sols sableux en termes de rétention hydrique (UNESCO, 2021).

3.1. En Algérie

L'Algérie est largement caractérisée par un climat allant du semi-aride à l'hyper-aride, en raison d'un déséquilibre marqué entre la pluviométrie et l'évapotranspiration potentielle. Selon les estimations récentes, environ 95 % du territoire national se situe en zone aride, dont près de 90 % sont classés en zone hyper-aride correspondant au domaine saharien (UNCCD, 2020 ; MEDD, 2021).

Les sols du Sahara algérien sont majoritairement minéraux, avec une très faible teneur en matière organique, en dehors des oasis. Sur les reliefs, les sols sont rocaillieux ou sableux (Hamadas, regs, ergs), tandis que dans les zones déprimées (sebkhas, chotts), la texture peut être plus fine, mais marquée par une forte salinité. Ces sols montrent également un lessivage intense des nutriments et une érosion éolienne prononcée (FAO, 2020).

Bien que les études pédologiques restent relativement limitées, les travaux de cartographie ont permis d'identifier une large distribution de sols à croûte calcaire ou gypseuse et de sols salins en Algérie. Selon la classification française (CPCS, 1967), les sols des zones arides algériennes se répartissent en huit grandes catégories :

- Sols minéraux bruts
- Sols peu évolués
- Sols à sesquioxydes de fer

- Sols isohumiques
- Vertisols
- Sols calcimagnésiens
- Sols salés
- Sols hydromorphes

Malgré cette diversité, le trait dominant de ces sols reste la présence marquée de sels (calcaire, gypse, sels solubles), qui influence fortement leurs propriétés physiques, chimiques et agronomiques.

Cependant, d'après la typologie pédologique adaptée aux milieux arides proposée par **Halitim**, et reprise dans les rapports de la **FAO** et de **l'UNESCO**, les principaux types de sols caractéristiques des zones arides en Algérie sont les suivants :

3.1.1. Sols sans accumulation de sels

Sols peu évolués, pauvres en calcaire, localisés sur certaines dayas, représentant moins de 1 % des surfaces arides.

3.1.2. Sols calcaires

Localisés surtout au nord du pays, notamment entre les isohyètes 270 et 500 mm, dans les steppes et les hauts plateaux.

3.1.3. Sols gypseux

Fréquents dans les zones arides et sahariennes recevant moins de 150 mm/an ; leur formation est liée à l'évapotranspiration et à la dynamique des nappes phréatiques.

Le gypse cristallise dans le système monoclinique. Sa structure est généralement décrite comme un réseau simple formé de couches d'anions tétraédriques SO_4^{2-} (avec le soufre au centre et les oxygènes aux sommets) (**figure 02**). Ces couches sont solidement liées entre elles par des cations calcium (Ca^{2+}) et des molécules d'eau, qui assurent la cohésion et la stabilité de l'ensemble cristallin (**Parsons et Lee, 2019**).

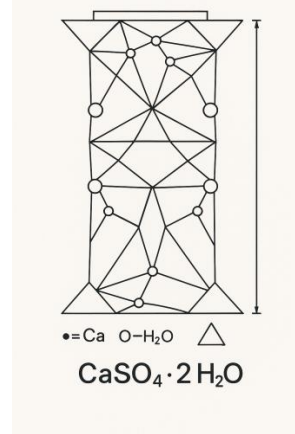


Figure 02. Structure du gypse

3.1.4. Sols calcaires et gypseux

Présents sur des glacis anciens ou polygéniques, souvent en bordure des zones de transition (comme le Zahrez), mais peu étendus.

3.1.5. Sols salés

Les sols salés couvrent des surfaces étendues en Algérie, estimées à environ 3,2 millions d'hectares, réparties à la fois au nord et au sud du pays. Ils sont plus fréquents dans les zones situées en dessous des isohyètes de 450 mm, au-delà desquelles la présence de sols sodiques devient rare (FAO, 2020 ; MEDD, 2021).

La salinisation constitue l'une des formes les plus sévères et souvent irréversibles de dégradation des terres dans les zones sèches. Elle résulte d'un déséquilibre hydrique important, lorsque l'évapotranspiration dépasse largement la pluviométrie. Un rapport précipitations / évapotranspiration inférieur à 0,75 est généralement associé à un risque élevé de salinisation (UNCCD, 2020).

Les sols salins se forment principalement par l'accumulation de sels solubles dans les horizons superficiels du sol. Ce processus est fortement influencé par le régime hydrique, l'intensité de l'évaporation, la remontée capillaire des eaux souterraines, et la présence de sources naturelles ou anthropiques de sels (FAO, 2020 ; UNESCO, 2021 ; UNCCD, 2020).

4. Caractéristiques des sols en zones arides

Les sols des régions arides présentent généralement une fertilité très faible. Ils sont souvent peu profonds, riches en calcaire ou en gypse, fréquemment salins, et pauvres en

matière organique ainsi qu'en éléments minéraux essentiels. Leur structure est peu stable, leur capacité de rétention en eau est limitée, et ils montrent une très faible réserve en éléments nutritifs. De plus, ils possèdent généralement un pH basique, une faible activité biologique, et sont hautement vulnérables à la dégradation sous l'effet de l'érosion ou de pratiques agricoles non durables (FAO, 2020 ; UNCCD, 2022 ; UNESCO, 2021).

Chapitre II. Croûtes biologiques

1. Définition

Les déserts sont souvent perçus comme des environnements arides et dépourvus de vie, recouverts uniquement de sable et de roches. Cependant, cette perception est inexacte, car les déserts abritent une diversité biologique significative, bien que souvent invisible à l'œil nu. Malgré leur apparence stérile, les surfaces rocheuses et sablonneuses sont fréquemment colonisées par une fine couche de microorganismes, présents en proportions variables (**Karabi, 2017**). Ces microorganismes peuvent se développer à la surface, à l'intérieur des roches (où ils sont qualifiés d'endolithiques), ou dans les couches superficielles du sable. L'ensemble des communautés microbiennes vivant juste sous la surface du sol constitue ce que l'on appelle la croûte biologique du sol (**Belnap, 2003**).

Les croûtes biologiques du sol sont des complexes biotiques continus vivant dans les couches superficielles du sol. Elles sont constituées de proportions variables d'organismes autotrophes photosynthétiques (par exemple, cyanobactéries, algues, lichens, mousses) et d'organismes hétérotrophes (par exemple, bactéries, champignons, archées), en interaction colloïdale avec les particules du sol (**figure 03**). Leur épaisseur varie généralement de quelques millimètres à quelques centimètres (**Weber et al., 2022**).

En tant que composants essentiels des écosystèmes arides, les croûtes biologiques remplissent de nombreuses fonctions écologiques fondamentales. Elles contribuent à la stabilisation de la surface du sol, à l'amélioration de sa perméabilité ainsi qu'à l'augmentation de la capacité de rétention en eau dans les quelques centimètres supérieurs du sol (**Sun et al., 2023 ; Shi et al., 2023 ; Gao et al., 2017**).

Elles influencent également les processus écohydrologiques en modifiant le microclimat du sol et en redistribuant l'eau du sol (**Kidron et al., 2022 ; Tucker et al., 2017**).

Bien que de nombreuses études aient été consacrées aux croûtes biologiques, leur classification n'est pas encore définitivement établie. Cette incertitude s'explique principalement par la grande variabilité de leurs caractéristiques notamment l'aspect, la biomasse et la composition microbienne qui dépendent fortement des conditions climatiques et du type de sol (**Belnap et al., 2001 ; Belnap, 2006**).

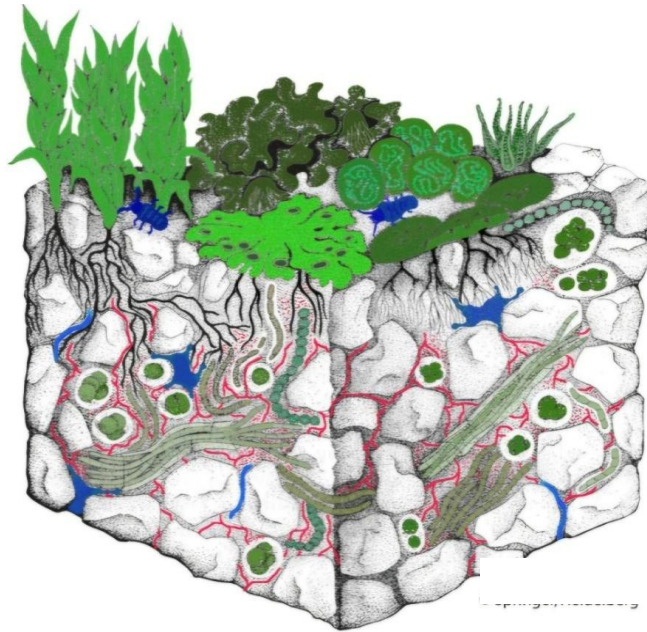


Figure 03. Organismes colonisant les croûtes biologiques du sol (Belnap et Lange, 2003).

2. Processus de formation des croûtes biologiques

Selon Balesdent *et al.* (2015), des environnements initialement stériles peuvent être colonisés par des micro-organismes pionniers transportés par les courants d'air, à condition que ces micro-organismes puissent se fixer sur les surfaces minérales disponibles. Ces milieux sont souvent pauvres en matière organique, ce qui les rend propices à la colonisation par des cyanobactéries.

Les cyanobactéries possèdent des capacités photosynthétiques, ce qui leur permet de transformer le dioxyde de carbone de l'air en composés organiques. Elles excrètent également des polysaccharides qui favorisent leur adhésion aux surfaces minérales. Cette excrétion contribue à la libération d'éléments nutritifs essentiels comme le phosphore, le potassium, le magnésium et le calcium.

De plus, certaines cyanobactéries ont la capacité de fixer l'azote atmosphérique, transformant ainsi l'azote et le carbone inorganiques en composés organiques. Grâce à ces fonctions, les cyanobactéries jouent un rôle clé dans le développement d'une végétation éventuelle dans ces milieux.

Au fil du temps, d'autres micro-organismes, comme les algues vertes et certaines bactéries hétérotrophes, viennent se joindre à cette colonisation. Ensemble, ces micro-organismes forment une croûte biologique vivante à la surface du sol. Cette croûte continue à se développer et à se renforcer grâce à l'implantation de champignons filamenteux et de lichens, qui favorisent leur croissance.

3. Répartition des croûtes biologiques

La répartition des croûtes biologiques à travers le monde est très étendue du point de vue latitude et longitude. En effet, elles ont la capacité de résister aussi bien à des températures très élevées qu'à des températures très faibles (Garcia-Pichel et al., 2013).

Les croûtes biologiques se rencontrent principalement aux États-Unis — notamment sur le plateau du Colorado, dans le Grand Bassin et le désert de Sonora — ainsi qu'en Australie, en Alaska et en Antarctique (Belnap et al., 2001).

Elles sont présentes dans les zones arides et semi-arides du monde entier, notamment dans les steppes, les forêts méditerranéennes et les espaces ouverts de la toundra (Belnap et al., 2001).

Les croûtes biologiques (ou *biocrusts*) occupent une large gamme de niches écologiques dans les zones tempérées, ainsi que dans les régions polaires et alpines, couvrant environ 11 % de la surface terrestre mondiale (Porada et al., 2019) (figure 04).

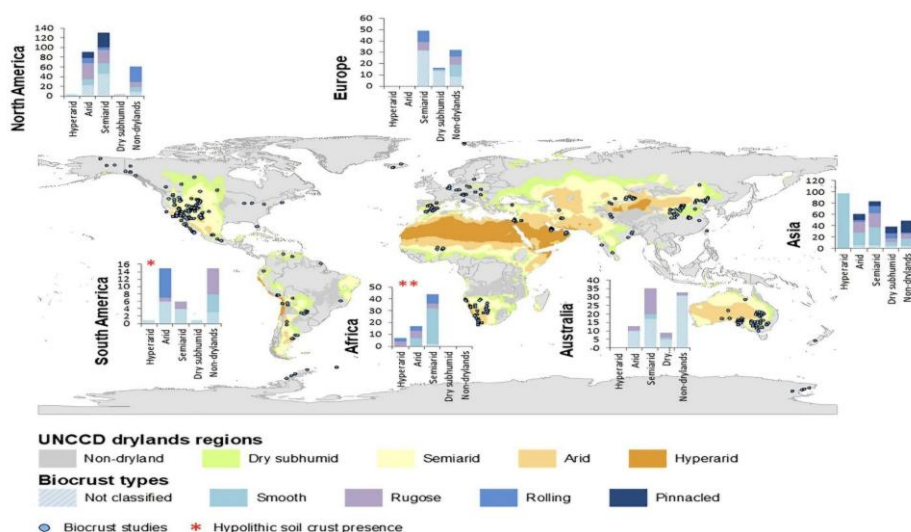


Figure 04. Répartition des croûtes biologiques du sol dans les régions arides et non arides du monde (Weber et al., 2022).

4. Différents types des croûtes biologiques

4.1. Croûtes biologiques associées au sol (selon la morphologie)

Classification des différents types des croûtes biologiques du sol est mentionné dans le **tableau 02** :

Tableau 02. Classification suggérée des différents types des croûtes biologiques du sol (Colesie et *al.*, 2016).

Texture de surface	Apparence	Groupe d'organismes dominants	épaisseur	Localités caractéristiques (exemples)
Lisse	Légère	Cyanobactéries, algues vertes	0-2 mm	Désert de Néguev
	Sombre	Cyanobactéries, algues vertes		Alpes autrichiennes, Alaska, Australie, Europe centrale, Karoo, savanes
Rugueuse	-	Cyanobactéries	2-4 mm	Désert de Sonora, désert de Tengger, Désert de Gobi, Europe centrale
Onduleuse	Mince	Lichens	5-50 mm	Namibie, Groenland, Plateau Columbia, Badlands à Taberna, steppe russe
	épaisse	Mousses		Islande, Plateau Colombia, Antarctique maritime
A Sommet	-	Cyanobactéries, Lichens, Mousses	6-150 mm	Plateau du Colorado, Nord-Est de Australie, Europe centrale

Selon **Belnap (2006)**, les différents types des croûtes biologiques du sol sont illustrés dans la **figure 05**.

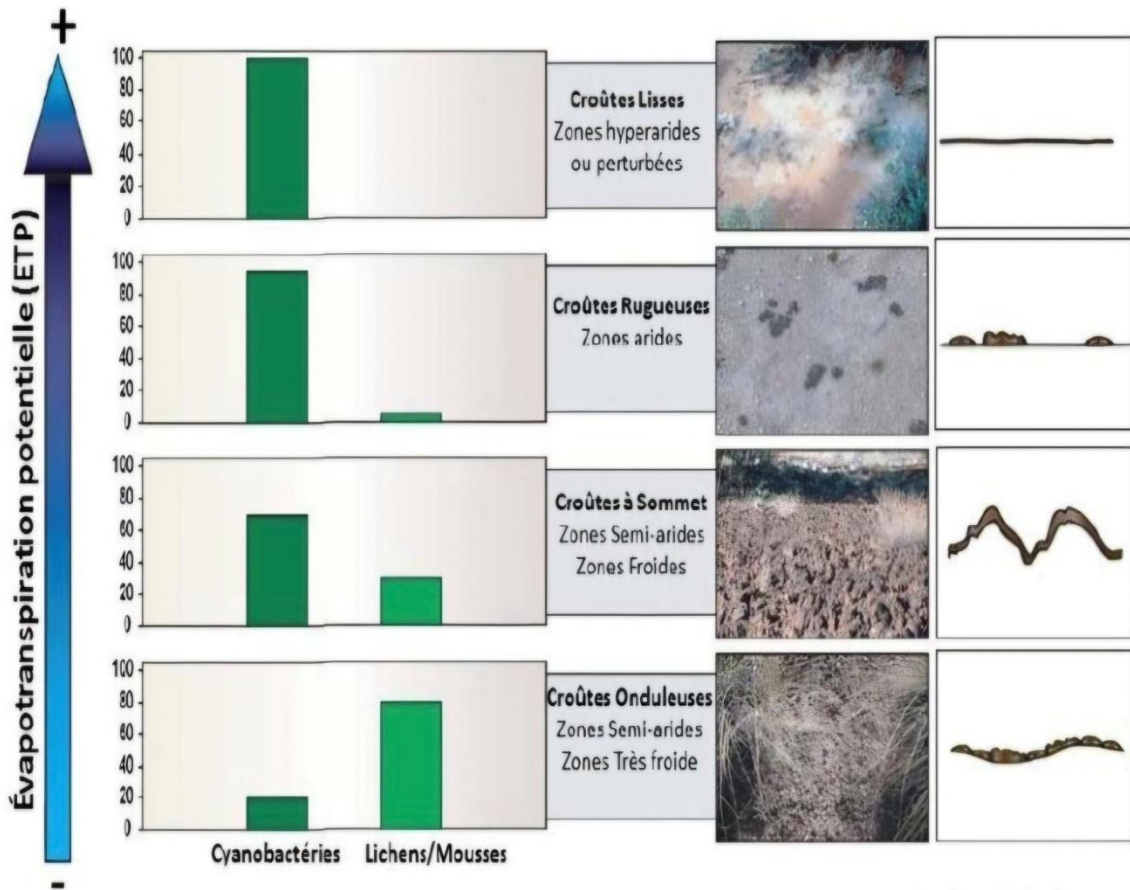


Figure 05. Différents types des croûtes biologiques du sol (organismes dominants, localités et morphologie) (Belnap, 2006).

4.2. Croûtes biologiques associées aux roches (Selon l'emplacement des organismes)

La vie sur les roches à l'interface entre l'atmosphère et un substrat solide (lithosphère) - est une ancienne niche terrestre. Aujourd'hui, ces roches de surface fraîchement exposées à l'atmosphère sont rapidement colonisées par des communautés microbiennes (Gorbushina, 2007)

Ces communautés microbiennes habitent généralement les millimètres extérieurs en centimètres de toutes les roches exposées à la surface de la Terre, Dans les climats terrestres les plus extrêmes, comme les déserts chauds et froids (Gorbushina, 2007).

Les types des roches colonisées par microorganismes Endolithiques sont nombreux : Le grès, Gypse, Calcaire, Quartz, Granite, Silex, Halite, Dolomite (Dong et al., 2007).

4.2.1. Croûtes Hypolithiques

Les croûtes Hypolithiques correspondent aux microorganismes qui colonisent la surface ventrale (face inférieure) des pierres translucides et sont habituellement en contact avec le sol (Pointing et al., 2012)

4.2.2. Croûtes Épilitiques

Les croûtes Épilitiques correspondent aux microorganismes qui colonisent la surface exposée de roche ou de minéraux substrats (Pointing et al., 2012) (figure 06).

4.2.3. Croûtes Endolithiques

Le terme " *endolith*", qui définit un organisme qui colonise l'intérieur de tout type de roche, a encore été classé en trois sous-classes :

- **Chasm Endolith** : colonise des fissures dans la roche (gouffre =fente)
- **Cryptoendolith** : colonise les cavités structurelles dans des roches poreuses, y compris les espaces produits libérés par endolithes (*crypto* =caché)
- **Euendolith** : pénètre activement à l'intérieur des roches formant des tunnels qui sont conformes à la forme de son corps (*eu*=bon, vrai) (Wierzchos et al., 2011).

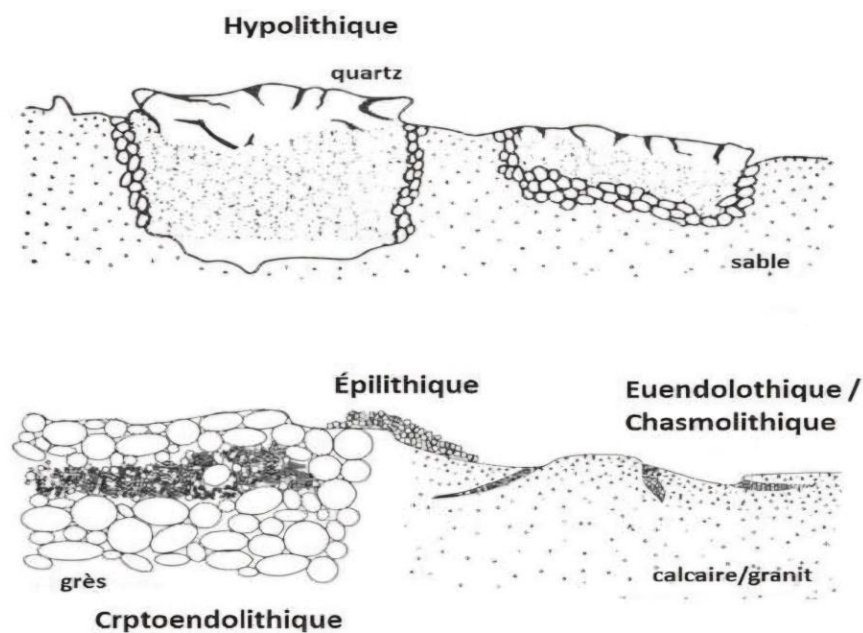


Figure 06. Différents types de croûtes biologiques associées aux roches (Büdel, 2002). Le type hypolithique tiré de Cameron et Blank (1966).

5. Influence des facteurs écologiques sur les micro-organismes des croûtes biologiques

5.1. Influence du sol

5.1.1. Texture

La texture du sol influence la composition spécifique des croûtes biologiques. Les sols à texture fine favorisent la formation de croûtes riches en diversité, comprenant de nombreuses espèces de cyanobactéries, de lichens et de mousses. En revanche, les sols à texture grossière abritent principalement de longs filaments de cyanobactéries très mobiles, telles que *Microcoleus*. Une fois les sols fins suffisamment stabilisés par les cyanobactéries, ils deviennent propices à la colonisation par d'autres organismes, comme les algues vertes et d'autres espèces de cyanobactéries (Belnap et al., 2001).

5.1.2. Composition chimique

La composition chimique du sol joue également un rôle déterminant dans la composition des croûtes biologiques. Les sols riches en calcaire ou en gypse sont particulièrement favorables à l'établissement de ces croûtes. Par ailleurs, certaines espèces de micro-organismes peuvent servir d'excellents indicateurs de la nature chimique des sols (Belnap et al., 2001).

5.2. Influence du climat

5.2.1. Précipitations

L'activité biologique dans les milieux arides et semi-arides est étroitement liée à la quantité et à la fréquence des précipitations. Les croûtes biologiques, constituées d'organismes dont l'activité est conditionnée par l'humidité du sol, sont particulièrement sensibles à ces facteurs. En effet, dans les zones désertiques, l'humidification du sol est de courte durée en raison de l'évaporation rapide, ce qui rend la disponibilité en eau cruciale pour le fonctionnement physiologique des communautés microbiennes (Belnap et al., 2004).

5.2.2. Température

La température constitue un facteur étroitement lié à la problématique de l'eau. En effet, lorsque la température augmente, l'activité des micro-organismes s'intensifie jusqu'à atteindre

un maximum, avant de diminuer. Dans les environnements extrêmes, certaines espèces s'enfoncent dans le sol pour échapper à une insolation excessive. Des minéraux translucides comme le quartz ou des efflorescences salines facilitent leur pénétration à quelques centimètres de profondeur, leur offrant ainsi une protection contre une lumière trop intense, un dessèchement rapide et des températures élevées (**Pointing et Belnap, 2012**).

5.3. Saison

La dynamique saisonnière exerce une influence notable sur la microflore des sols. Selon la période de l'année et le type de sol, des fluctuations importantes de l'activité microbienne peuvent être observées. Certains groupes microbiens sont particulièrement actifs en automne, tandis que d'autres réagissent différemment. Ces variations sont largement liées à la nature et à la quantité des matières organiques disponibles, telles que les litières de feuilles ou de branches. Les saisons modifient donc indirectement la microflore par leur impact sur la végétation, en plus des facteurs climatiques comme la température et l'humidité, qui influencent également l'équilibre microbien du sol (**Jiao et al., 2021**).

5.4. Influence de la végétation

La structure verticale et horizontale des communautés végétales joue un rôle essentiel dans la formation et la stabilité des croûtes biologiques, notamment dans les milieux arides et semi-arides. Par ailleurs, les sols nus, dépourvus de couverture végétale, présentent généralement une biomasse microbienne bien plus faible que celle observée dans les sols couverts de végétation (**Rodriguez-Caballero et al., 2018**).

6. Fonctions écologiques des croûtes biologiques

Les croûtes biologiques, en particulier celles dominées par les Cyanobactéries, jouent un rôle déterminant dans l'amélioration des propriétés physico-chimiques des sols.

Sur le plan chimique, l'impact des cyanobactéries dans les écosystèmes arides et semi-arides s'explique par leurs remarquables capacités métaboliques. En effet, elles sont capables de réaliser la photosynthèse tout en fixant, pour certaines espèces, l'azote atmosphérique, contribuant ainsi de manière significative aux apports en carbone (C) et en azote (N) dans les sols pauvres en nutriments (**Elagamey et Flefel, 2023 ; Malam Issa et al., 2001 ; Acea et al., 2003 ; Brostoff et al., 2005 ; Nisha et al., 2007**). Par ailleurs, leurs enveloppes mucilagineuses jouent un rôle important en retenant divers éléments nutritifs essentiels tels

que le fer (Fe), le zinc (Zn), le molybdène (Mo), le cuivre (Cu) et le manganèse (Mn) (Vaishampayan *et al.*, 2001)

6.1. Fixation de l'azote

L'un des bénéfices majeurs liés à la présence des croûtes biologiques réside dans la capacité de certains micro-organismes à fixer l'azote atmosphérique, le rendant ainsi disponible sous une forme assimilable par les plantes. C'est notamment le cas de certaines cyanobactéries photosynthétiques telles que *Scytonema* et *Nostoc*, ainsi que de lichens comme *Collema* et *Peltula* (Belnap, 2005).

L'azote étant un facteur clé pour la croissance de la végétation, les plantes poussant à proximité des croûtes biologiques présentent généralement des concentrations en azote plus élevées que celles situées dans des zones dépourvues de ces croûtes en surface du sol (Belnap *et al.*, 2001 ; Belnap, 2005).

6.2. Fixation du carbone

Contrairement à la respiration, la photosynthèse permet la fixation du dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique, qui est ensuite libéré sous forme d'oxygène (O₂). De ce fait, les organismes photosynthétiques ont la capacité de capturer le carbone atmosphérique et de le restituer sous une forme directement assimilable par les plantes. Étant principalement constituées de micro-organismes photosynthétiques, les croûtes biologiques jouent ainsi un rôle crucial dans l'apport de carbone au sol (Belnap, 2005).

Les croûtes cryptogamiques possèdent un puissant potentiel de fixation du carbone, contribuant de manière significative à son stockage. Selon Rosentreter *et al.* (2007), une augmentation de 5 % de la capacité de stockage des croûtes biologiques pourrait entraîner une réduction de 16 % du carbone atmosphérique.

6.3. Protection du sol contre l'érosion

Les milieux arides et semi-arides sont fréquemment caractérisés par une perte importante de sols, en raison de l'efficacité des processus morphogénétiques.

Les croûtes biologiques, qui comblent souvent les interstices entre les graminées cespitueuses dans les zones arides et semi-arides, jouent un rôle essentiel en réduisant l'érosion

éolienne et hydrique en limitant les détachements du sol. Elles agissent ainsi comme stabilisateurs de la surface du sol, diminuant les pertes de sol liées à ces phénomènes climatiques dans les régions où la couverture végétale est faible ou absente (**Belnap et al., 2001**).

De plus, ces croûtes contribuent à augmenter la diversité des sites, tout en protégeant la surface du sol contre les forces érosives. Elles apportent également de l'azote, un macronutriment essentiel pour le sol, par le biais de la fixation biologique de l'azote (**Rosentreter et al., 2007**).

6.4. Amélioration de la fertilité et stabilisation de la structure des sols

D'un point de vue physique, les croûtes biologiques contribuent à l'agrégation du sol et à la stabilité de sa structure. Cela s'explique par le piégeage des particules grossières à travers le réseau filamenteux des Cyanobactéries, ainsi que par la cimentation des particules fines à l'aide de leurs sécrétions polysaccharidiques (**Malam Issa et al., 2001 ; Nisha et al., 2007 ; Maqubela et al., 2009**). Ce processus renforce la résistance du sol face à l'érosion hydrique et éolienne, deux facteurs majeurs de la désertification (**Belnap et Gillette, 1997 ; Zhang et al., 2006**).

De plus, les particules d'argile, en raison de leur charge négative, peuvent se fixer aux surfaces adhésives des matrices polysaccharidiques excrétées par les micro-organismes. Ces complexes forment ainsi des sites de rétention pour les cations nutritifs, constituant une réserve accessible pour la nutrition des plantes (**Chamizo et al., 2012**).

Ces croûtes permettent donc au sol de conserver l'humidité, tout en fournissant des nutriments essentiels aux plantes et à la microflore impliquée dans la formation de l'humus (**Romain et al., 2012**).

Les polysaccharides extracellulaires produits par les cyanobactéries, les algues vertes et les lichens jouent un rôle crucial dans l'agglomération des particules du sol, contribuant ainsi à la formation et à la stabilité des agrégats (**Belnap et Büdel, 2016**).

6.5. Établissement des plantes vasculaires

Les croûtes biologiques du sol, comprenant des algues, des bactéries et des champignons, constituent des composants actifs jouant un rôle fondamental dans la rétention des éléments minéraux. Elles interviennent également de manière déterminante dans les processus de succession écologique, tant primaire que secondaire, des plantes vasculaires (Jeffery *et al.*, 2013).

7. Micro-organismes composants les croûtes biologiques du sol

7.1. Bactéries

Les bactéries sont des micro-organismes procaryotes, caractérisés par l'absence de noyau et la présence d'un ADN circulaire libre dans le cytoplasme, souvent accompagné de plasmides. Leur structure cellulaire comprend une paroi rigide et complexe, conférant une grande résistance aux conditions environnementales extrêmes. Certaines espèces possèdent des flagelles, structures filamenteuses responsables de leur mobilité active. La classification bactérienne repose sur divers critères tels que la morphologie, la réponse à la coloration de Gram, les besoins nutritionnels, les conditions de température, la présence ou non de spores, ainsi que leur comportement face à l'oxygène (Thomas et Johnson, 2021). Certaines de ces bactéries contribuent à la fertilité du sol en fixant l'azote et en participant à la décomposition des matières organiques (Belnap *et al.*, 2001 ; Calvet, 2013).

Les *cyanocrusts*, ou croûtes biologiques à cyanobactéries, constituent une forme de croûte édaphique intégrée à la structure même du sol, généralement sur une profondeur de 0,5 à 1 cm. La colonisation initiale est assurée par des cyanobactéries filamenteuses, mobiles et non hétérocystées, qui produisent une gaine commune d'exopolysaccharides. Cette matrice exopolymérique permet la stabilisation des particules du sol en facilitant leur agrégation et leur enchevêtrement avec les filaments microbiens (Garcia-Pichel, 2023).

Une fois la croûte stabilisée, d'autres cyanobactéries, cette fois non mobiles et dotées de pigments photoprotecteurs foncés, viennent s'y établir, formant une communauté plus complexe désignée sous le nom de croûte cyanobactérienne sombre. Lorsqu'elles sont hydratées via la solution du sol, ces croûtes réalisent la photosynthèse en utilisant simultanément le CO₂ atmosphérique et celui stocké dans le sol. Leur activité biologique

engendre la formation de microenvironnements structurés à l'échelle du millimètre (**Garcia-Pichel, 2023**).

Les *cyanocrusts* hébergent également des populations microbiennes diversifiées, comprenant des hétérotrophes aérobies ainsi que des chimio-lithotrophes (**Garcia-Pichel, 2023**).

7.2. Lichens

Les croûtes de lichens sont formées par des thalles qui s'élèvent légèrement au-dessus du sol, ancrés par des rhizines profondes. Elles absorbent rapidement l'eau du sol et sont dominées par des lichens à algues vertes dans les zones humides de rosée ou de brouillard. Les photobiontes (cyanobactéries ou micro-algues) assurent la photosynthèse et soutiennent la croissance du champignon partenaire ainsi que des communautés bactériennes associées. Bien que le transfert direct de carbone organique au sol ne soit pas mesuré, les lichens enrichissent la vie microbienne et modifient la composition du sol, notamment via la décomposition de leur matière morte (**Garcia-Pichel, 2023**).

7.3. Champignons

Ce sont des microorganismes non photosynthétiques, regroupent une grande variété d'organismes eucaryotes qui sont divisés en sous-groupes en fonction de critères morphologiques (**Roger et Garcia, 2001**).

Les champignons existent sous deux formes différentes, soit comme organismes unicellulaires appelés levures soit sous forme d'hyphes, grâce auxquels ils se développent pour former des réseaux ramifiés étendus. La taille des champignons peut varier considérablement, les levures unicellulaires ayant généralement un diamètre de 4-5 μm , alors que les hyphes individuels des champignons filamenteux pouvant former des mycéliums ou thalles et peuvent s'étendre sur des échelles kilométriques (**Jeffry et al., 2013**).

7.4. Bryophytes

Les Bryophytes (dont le nom vient du grec *bryos*: mousse) se trouvent à l'interface du monde des algues vertes et des plantes vasculaires (**Rameau et al., 2008**).

Les Bryophytes sont un embranchement de règne végétal, très homogène, toutes chlorophylliennes, vivants sur le sol, sur l'humus des forêts, sur d'autres végétaux, parfois dans l'eau douce, très rarement dans l'eau saumâtre. Les bryophytes sont dépourvues de vrais tissus vasculaires et de vraies racines (rhizoïdes). Leurs caractères morphologiques et anatomiques leurs exigences écologiques diffèrent suivant les groupes mais elles présentent le même cycle de vie. Ce groupe comprend les hépatiques, les mousses, et les Anthocérotes **(Marouf, 2000)**.

7.5 Actinomycètes

Souvent décrits comme un groupe distinct par les microbiologistes du sol, les actinomycètes sont en fait des Eubactéries Gram positives à structure végétative de type mycélien. Les actinomycètes présentent des similitudes avec les Eubactéries et les Champignons et il existe des formes de transition entre les formes mycéliennes typiques et les formes unicellulaires présentant une aptitude peu marquée à former un mycélium ramifié **(Roger et Garcia, 2001)**.

7.6. Algues

Les algues microscopiques, unicellulaires ou en colonies filamenteuses, sont souvent abondants dans le sol, mais restent localisées à sa surface ou dans de larges fissures **(Gobat et al., 2003)**.

Selon **Jeffry et al. (2013)**, les algues représentent une partie importante de la microflore édaphique. Elles sont un réservoir de nutriments pour les plantes supérieures. A travers la photosynthèse et la fixation de l'azote, elles apportent du carbone organique et de l'azote dans l'écosystème sol, elles favorisent la structuration des sols et contrôlent l'activité des autres organismes édaphiques. Les algues peuvent supporter la dessiccation, aussi bien que les cyanobactéries. Ces mécanismes d'adaptation aux conditions climatiques extrêmes rencontrées à la surface des sols leur sont donc bien utiles. 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.

Partie II

Matériel et Méthodes

Chapitre I. Présentation de la région d'étude

Cette étude a été menée dans deux zones géographiques représentatives des conditions arides caractéristiques du sud-est algérien, en l'occurrence les régions de Ouargla et d'El M'Ghair.

1. Situation géographique

1.1. Région de Ouargla

La région de Ouargla est située dans le Sud-Est de l'Algérie, au cœur du désert saharien. Elle s'étend sur une vaste superficie d'environ 211 980 km², ce qui en fait l'une des plus grandes wilayas du pays. Elle se trouve entre les latitudes 30° et 33° Nord et les longitudes 4° et 7° Est, avec une altitude moyenne de 140 mètres au-dessus du niveau de la mer. Son territoire est caractérisé par un climat saharien aride, dominé par de vastes étendues de dunes de sable, appelées le Grand Erg Oriental. Malgré les conditions climatiques extrêmes, la région dispose de ressources naturelles importantes, notamment en eau souterraine et en hydrocarbures, ce qui en fait un centre stratégique pour l'économie nationale.

Pour ce qui est des limites administratives, la wilaya de Ouargla est limitée :

- Au Nord-Est par les wilayas de Biskra et d'El-Oued.
- A l'Est par les wilayas de Illizi et Touggourt.
- A l'Ouest par la wilaya de Ghardaïa.
- Au Sud-Est par les wilayas In salah.

1.2. Région d'El M'Ghair

La wilaya d'El M'Ghair, située dans le Sud-Est de l'Algérie, s'étend sur une superficie d'environ 8 835 km². Elle occupe une position stratégique dans la région de l'Oued Righ, au cœur du Sahara septentrional, et se trouve aux coordonnées géographiques 33,95° N de latitude et 5,92° E de longitude. Créée en 2019, Son relief est désertique, dominé par des zones de dunes et de chotts, tandis que son climat est aride, chaud en été et doux en hiver.

Pour ce qui est des limites administratives, la wilaya d'El M'Ghair est limitée (**figure 07**) :

- Au nord par la wilaya de Biskra.

- A l'est par la wilaya d'El Oued.
- A l'ouest par la wilaya d'Ouled Djellal.
- Au sud par les wilayas de Touggourt et Ouargla.

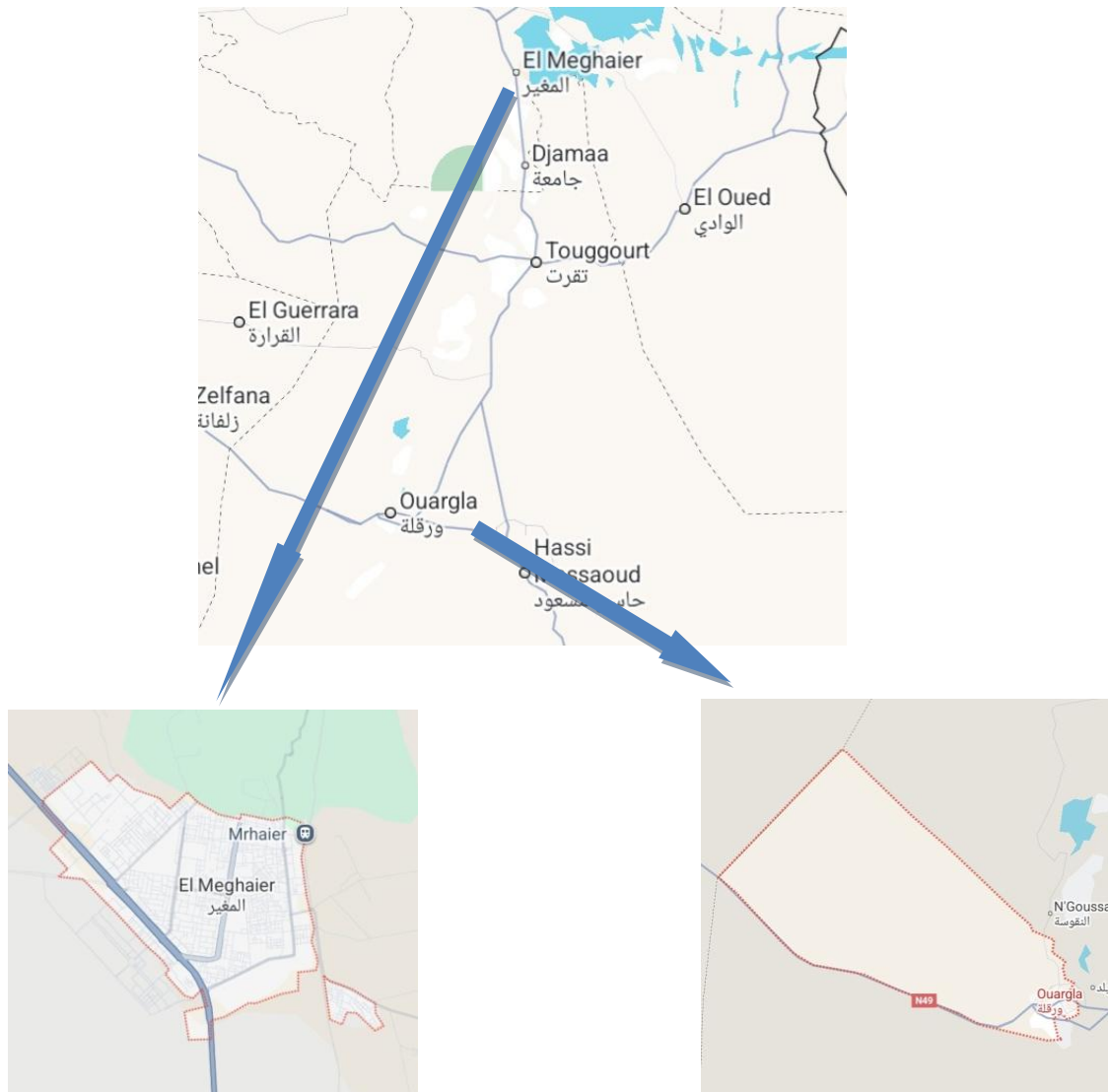


Figure 07. Localisation géographique des régions d'étude

2. Données climatiques des régions d'étude

A / Ouargla

La région de Ouargla, située dans le sud-est de l'Algérie, se caractérise par un climat désertique chaud. Les températures y sont très élevées en été, atteignant fréquemment plus de 45 °C en juillet, tandis que les hivers sont doux, avec des moyennes hivernales autour de 11 °C. La température moyenne annuelle est d'environ 22,8 °C. Les précipitations sont très

faibles et irrégulières, ne dépassant pas 45 mm par an, concentrées principalement en automne et au printemps. L'ensoleillement y est intense, avec plus de 3 200 heures de soleil par an, et l'évaporation annuelle dépasse les 2 200 mm, accentuant l'aridité extrême. Les vents soufflent principalement du nord-est et du sud, avec une vitesse moyenne annuelle de 3,9 m/s, atteignant des pics en été, ce qui favorise les tempêtes de sable fréquentes. Ces caractéristiques font d'Ouargla une région soumise à de fortes contraintes climatiques, notamment en matière de gestion des ressources en eau et de développement agricole.

B / El M'Ghair

La région d'El M'Ghair, située au sud-est de l'Algérie, présente un climat désertique chaud. Les températures y sont élevées tout au long de l'année, avec des moyennes mensuelles variant de 10,7 °C en janvier à 33,6 °C en juillet. Les températures maximales peuvent atteindre jusqu'à 49 °C en été, tandis que les minimales descendent rarement en dessous de 0 °C en hiver. Les précipitations sont très faibles, avec une moyenne annuelle d'environ 42 mm, concentrées principalement en novembre (27,8 mm) et en décembre (9,3 mm). Les mois de juin à août sont pratiquement sans pluie, avec des précipitations proches de 0 mm. L'amplitude thermique annuelle est d'environ 22,9 °C, ce qui reflète une variation importante entre les températures maximales et minimales. Ce climat impose des défis en termes de gestion des ressources en eau et d'adaptation des pratiques agricoles.

Chapitre II. Méthodologie de travail

Dans le cadre de cette étude portant sur les croûtes biologiques du sol, ce chapitre présente la démarche expérimentale adoptée ainsi que la description des sites d'étude. La méthodologie suivie est illustrée dans la **figure 08** :

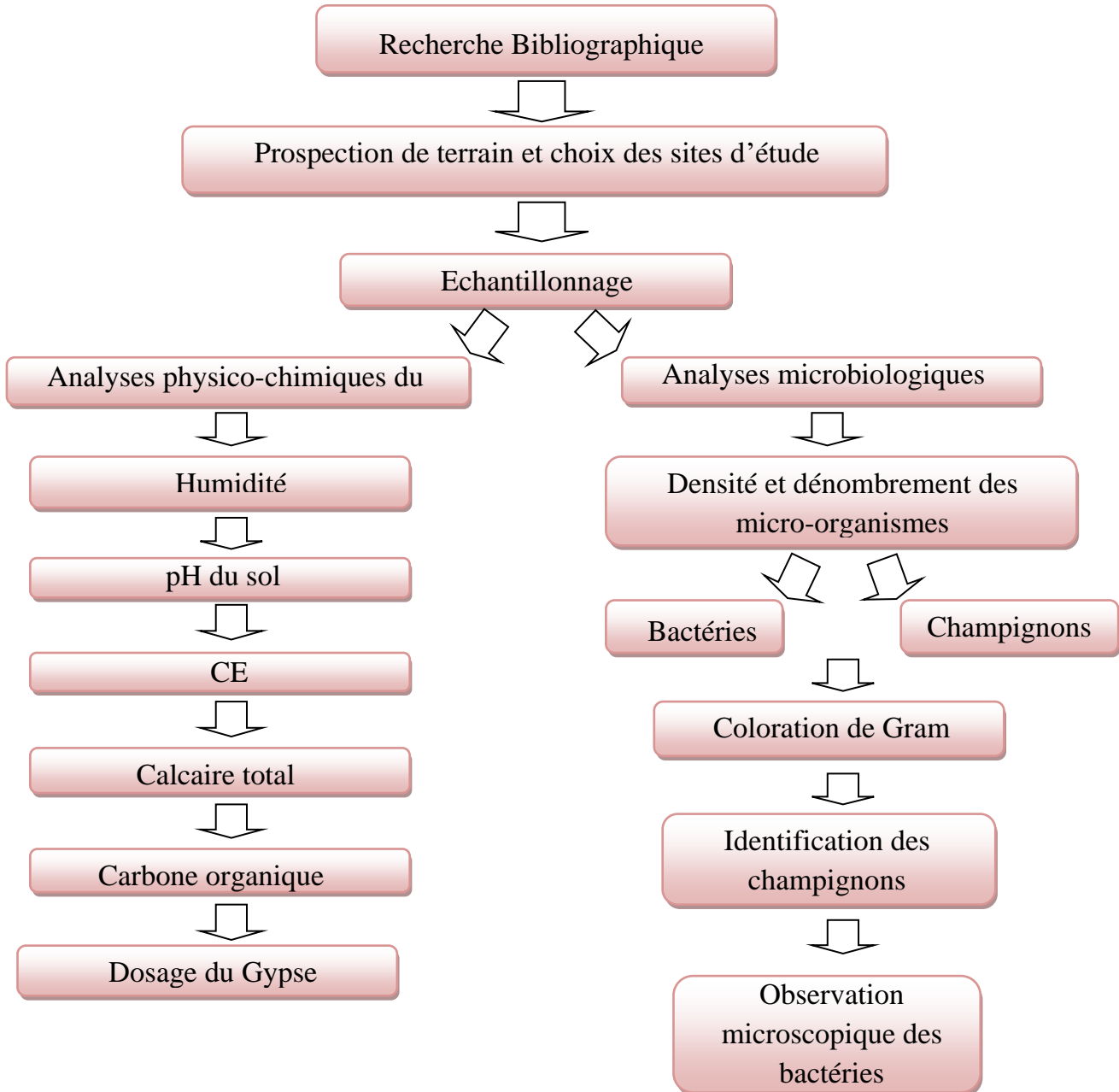


Figure 08. Méthodologie de travail

1. Choix des stations

Dans ce travail, une sortie de prospection sur le terrain a été effectuée le 26/01/2025. A cette occasion, des échantillons ont été prélevés dans les deux stations indiquées (Figure 09)

- Station de M'rara (Région d'El M'Ghair)
- Station de Hassi el khfif (Région de Ouargla)

Le choix des stations d'étude a été basé sur les critères suivants :

- ❖ la localisation en milieu désertique.
- ❖ La présence de sols non cultivés.
- ❖ Teneur en gypse différente.
- ❖ La disponibilité de la matrice biologique dans ces stations.



Figure09. Localisation des stations d'étude

• Description des stations d'étude

❖ Station 01 : M'rara

Descripteurs : HAMDI AISSA Baelhadj, KARABI Mokhtar, DJILLI Ibrahim, GUERZIZ Aya, DAOUI Fatima

Date de description : 26/01/2025 (de 12:30h à 13:00h)

Climat : ensoleillé

Coordonnées :

✓ **Longitude :** 5. 28792°E

✓ **Latitude :** 33. 6526° N

✓ **Altitude :** 113 m

Formation végétale

- *Anastatica hierochuntica* L

- *Atriplex*



Figure 10. Espèces végétales dominantes dans la station 01

(A : *Anastatica hierochuntica* L

B : *Atriplex*)

- **Géomorphologie et état de surface du sol**

La station est localisée sur un versant à pente de 20 %, orienté vers le Nord-Est. Le sol présente un profil à horizons pétrogypsiques, plus précisément hypergypsiques, caractérisés par une forte teneur en gypse sous forme de cristaux bien développés atteignant plusieurs décimètres de diamètre. Bien que les cristaux de gypse ne réagissent pas à l'acide chlorhydrique (HCl), le matériau pédologique montre une effervescence modérée à ce réactif, suggérant la présence de carbonates accessoires. La couleur du sol à l'état sec est décrite par la charte Munsell 5YR 7/4. Les horizons supérieurs sont interstratifiés de couches verdâtres d'algues, s'étendant jusqu'à plus de 20 cm de profondeur, formant des croûtes biologiques de type endolithique et épilithique.



Photo 01. Etat de surface de la station 01

❖ **Station 02 :** Hassi el Khfif

Descripteurs : HAMDY AISSA Baelhadj, KARABI Mokhtar, GUERZIZ Aya, DAOUI Fatima

Date de description : 23/01/2025 (de 11 :00h à 12 :00h)

Climat : ensoleillé

Coordonnées :

- ✓ **Longitude :** 5. 3083° E
- ✓ **Latitude :** 32. 1409° N
- ✓ **Altitude :** 144 m

Formation végétale

- *Hamada scoparia*

- *Fagonia arabica*

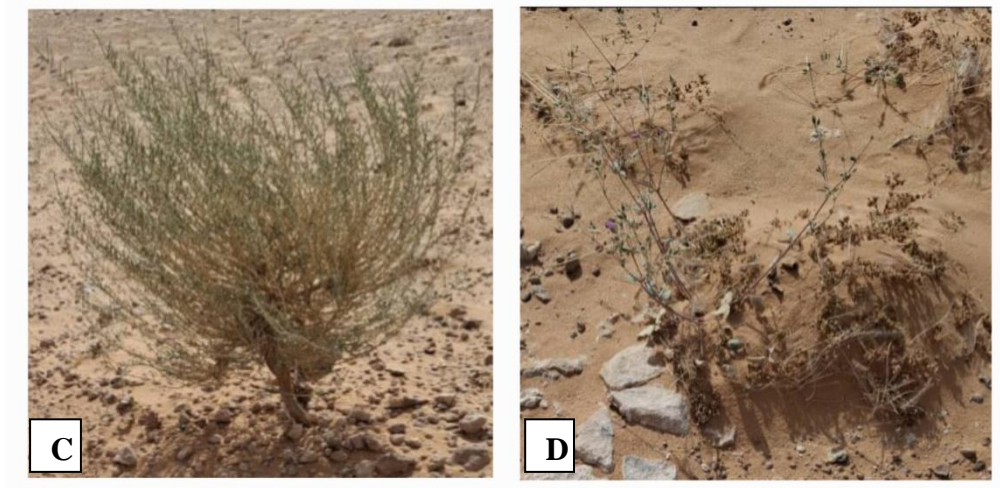


Figure 11. Espèces végétales dominantes dans la station 02

(C. *Hamada scoparia*)

D. *Fagonia arabica*)

- **Géomorphologie et état de surface du sol**

Hassi El Khfif, situé dans la région de Ouargla (commune de N'Goussa), se trouve dans une zone désertique du Sahara. L'état de surface est dominé par des sols arides, sujets à l'érosion éolienne et à la salinisation. Malgré ces contraintes, des efforts sont en cours pour améliorer la qualité des sols via des projets d'irrigation et de gestion de l'eau, visant un développement agricole durable.



Photo 02. Etat de surface de la station 02

2. Echantillonnage

On a effectué deux types de prélèvements :

1. Prélèvements pour les analyses physicochimiques
2. Prélèvements pour les analyses microbiologiques

Les échantillons de M'rara (Station 01) et Hassi El Khfif (Station 02) sont illustrées dans les **figures (12 et 13)**.



Figure 12. Echantillons de la station 01



Figure 13. Echantillons de la station 02

2.1. Prélèvements pour les analyses physicochimiques

Les échantillons prélevés dans chaque station ont été séchés à l'air libre, puis tamisés à l'aide d'un tamis de 2 mm. Cette étape vise à désagréger les agrégats afin d'obtenir un échantillon homogène, destiné aux analyses physico-chimiques.

2.2. Prélèvement pour les analyses microbiologiques

2.2.1. Conservation des échantillons

Dans le cadre de la collecte d'échantillons de sol en vue d'analyses microbiologiques, nous avons scrupuleusement respecté les protocoles recommandés afin de garantir la fiabilité des résultats. Le prélèvement a été effectué à l'aide de matériel stérile, et les échantillons ont été immédiatement conditionnés dans des sacs plastiques stériles et hermétiquement fermés. Chaque échantillon a été dûment étiqueté avec les informations nécessaires : lieu de prélèvement, date. Les échantillons ont ensuite été conservés à une température de 4 °C dans une glacière isotherme. Ces précautions visent à préserver l'intégrité des communautés microbiennes du sol à croûtes biologiques et à assurer la validité des analyses effectuées.

3. Méthodes et techniques utilisées

3.1. Analyses physicochimiques

3.1.1. Conductivité électrique (CE)

Elle permet l'estimation de la teneur globale en sels solubles dans la solution du sol. Mesurée par un conductimètre sur des extraits dont le rapport (terre/eau) est de 1/5 (AFNOR, 1999).

3.1.2. pH

Mesuré sur des extraits du rapport (terre/eau) 1/5 elle exprime la concentration des ions H⁺ libres dans la solution du sol (AFNOR, 1999).

3.1.3. Dosage de carbone organique (C)

La méthode **Walkley-Black** est basée sur le principe suivant : On fait agir sur le sol dans des conditions bien définies une quantité connue d'un corps oxydant dont on dose ensuite l'excès inutilisé. Pour le calcul on admet que l'oxygène consommé est proportionnel au

carbone que l'on veut doser. La méthode Walkley-Black repose sur le principe que le bichromate de potassium oxyde le carbone contenu dans le sol. Le bichromate de potassium change de couleur selon la quantité de produits réduits et ce changement de couleur peut être comparé à la quantité de carbone organique présent dans le sol. Cette méthode permet de mesurer le carbone organique. Elle ne peut être utilisée si les sols contiennent plus de 20 % de matière organique (Walkley et al., 1934).

3.1.4. Matière organique

Elle est estimée après le dosage de carbone organique existant dans les échantillons par la méthode **Walkley-Black**.

La matière organique est égale à 1,72 fois la teneur en carbone organique (**Duchaufour, 2001**).

$$\text{MO}\% = \text{C}\% \times 1,72$$

3.1.5. Humidité

C'est la quantité d'eau contenue dans un sol. Elle est mesurée par rapport à la quantité de terre sèche contenue dans ce sol, et exprimée en pourcent. La méthode consiste à sécher l'échantillon du sol à l'étuve à 105°C jusqu'à un poids constant, la différence du poids avant et après séchage correspond à la quantité d'eau d'après (**ITA, 1975**).

$$H = (\text{P}_{\text{sol frais}} - \text{P}_{\text{sol sec}}) / \text{P}_{\text{sol frais}} \times 100$$

3.1.6. Calcaire total

Le taux de calcaire total est déterminé par la méthode du calcimètre de **Bernard**. Le principe de dosage est fondé sur la réaction caractéristique suivante :



C'est la mesure de CO₂ dégagé suite à l'action d'un excès d'acide Chlorhydrique sur un point connu de l'échantillon. Le volume de CO₂ dégagé est proportionnel à la quantité de carbonate de calcium existante dans l'échantillon analysé :

$$\text{Taux de CaCO}_3 \text{ en } \% = (\text{P}' \cdot v) / (\text{P} \cdot V) \times 100$$

✓ P : Poids de prise d'essai de l'échantillon.

- ✓ P': Poids de CaCO_3 .
- ✓ V: Volume de CO_2 dégagé par l'échantillon.
- ✓ v: Volume de CO_2 dégagé par CaCO_3 .

3.1.7. Dosage du gypse

Nous avons utilisé la méthode gravimétrique. Le principe est basé sur le dosage des ions SO_4^{2-} libérés après une attaque aux carbonates d'ammonium et précipitation sous forme de chlorure de baryum (Coutinet, 1965).

3.2. Analyses microbiologiques

3.2.1. Techniques d'étude et de dénombrement de la microflore telluriques

L'évaluation de la densité microbienne d'un sol peut être réalisée soit par observation microscopique directe, soit par une méthode indirecte reposant sur l'ensemencement de milieux de culture avec des suspensions de sol à différentes dilutions (Pochon, 1954).

En raison des limitations de la méthode directe notamment l'interférence des particules minérales et organiques qui entrave la visualisation et le comptage des microorganismes, la méthode indirecte a été privilégiée. Celle-ci consiste à cultiver les microorganismes présents dans des suspensions diluées de sol sur des milieux solides ou liquides adaptés (Pochon, 1954). Le dénombrement a été effectué sur milieux solides pour les bactéries et champignons.

3.2.1.1. Préparation des suspensions dilutions

Une suspension homogène de sol est d'abord préparée en mélangeant 1 g de sol avec 9 ml d'eau distillée stérile, constituant ainsi une suspension mère de concentration 10^{-1} (figure 14). À partir de cette suspension, une série de dilutions décimales successives est réalisée, allant de 10^{-1} à 10^{-7} . Les suspensions obtenues sont utilisées immédiatement pour les ensemencements sur milieu solide.

Pour chaque dilution, trois répétitions indépendantes sont effectuées, et les résultats présentés correspondent à la moyenne des trois valeurs obtenues.

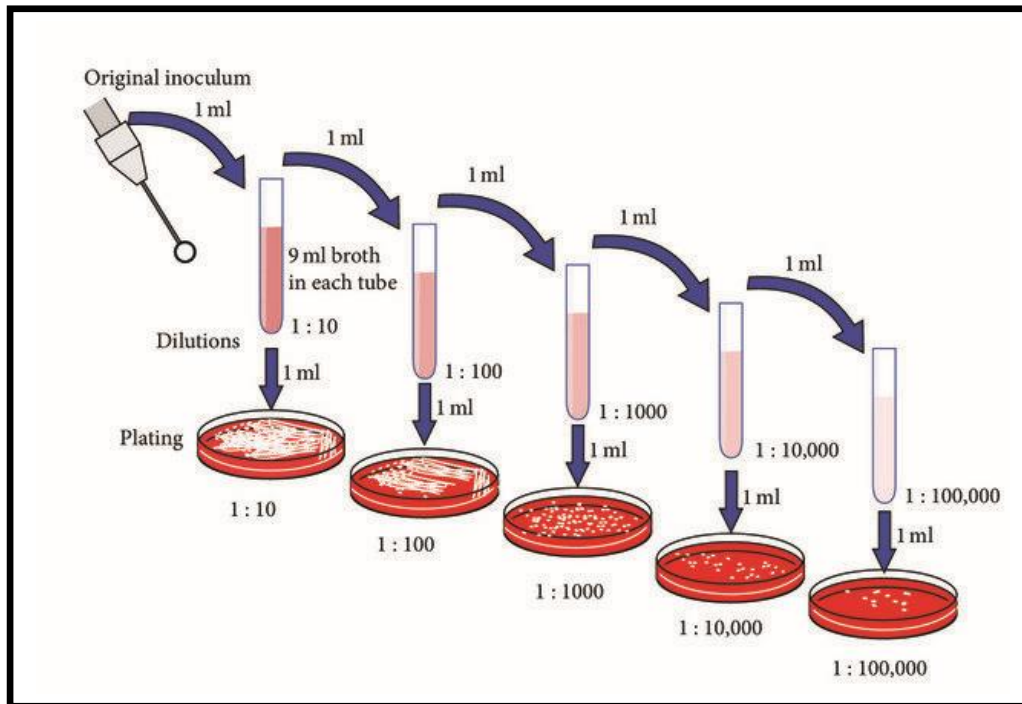


Figure 14. Préparation des suspensions dilutions du sol

3.2.1.2. Ensemencement

L'isolement et la culture de la microflore bactérienne, fongique ont été réalisés sur milieux solides, dont la composition est détaillée dans l'annexe. Les milieux de culture ont été préparés par coulage de gélose stérile, préalablement liquéfiée, dans des boîtes de Pétri, puis laissés à solidifier à température ambiante. L'ensemencement a ensuite été effectué à l'aide d'étalons microbiens confectionnés à partir de pipettes Pasteur stériles, permettant une répartition homogène de l'inoculum en surface.

3.2.1.3. Incubation

Après ensemencement, les boites de pétries ont été incubés à l'étuve à une durée et une température nécessaire pour la prolifération de chaque type microbien.

Tableau 03. Conditions de culture des différents groupes de microorganismes étudiés

	Durée d'incubation	Température d'incubation	Milieu de culture (Annexe I)
Bactéries	De 28 heures	Température de 35°C	Gélose nutritive
Champignons	De 5 jours	Température de 28°C	PDA

3.2.1.4. Lecture des résultats et dénombrements

Selon la norme **Afnor V 04 016 (1985)**, l'observation des résultats se fait à l'aide d'une loupe afin de mieux identifier la structure et l'aspect des colonies. Après une période d'incubation variable en fonction du groupe microbien recherché, les microorganismes viables se développent sous forme de colonies visibles. On retient ensuite la dilution présentant un nombre de colonies compris entre 30 et 300 pour effectuer le dénombrement.

3.2.1.5. Préparation microscopique

Les préparations ont été observées au microscope optique à divers grossissements. Pour chaque observation, une lame propre a été utilisée. Un échantillon, prélevé à l'aide d'une anse de platine (à partir d'une colonie), a été suspendu dans une goutte d'eau physiologique déposée au centre de la lame. La préparation a ensuite été recouverte d'une lamelle afin d'assurer une répartition homogène et d'éviter l'évaporation pendant l'observation microscopique.

3.2.1.5.1. Observations microscopiques

a. Coloration de Gram pour les bactéries

Un frottis fixé à la chaleur est coloré pendant une minute au violet de cristal ; il est ensuite rincé rapidement à l'eau distillée, traité pendant une minute par une solution de lugol, et de nouveau rincé rapidement à l'eau distillée. On soumet alors le frottis coloré à une étape de décoloration en le traitant avec l'éthanol 95 %, pendant 15 à 30 secondes puis est rincé à l'eau distillée. Ensuite le frottis est coloré par la fushine pendant 10 à 30 secondes et après un bref rinçage à l'eau distillée, on sèche le frottis au buvard ou au-dessus de la flamme d'un bec bunsen et on l'examine à l'objectif (x 100) à immersion.

Avec cette coloration double, les bactéries à « Gram positif » apparaissent en violet foncé tandis que les bactéries à « Gram-négatif » sont colorées en rose ou en rouge (**Delarras, 2007**).

3.2.1.6. Identification

L'identification a été effectuée seulement pour la microflore fongique et après 05 jours d'incubation à 28 °C, les cultures des champignons purifiés sur milieu PDA ont été identifiées en fonction de leurs caractéristiques morphologiques (l'identification s'est basée sur des critères macroscopiques).



Partie III

Résultats et discussion



1. Caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés

Les résultats des analyses physico-chimiques du sol des deux stations étudiées sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 04. Caractéristiques physico-chimiques du sol des deux stations d'étude

Analyses	Stations	
	Station 01 M'rara	Station 02 Hassi El Khfif
Humidité (%)	8,1%	3,4%
Texture	Sableuse	Sableuse
pH	7,42	7,93
CE à 25°C (dS/m)	2,20	2,84
Calcaire total (%)	4,01 %	0,70 %
Gypse (%)	69,5%	27,85 %
Carbone organique (%)	0,61 %	0,51 %
Matière organique (%)	1,04 %	0,87 %

Les analyses physico-chimiques réalisées sur les sols à croûte biologique prélevés dans deux stations sahariennes distinctes, à savoir M'rara et Hassi El Khfif, révèlent des différences significatives reflétant l'influence des conditions édapho-climatiques locales sur les caractéristiques du sol et, par conséquent, sur le développement des croûtes biologiques.

2.1. Humidité

L'analyse des échantillons prélevés montre une différence notable en matière d'humidité entre les deux stations étudiées. Le sol de la station de M'rara présente une humidité plus élevée (8,1 %) que celui de Hassi El Khfif (3,4 %). Cette humidité plus importante constitue un facteur favorable au maintien de l'activité microbienne, essentielle à la formation et à la stabilité des croûtes biologiques. En effet, une disponibilité minimale en

eau est nécessaire pour que les micro-organismes, notamment les cyanobactéries et champignons, puissent effectuer leurs fonctions physiologiques et métaboliques (**Belnap, 2003**).

2.2. Texture

Concernant la texture, les deux stations présentent un sol de nature sableuse, typique des milieux désertiques. Ce type de sol, bien que peu rétenteur en eau et en nutriments en raison de sa faible teneur en particules fines, offre une bonne aération et une pénétration lumineuse efficace, ce qui favorise le développement des microorganismes photosynthétiques, notamment dans les couches superficielles (**Pointing & Belnap, 2012**). Toutefois, cette texture rend aussi le sol plus vulnérable à l'érosion éolienne, soulignant ainsi l'importance écologique des croûtes biologiques dans ces milieux fragiles.

2.3. pH

Concernant le pH, les résultats montrent que les sols à croûtes biologiques des deux stations présentent une alcalinité modérée, avec un pH de 7,42 à M'rara et de 7,93 à Hassi El Khfif. D'après l'échelle d'interprétation de pH dans extrait aqueux 1/5 (**Craaq, 2005**). D'après **Djili (2000)**, tous les sols gypseux du Nord de l'Algérie, qu'elle que soit leur teneur en gypse, ont des pH supérieures à 7. Le sol de M'rara, faiblement alcalin, offre des conditions proches de la neutralité, généralement favorables à une diversité biologique équilibrée. En revanche, le pH plus élevé de Hassi El Khfif indique un sol plus alcalin, pouvant limiter la disponibilité de certains nutriments et influencer la composition des communautés microbiennes. Ces différences suggèrent une variation des conditions édaphiques pouvant affecter la structure et la dynamique des croûtes biologiques dans ces environnements arides.

1.4. CE

Les résultats d'analyse de la conductivité électrique (CE) des sols à croûtes biologiques des deux stations sont entre (2.20 dS/m à M'rara et 2.84 dS/m à Hassi El Khfif). D'après l'échelle de la classification de la salinité du sol d'**Aubert (1978)**, Ces valeurs nous conduit à classer le sol de (M'rara) parmi les sols salés, et le sol de (Hassi El Khfif) parmi les sols très salés, ce qui peut restreindre la croissance microbienne et donc limiter la formation et la stabilité des croûtes biologiques.

Cette situation peut être expliquée par plusieurs facteurs liés au contexte climatique, géologique et hydrologique caractéristique des milieux désertiques, notamment la faible pluviométrie, le taux élevé d'évaporation et la nature géologique du substrat.

1.5. Calcaire total

Les teneurs en calcaire dans les sols des deux stations étudiées sont très faibles, ne dépassant pas 5 %, ce qui permet de les classer parmi les sols faiblement calcaires selon les critères pédologiques récents (**Benmoussa et al., 2023**). Plusieurs études récentes, notamment celles menées dans les zones arides et semi-arides d'Algérie, confirment une relation inverse entre les teneurs en calcaire et en gypse dans les sols : une augmentation du calcaire est généralement associée à une diminution du gypse, (**Bousofara et al., 2022 ; Bouhata et Djili, 2021**). La teneur plus élevée à M'rara pourrait influencer la stabilité structurale du sol et favoriser la formation de microagrégats, contribuant à la cohésion de la croûte.

1.6. Corganique

Les sols de M'rara (0,61 % de carbone organique, 1,04 % de matière organique) et de Hassi El Khfif (0,51 % de carbone organique, 0,87 % de matière organique) présentent des teneurs faibles en matière organique, typiques des zones arides. Ces paramètres soulignent un potentiel biologique plus favorable à M'rara pour la formation et la résilience des croûtes biologiques. Bien que ces niveaux soient inférieurs aux normes agricoles classiques (**FAO, 2022**), ils restent compatibles avec le fonctionnement écologique des sols à croûte biologique. Ces croûtes, malgré leur faible biomasse, assurent des fonctions clés telles que la stabilisation des sols, la rétention d'eau, la fixation de l'azote et la séquestration du carbone. Nos résultats sont en concordance avec ceux de **Kaboul (2016) ; Rachedi et Barka (2022)** qui ont souligné la faible teneur des sols arides en carbone organique et en azote total. Des études récentes (**Weber et al., 2022 ; Chamizo et al., 2019**) soulignent que ces écosystèmes peuvent stocker du carbone de manière stable, même avec une faible teneur apparente en matière organique.

1.7. Gypse

Les résultats d'analyse du gypse dans les sols à croûte biologique montrent un contraste marqué entre les deux stations sahariennes : une teneur élevée à M'rara (69,5 %) contre une teneur plus modérée à Hassi El Khfif (27,85 %). Une concentration élevée en gypse, comme

celle observée à M'rara, peut contribuer à la stabilisation de la structure du sol, en favorisant la cohésion des particules et la formation de croûtes biologiques plus résistantes, à condition que les conditions d'humidité soient suffisantes. En revanche, la concentration plus faible à Hassi El Khfif peut induire une moindre cohésion du sol, ce qui, combiné à des conditions climatiques arides et à une faible teneur en matière organique, limite le développement des croûtes biologiques. Selon **Agha et Al-Wazzan (2025)**, des teneurs en gypse modérées à élevées (entre 30 % et 70 %) peuvent améliorer les propriétés physiques des sols en zones arides, mais des niveaux trop élevés peuvent nuire à la circulation de l'air et de l'eau, entravant l'activité microbienne essentielle à la formation des croûtes.

Synthèse comparative des résultats physico-chimiques des sols à croûtes biologiques de M'rara et Hassi El Khfif

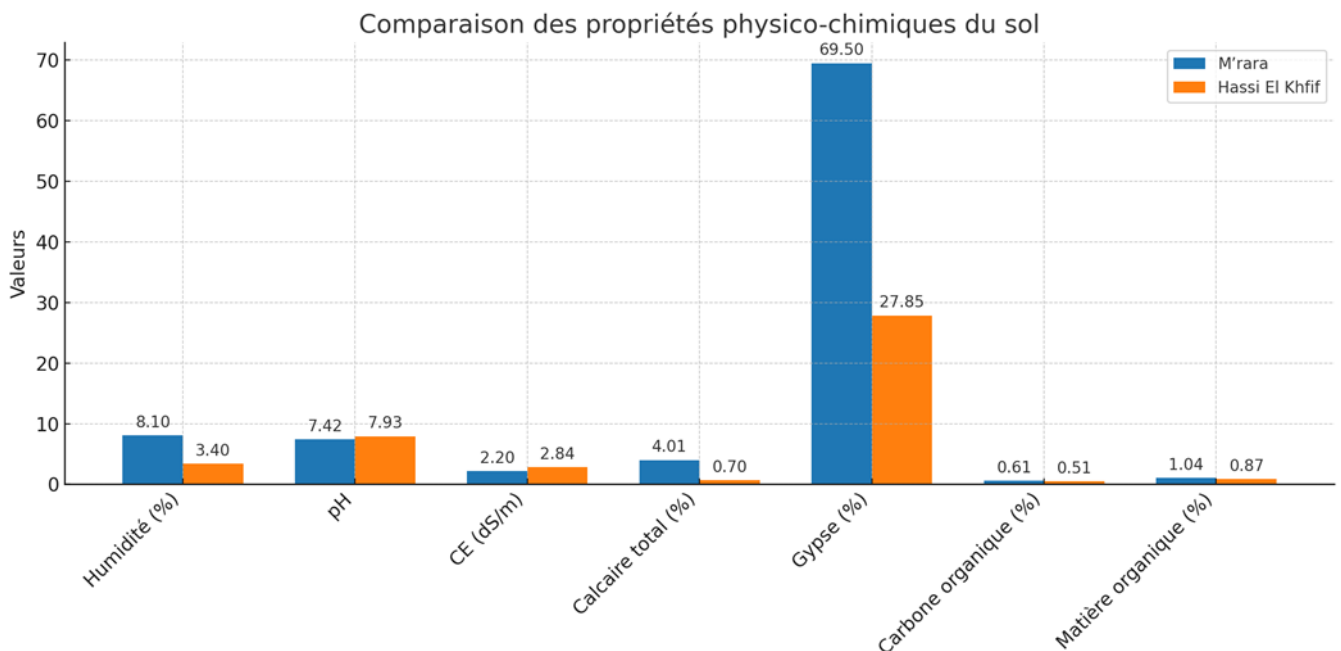


Figure 15. Représentation graphique comparative des propriétés physico-chimiques des sols des deux stations

2. Résultats des analyses microbiologiques

3.1. Résultats de dénombrement microbien des sols dans les deux stations étudiées

L'analyse de la densité microbienne dans les croûtes biologiques des deux stations (M'rara et Hassi El Khfif), exprimée en unités formant colonies par gramme de sol sec (UFC/g.s.s), est représenté dans le **tableau 05**.

Tableau 05. Résultats du dénombrement microbien des sols dans les stations étudiées

Densité microbienne (UFC/g.s.s)	Station 01	Station 02
	M'rara	Hassi El Khfif
Bactéries	$115,34 \times 10^5$	$19,67 \times 10^5$
Champignons	$142,52 \times 10^3$	$79,72 \times 10^3$

Ces valeurs révèlent une différence significative entre les deux sites, tant au niveau des bactéries que des champignons.

Les faibles densités microbiennes observées au niveau des deux stations peuvent être attribuées à l'influence combinée de conditions climatiques rigoureuses, notamment la faiblesse des précipitations, les températures élevées, une évaporation intense et des vents violents. À ces facteurs climatiques s'ajoutent des conditions pédologiques extrêmes propres aux sites étudiés, qui contribuent également à limiter le développement et l'activité des communautés microbiennes du sol.

La biomasse microbienne du sol est fortement influencée par les conditions climatiques et pédologiques. Les variations de température, d'humidité, du taux d'évaporation, ainsi que le régime des précipitations, jouent un rôle central dans la régulation de l'activité et de la répartition des communautés microbiennes. Des études récentes ont montré que ces facteurs, en interaction avec le type de sol et le couvert végétal, modulent significativement la dynamique microbienne (**Haddix et al., 2020**). Les caractéristiques physico-chimiques du sol, telles que la texture, la structure, le pH et la teneur en matière organique, constituent également des déterminants essentiels de la densité et de la diversité microbienne (**Fierer, 2017 ; Delgado-Baquerizo et al., 2018**).

Selon Oustani (**2006**), les faibles densités de la microflore tellurique par gramme de sol sec enregistrées en milieu désertique saharien, ne sont pas la conséquence d'une baisse de diversité par rapport aux sols classiques, mais plutôt d'une baisse des effectifs dans les espèces présentées, et ceci à cause de la faible richesse des sols sahariens en substrats énergétiques et nutritifs, ainsi qu'aux conditions pédoclimatiques extrêmes à savoir :

- ✓ Les températures trop élevées.
- ✓ Les faibles humidités.
- ✓ La forte salinité et le pH trop alcalin du sol

Le nombre et l'activité des microorganismes dépendent principalement de l'énergie libérée lors de la décomposition de la matière organique dans le sol. Ce processus biochimique est influencé par la qualité de la matière organique, la disponibilité des éléments nutritifs comme l'azote, ainsi que par des facteurs environnementaux tels que la température et l'humidité. Les bactéries du sol jouent un rôle clé dans le cycle du carbone, en contribuant à la libération de l'énergie nécessaire à leur croissance et leur activité, ce qui souligne leur importance dans le maintien de l'équilibre écologique et des cycles biogéochimiques (**Zhang et al., 2023**).

En effet, les résultats des analyses microbiologiques révèlent que la biomasse microbienne varie d'un sol à un autre, avec une valeur plus élevée enregistrée dans le sol de la station 01 de M'rara, tandis qu'une valeur plus faible est observée dans le sol de la station 02 de Hassi El Khfif.

Le dénombrement microbien montre que les bactéries sont les micro-organismes les plus abondants dans les deux types de sols étudiés. Elles constituent la majeure partie de la microflore totale en raison de leur grande capacité de multiplication, tandis que les champignons sont moins abondants. Cette prévalence s'explique également par leur large ubiquité écologique ainsi que par leur fort potentiel de reproduction et d'adaptation, qui leur confèrent un avantage compétitif marqué par rapport aux autres microorganismes du sol.

3.1.1. Microflore bactérienne

En examinant les valeurs relatives à la densité bactérienne dans les deux sols, il ressort que cette densité est faible, elle est de l'ordre de $1,06 \times 10^7$ UFC/g.s.s, et $0,19 \times 10^7$ UFC/g.s.s, respectivement pour la station de M'rara (S1), et la station de Hassi El Khfif (S2) (Figure16).

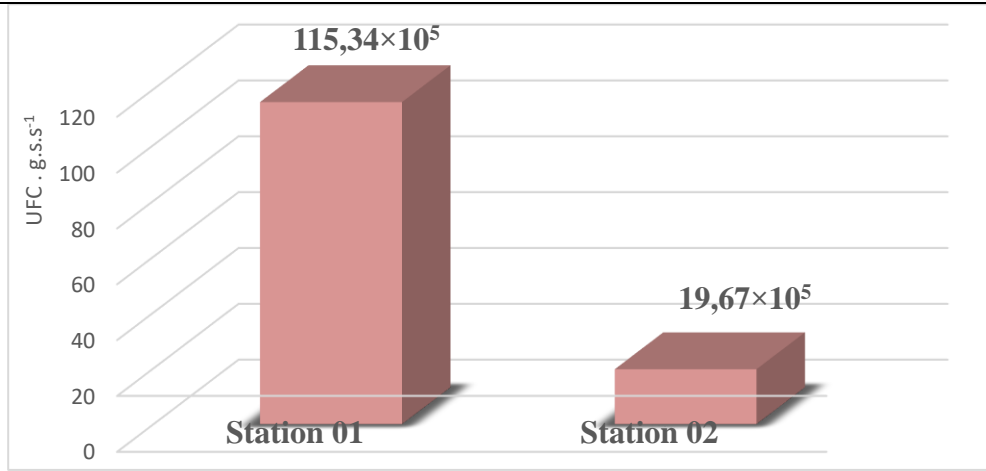


Figure16. Variation de la densité de microflores bactériennes dans les sols des deux stations d'étude

Ces résultats indiquent une activité bactérienne beaucoup plus importante à M'rara. Plusieurs facteurs édaphiques peuvent expliquer cette différence :

Une humidité du sol plus élevée, qui favorise la prolifération bactérienne dans les environnements arides (**Chowdhury et al., 2011**).

Une teneur plus importante en matière organique (1,04 %) et en carbone organique (0,61 %) à M'rara, offrant une meilleure source de nutriments aux bactéries (**Zhang et al., 2019**).

Un pH plus proche de la neutralité (7,42 contre 7,93), condition optimale pour la majorité des bactéries du sol (**Lauber et al., 2009**).

Bien que les deux stations appartiennent au même étage bioclimatique (étage saharien), les précipitations relativement plus élevées et la faible évaporation dans la région d'El M'Ghair (une moyenne annuelle d'environ 42mm) (M'rara) ont probablement favorisé la prolifération des microorganismes de manière plus marquée que dans la station 02 (Hassi El Khefif).

En revanche, le faible taux d'humidité et la forte salinité caractérisant surtout la station de M'rara ont fortement entravé la multiplication du nombre de microorganismes au niveau de cette station.

Il convient de souligner que les bactéries sont généralement favorisées dans des milieux dont le pH est proche de la neutralité, tandis que les champignons présentent une meilleure tolérance aux environnements acides. Cette tendance a été confirmée par **Cruz-Paredes et**

al. (2021), qui ont démontré que les communautés bactériennes réagissent de manière plus marquée aux gradients de pH que les communautés fongiques, ces dernières montrant une plus grande stabilité dans des conditions acides.

Les valeurs obtenues dans cette étude relatives au dénombrement bactérien sont supérieures comparativement à ceux obtenus par **Barka et Rachedi (2022)**, alors qu'ils se rapprochent de ceux obtenus par **Kaboul (2016)** en travaillant sur les croûtes biologiques des sols gypseux dans la région de M'rara.

Analyse des résultats de la coloration de Gram des croûtes biologiques

Afin d'approfondir l'analyse microbiologique des sols étudiés, une coloration de Gram a été effectuée, suivie d'une observation attentive des caractéristiques morphologiques des bactéries isolées. L'examen des cultures sur gélose nutritive a mis en évidence une diversité notable de colonies, tant sur le plan de la forme que de la taille. L'observation microscopique a révélé que la majorité des souches isolées sont des bactéries à Gram négatif.

Les figures 16 et 17 illustrent respectivement les aspects macroscopique et microscopique de certains genres représentatifs de la flore bactérienne identifiée.

L'exclusivité des bactéries à Gram négatif dans les échantillons de sol analysés, notamment dans ceux prélevés à M'rara et Hassi El-Khefif, revêt un intérêt particulier. En dépit de leur paroi cellulaire fine et complexe, généralement associée à une plus grande sensibilité aux stress abiotiques, ces bactéries semblent bien adaptées aux contraintes extrêmes des milieux désertiques. Leur résistance pourrait s'expliquer par divers mécanismes tels que la production de substances protectrices, la capacité à entrer en dormance en cas de stress hydrique, ou encore la formation de biofilms, favorisant leur adhésion au sol et leur protection contre les agressions extérieures.

Leur membrane externe, riche en lipopolysaccharides (LPS), leur confère une protection efficace contre la déshydratation, les UV et les fortes amplitudes thermiques. Ces bactéries assurent également des fonctions écologiques essentielles, comme la fixation de l'azote atmosphérique ou la dégradation de la matière organique, pourtant faiblement représentée dans ces sols.

L'absence de bactéries à Gram positif pourrait résulter soit de leur moindre tolérance aux conditions extrêmes, soit d'une densité trop faible pour être détectée par la méthode

utilisée. Ces observations suggèrent que les environnements désertiques exercent une pression sélective favorisant les micro-organismes dotés d'une forte résilience, notamment les bactéries à Gram négatif. Cela renforce l'intérêt de mieux explorer leur diversité et leur rôle potentiel dans la dynamique des écosystèmes arides, ainsi que dans des applications biotechnologiques futures.

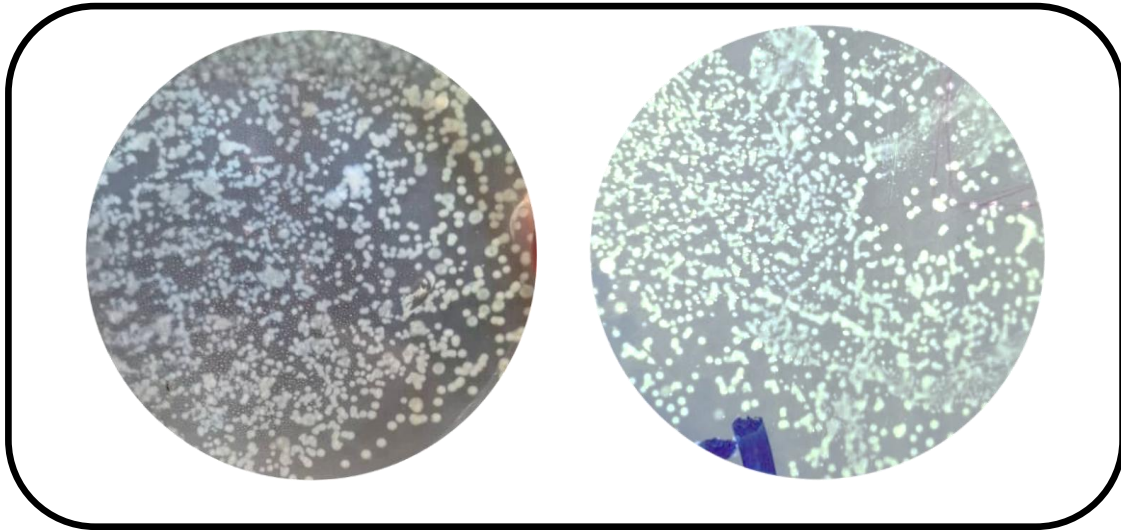


Figure 16. Aspect macroscopique des colonies bactériennes

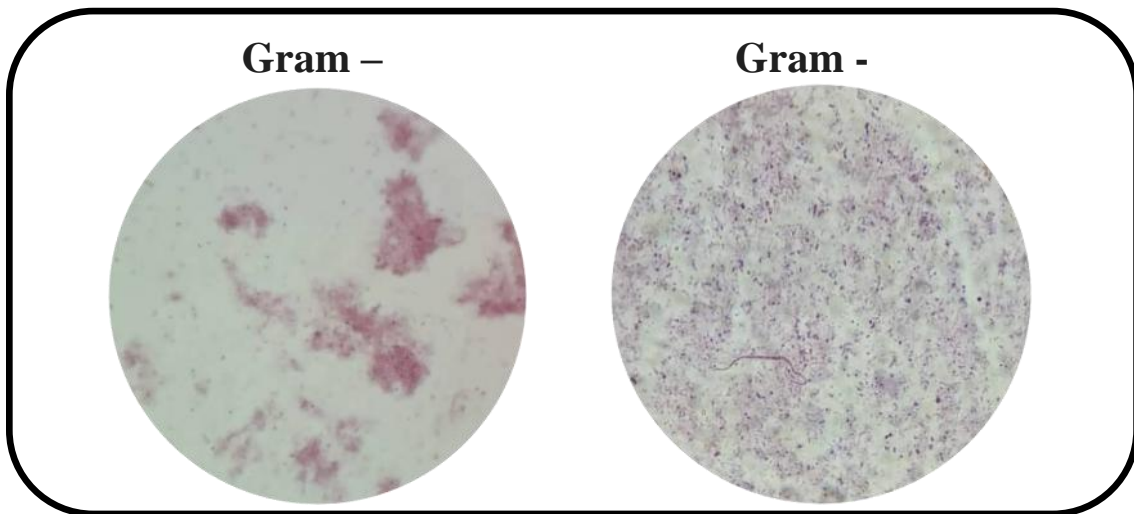


Figure17. Microphotographies observées au microscope optique présentant les aspects microscopiques des bactéries après coloration de Gram (**G × 100**)

3.1.2. Microflore fongique

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude montrent une variation notable de la densité fongique entre les deux stations sahariennes analysées. En effet, la station de M'rara a

enregistré une densité de $142,52 \times 10^3$ UFC/g.s.s, alors que la station de Hassi El Khfif présente une densité plus faible, estimée à $79,72 \times 10^3$ UFC/g.s.s.

Nos résultats relatifs au dénombrement des champignons corroborent ceux obtenus par **Kaboul (2016)** en travaillant sur les croûtes biologiques des sols gypseux dans la région de M'rara.

Cette différence peut être attribuée à plusieurs facteurs édaphiques et environnementaux, notamment la teneur en matière organique, la structure du sol, le taux d'humidité, ainsi que la nature du couvert végétal.

En effet, les champignons, en tant qu'organismes hétérotrophes, dépendent étroitement de la matière organique pour leur nutrition et leur développement. Par conséquent, la pauvreté en matière organique typique des sols désertiques limite fortement leur abondance et leur diversité. Des études récentes confirment cette relation. Par exemple, **Zhang et al. (2024)** ont observé que la diversité fongique était significativement corrélée au taux de matière organique dans les sols arides du désert de Gurbantunggut en Chine.

Malgré cela, les densités observées dans les deux stations restent conformes aux valeurs rapportées par **Davet (1996)**, qui estime que la densité de la microflore fongique dans les sols varie généralement entre 8×10^3 et 10^6 UFC/g.s.s.

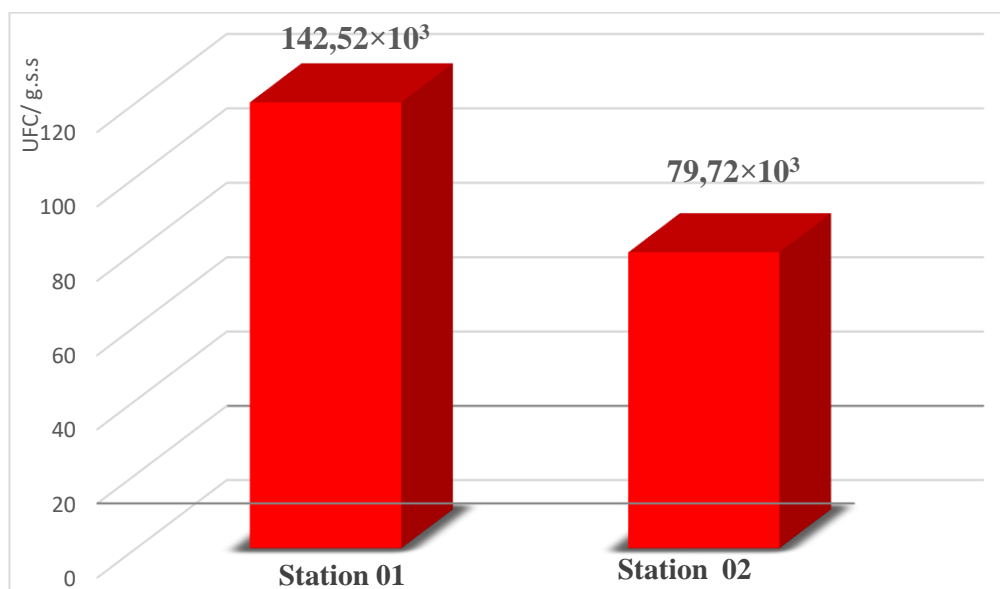


Figure 19. Variation de la densité de la microflore fongique dans les sols des deux stations d'étude

Il est également bien établi que la densité des champignons dans le sol est généralement inférieure à celle des bactéries. Cela est en partie dû à leur sensibilité au pH du sol, les champignons préférant des milieux légèrement acides (pH optimal compris entre 5 et 6), tandis que les sols sahariens présentent en majorité un pH alcalin qui freine leur croissance (**Morel, 1982 ; Dix et Webster, 1995**).

Cependant, la présence significative de champignons dans les deux stations, malgré les conditions climatiques extrêmes, témoigne de leur remarquable capacité d'adaptation. Cette adaptation est notamment assurée par leur aptitude à former des spores résistantes, leur permettant de survivre aux périodes de sécheresse prolongée.

L'analyse microbiologique des sols à croûtes biologiques, prélevés dans les stations sahariennes de Hassi El Khfif (Ouargla) et M'rara (El M'Ghair), a révélé la présence de champignons appartenant principalement aux genres *Penicillium*, *Aspergillus* et *Fusarium* (**figure 20 et 21**). Ces résultats sont en accord avec plusieurs travaux antérieurs qui ont mis en évidence la capacité de ces genres à coloniser des environnements extrêmes, notamment les zones arides et semi-arides.

Les genres fongiques isolés dans cette étude sont également similaires à ceux identifiés par **Kaboul (2016)** et **Bazzine (2009)** dans les sols de la région de Ouargla. Parmi ces genres, *Aspergillus* et *Penicillium* sont les plus fréquemment rencontrés dans les milieux désertiques. En effet, selon **Wang et al. (2023)**, les genres *Aspergillus* et *Penicillium* restent dominants dans ces milieux, avec des fréquences relatives pouvant atteindre respectivement 55 % et 35 %, confirmant ainsi leur capacité à tolérer des conditions extrêmes.

Ces champignons sont reconnus pour leur résistance aux conditions environnementales sévères et leur capacité à coloniser efficacement les sols pauvres, ce qui en fait des bioindicateurs pertinents des dynamiques microbiennes dans les écosystèmes arides.



Figure 20. Aspects macroscopiques des champignons

A : *Fusarium sp*

B ; *Aspergillus sp*

C : *Penicillium sp*

La présence de ces champignons peut être expliquée par leur grande tolérance aux conditions abiotiques sévères, telles que la sécheresse, les températures élevées, ainsi que la faible teneur en matière organique (Mandeel, 2005 ; Egorova et al., 2021). En particulier, les espèces appartenant aux genres *Aspergillus* et *Penicillium* sont reconnues pour leur capacité à produire des spores résistantes à la dessiccation, leur permettant ainsi de survivre dans des habitats pauvres en eau. Quant au genre *Fusarium*, bien qu'il soit fréquemment associé aux sols agricoles, certaines de ses espèces ont été isolées dans des milieux naturels arides, démontrant ainsi leur grande plasticité écologique (Egorova et al., 2021).



Conclusion

Conclusion

Cette étude s'est articulée autour de la caractérisation physico-chimique et microbiologique de certaines croûtes biologiques dans des zones arides.

Les croûtes biologiques représentent un composant écologique essentiel dans les zones désertiques, en raison de leur rôle important dans la stabilisation des sols, la réduction de l'érosion et la régulation des cycles biogéochimiques des éléments. Dans cette optique, la présente étude a visé une caractérisation globale des croûtes biologiques à travers l'analyse des propriétés du sol dans deux stations sahariennes distinctes : la station de M'rara (El M'ghair) et celle de Hassi El Khfif (Ouargla), en adoptant une approche combinée physico-chimique et microbiologique.

Sur le plan physico-chimique, les résultats ont montré que les sols des deux stations sont de nature sableuse, caractéristique typique des environnements arides. Cependant, des différences notables ont été relevées entre les deux sites. La station de M'rara a enregistré une teneur en humidité plus élevée (8,1 %) comparée à Hassi El Khfif (3,4 %), ainsi qu'une forte concentration en gypse (69,5 % contre 27,5 %). Cette richesse en gypse reflète des conditions géologiques particulières pouvant influencer l'activité biologique du sol. En ce qui concerne la matière organique, les analyses ont révélé des taux globalement faibles en matière organique et en carbone organique dans les deux stations, ce qui est attendu dans les écosystèmes arides, où la végétation est rare et la productivité biologique limitée. Toutefois, ces teneurs étaient légèrement plus élevées à M'rara, indiquant des conditions environnementales relativement plus favorables à l'accumulation de matière organique.

Sur le plan microbiologique, l'étude a mis en évidence des différences marquées dans la densité microbienne (bactéries et champignons) entre les deux sites. Des densités élevées ont été observées à M'rara ($115,34 \times 10^5$ UFC/g.s.s pour les bactéries et $142,52 \times 10^3$ UFC/g.s.s pour les champignons), alors qu'elles étaient plus faibles à Hassi El Khfif ($19,67 \times 10^5$ UFC/g.s.s et $79,72 \times 10^3$ UFC/g.s.s respectivement). Cette variation peut être attribuée à plusieurs facteurs environnementaux, notamment l'humidité, la pauvreté en matière organique et la sévérité des conditions climatiques telles que la chaleur intense et l'évaporation excessive.

Les analyses microscopiques et la coloration de Gram ont révélé que les croûtes biologiques des sols désertiques de M'rara et Hassi El Khfif sont dominées par des bactéries à Gram

négatif, adaptées aux conditions extrêmes. Leur rôle dans la fixation de l'azote et la dégradation de la matière organique en fait des éléments clés de la résilience microbienne, justifiant l'intérêt de recherches approfondies sur leur diversité et leur potentiel biotechnologique.

L'analyse microbiologique des sols à croûtes biologiques a révélé également la présence de champignons appartenant principalement aux genres *Penicillium*, *Aspergillus* et *Fusarium* reconnus pour leur capacité à produire des spores résistantes à la dessiccation, leur permettant ainsi de survivre dans des conditions extrêmes.

Ces résultats mettent en évidence la sensibilité des croûtes biologiques aux facteurs édaphiques et climatiques, et soulignent que les conditions extrêmes des zones désertiques peuvent affecter négativement la diversité et l'activité des microorganismes, limitant ainsi le rôle fonctionnel de ces croûtes dans la stabilisation des sols et le maintien de l'équilibre écologique.

En guise de recommandations, nous proposons ce qui suit :

- Protection des sites riches en matière organique : Les croûtes biologiques de M'rara, du fait de leur richesse en humidité et en matière organique, méritent une attention particulière dans les stratégies de conservation, car elles participent activement à la fertilité et à la stabilité des sols désertiques.
- Suivi de la salinisation : À Hassi El Khfif, la forte teneur en gypse et la salinité du sol peuvent affecter négativement la résilience écologique. Il est recommandé de surveiller l'évolution de ces paramètres afin de prévenir la dégradation progressive des écosystèmes.
- Valorisation écologique des croûtes : Compte tenu de leur rôle dans la séquestration du carbone et la fixation des sols, les croûtes biologiques devraient être intégrées dans les programmes de lutte contre la désertification et de restauration écologique dans les zones arides.
- Recherche complémentaire : Il serait utile d'approfondir les analyses microbiologiques et enzymatiques afin de mieux évaluer la vitalité biologique des croûtes dans les deux stations.

En conclusion, cette étude confirme que les croûtes biologiques ne sont pas de simples formations superficielles, mais bien des bioindicateurs précieux de l'état des écosystèmes

désertiques, et des éléments clés à intégrer dans les stratégies futures de lutte contre la désertification et de préservation des ressources naturelles en milieux arides. Elle recommande par ailleurs de poursuivre les recherches dans ce domaine prometteur.



Références bibliographiques

Références bibliographiques

1. **Acea, M. J., Prieto-Fernández, A., & Diz-Cid, N. (2003).** Microbial populations in heated soils. *Biology and Fertility of Soils*, 37(6), 435–440.
2. **AFNOR éditions (1999)** • Normes ; ISO 1096 :1999. ISO 1096:1999. avril 1999. Norme Annulée. Contreplaqué - Classification. Offre prédéfinie.
3. **Agence nationale d'aménagement du territoire (ANAT). (2004).** Carte bioclimatique de l'Algérie. Alger, Algérie : ANAT.
4. **Agha, M. D. S., & Al-Wazzan, F. A. (2025).** Evaluating the impact of gypsum content on the physical and hydraulic properties of soils in arid regions: A review. *Asian Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 11(1), 217–225.
5. **Aubert, G. (1978).** Méthodes d'analyses des sols. Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Paris. 360 p.
6. **Balesdent J., Dambrine E., et Fardeau J.C.2015:** Les sols ont-ils de la mémoire ?80 clés pour comprendre les sols. Ed Quae ; France. 176p.
7. **Bazzine, M. (2009).** Étude de la diversité microbienne des sols de la région de Ouargla. Mémoire de Magister, Université Kasdi Merbah, Ouargla.
8. **Belnap J., 2006:** The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles. *Hydrological Processes* 20, 3159-3178.
9. **Belnap, J. (2003).** The world at your feet: desert biological soil crusts. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1(4), 181–189.
10. **Belnap, J. (2005).** Biological soil crusts and their role in soil fertility and stabilization. In J. Belnap & O. L. Lange (Éds.), *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management* (pp. 177–190). Springer-Verlag.
11. **Belnap, J. (2006).** The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrology and erosion. *Hydrological Processes*, 20(15), 3159–3178.
12. **Belnap, J., & Büdel, B. (2016).** Biological soil crusts as soil stabilizers. In B. Weber, B. Büdel, & J. Belnap (Éds.), *Biological Soil Crusts: An Organizing Principle in Drylands* (pp. 305–320). Springer.
13. **Belnap, J., & Gillette, D. A. (1997).** Disturbance of biological soil crusts: Implications for management of arid and semi-arid lands. *Environmental Management*, 21(3), 161–168.
14. **Belnap, J., & Lange, O. L. (2001).** *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Ecological Studies, vol. 150. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

15. **Belnap, J., Büdel, B., & Lange, O. L. (2003).** Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management. In Belnap J. & Lange O. L. (Eds.), Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management. Ecological Studies, Vol. 150. Springer-Verlag.
16. **Belnap, J., Phillips, S. L., & Miller, M. E. (2004).** Response of desert biological soil crusts to alterations in precipitation frequency. *Oecologia*, 141(3), 306–316.
17. **Belnap, J., Prasse, R., & Harper, K. T. (2001).** Influence of biological soil crusts on soil environments and vascular plants. *Ecological Studies*, 150, 281-300.
18. **Benmoussa, S., Chegrouche, R., Laouar, M. S., Messasset, S., Ayeb, B., & Fernane, A. (2023).** Application d'une nouvelle approche expérimentale sur types de sols des régions arides et semi-arides [Communication présentée au 5^e Colloque international sur les Géosciences au service du développement durable, Biskra, Algérie].
19. **Bernard, J. (1894).** Nouveau procédé de dosage des carbonates dans les substances calcaires. *Annales de Chimie Analytique*, 1, 25–36.
20. **Bougherira, N., & Belhamra, M. (2020).** Superficies et répartition des zones arides et semi-arides en Algérie. *Journal Algérien des Régions Arides*, 13(2), 1–10.
21. **Bouhata, L., & Djili, M. (2021).** Étude de la distribution du gypse et du calcaire selon la granulométrie : cas de la région de Ouargla [Mémoire, Université Kasdi Merbah Ouargla].
22. **Bousofara, A., Zeddouri, A., Hadj-Said, S., Melouah, O., Bousalsal, B., Medjani, F., & Belksier, M. S. (2022).** Relation entre teneur en calcaire et en gypse dans les sols des zones arides du Sahara algérien. *Journal des Sciences du Sol*, 58(1), 45–58.
23. **Brostoff, W. N., Sharifi, M. R., Rundel, P. W., & Barbour, M. G. (2005).** Plant-soil relationships in Mojave Desert roadside shrub communities. *Plant Ecology*, 181(1), 1–21.
24. **Büdel, B. (2002).** Diversity and ecology of biological crusts. *Progress in Botany*, 386-404.
25. **Calvet, C. (2013).** Rôle des microorganismes dans la fertilité des sols arides. *Revue Francophone de Microbiologie*, 34(2), 97-110.
26. **Cameron, R. E., & Blank, G. B. (1966).** Desertalgae: soilcrusts and diaphanous substrata as algal habitats (No. 32). Pasadena, CA, USA: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology.
27. **Chamizo, S., Cantón, Y., & Solé-Benet, A. (2012).** Microbial and physical soil crusts in arid and semi-arid environments. *Soil Biology and Biochemistry*, 49, 1–11.

28. **Chamizo, S., Rodríguez-Caballero, E., Lázaro, R., & Cantón, Y. (2019).** Runoff at contrasting scales in a semiarid ecosystem: A complex balance between biological soil crust features and rainfall characteristics. *Journal of Hydrology*, 569, 235–245.
29. **Chowdhury, N., Marschner, P., Burns, R. G. (2011).** *Soil Biology and Biochemistry*, 43(6), 1221–1228.
30. **Colesie, C., Felde, V. J. M. N. L., & Büdel, B. (2016).** Composition and macrostructure of biological soil crusts. In *Biological soil crusts: An organizing principle in drylands* (pp. 159-172). Springer, Cham.
31. **Concostrina-Zubiri, L., Huber-Sannwald, E., & Martínez, I. (2014).** Biological soil crusts on gypsum soils: A model of biodiversity hotspots for conservation strategies in arid lands. *Biodiversity and Conservation*, 23, 1809–1827.
32. **Coutinet S., 1965 :** Méthodes d'analyses Utilisables pour les sols salés, calcaires et gypseux. *Analyses d'eau .Agronomie tropicale .I.R.A.T.C.V.Paris.144p.*
33. **CRAAQ (2005):** Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). (2005). *Interprétation des analyses de sols : Guide pratique.* CRAAQ. [ISBN : 2-89129-604-5] Djili (2000): Djili, M. (2000). *Les sols gypseux du Nord de l'Algérie : genèse, propriétés et classification* [Thèse de doctorat, Université d'Oran Es-Sénia].
34. **Cruz-Paredes, C., Bang-Andreasen, T., Christensen, S., Ekelund, F., Frøslev, T. G., Jacobsen, C. S., Johansen, J. L., Mortensen, L. H., Rønn, R., Vestergård, M., & Kjøller, R. (2021).** Bacteria respond stronger than fungi across a steep wood ash-driven pH gradient. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4, Article 781844
35. **Davet, P. (1996).** *Microbiologie du sol et production végétale.* INRA, Paris.
36. **Delarras, C. (2007).** *Techniques d'analyses et de contrôle dans les industries agroalimentaires – Tome 1 : Analyses des eaux.* Éditions Tec & Doc/ Lavoisier, Paris, France, 3e édition, 632 pages.
37. **Delgado-Baquerizo, M., Oliverio, A. M., Brewer, T. E., Benavent-González, A., Eldridge, D. J., Bardgett, R. D., Maestre, F. T., Singh, B. K., & Fierer, N. (2018).** A global atlas of the dominant bacteria found in soil. *Science*, 359(6373), 320–325.
38. **Dix, N. J., & Webster, J. (1995).** *Fungal Ecology.* Chapman and Hall, London.
39. **Dong, H., Rech, J. A., Jiang, H., Sun, H., & Buck, B. J. (2007).** Endolithic cyanobacteria in soil gypsum: Occurrences in Atacama (Chile), Mojave (United States), and Al-Jafr Basin (Jordan) deserts. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 112(G2), G02S03.

40. **Duchaufour, P. (2001).** Introduction à la science du sol : Sol, végétation, environnement (6^e éd.). Dunod.
41. **Egorova, D. O., Polyakova, E. P., & Bilanenko, E. N. (2021).** Fungal biodiversity of arid soils: Ecological roles and biotechnological potential. *Microorganisms*, 9(3), 642.
42. **Elagamey, E., Abdellatef, M. A. E., & Flefel, H. E. (2023).** Cyanobacteria – A futuristic effective tool in sustainable agriculture. In A. Tiwari (Ed.), *Cyanobacteria: Recent advances and new perspectives* (pp. 1–20). IntechOpen.
43. **Emberger, L., & Sauvage, C. (1963).** Classification bioclimatique des zones arides de l'Algérie. In *Actes du Colloque International sur les Zones Arides*, Alger, 1963.
44. **FAO (2005) :** Rapport intitulé « L'état des ressources en terres et en eau pour l'alimentation et l'agriculture », qui traite des défis liés aux ressources naturelles dans les zones arides et semi-arides.
45. **FAO. (2020).** Global drylands: A UN system-wide response. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
46. **FAO. (2022).** Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). Global assessment of soil carbon in grasslands: From current stocks to sequestration potential. Weber et al. (2022).
47. **Fierer, N. (2017).** Embracing the unknown: Disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nature Reviews Microbiology*, 15(10), 579–590.
48. **Gao, Y., Zhang, X., Li, Z., Zhao, Y., & Chen, Y. (2017).** Effects of biological soil crusts on soil hydrological properties in arid and semi-arid regions. *Geoderma*, 305, 12–19.
49. **Garcia-Pichel, F. (2023).** Cyanobacterial crusts and their role in soil aggregation and stability. *Journal of Arid Environments*, 205, 104945.
50. **Garcia-Pichel, F., Loza, V., Marusenko, Y., Mateo, P., & Potrafka, R. M. (2013).** Temperature drives the continental-scale distribution of key microbes in topsoil communities. *Science*, 340(6131), 1574–1577.
51. **Gobat, J.-M., Aragno, M., & Matthey, W. (2003).** Le sol vivant : Bases de pédologie, biologie des sols (2e éd.). Presses polytechniques et universitaires romandes.
52. **Gómez-Silva, B., Dorador, C., Wierzchos, J., & Ascaso, C. (2023).** Microbial communities in biocrusts of arid ecosystems: Structure, function and resilience. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1156789.

53. **Gorbushina, A. A. (2007).** Life on the rocks. *Environmental Microbiology*, 9(8), 1613–1631.
54. **Haddix, M. L., Phillips, J. A., & Cotner, J. B. (2020).** Climate and edaphic controls on microbial biomass carbon: A global synthesis. *Soil Biology and Biochemistry*, 150, 108000.
55. **Halitim, A. (1985).** Contribution à l'étude des sols des zones arides (hautes plaines steppiques de l'Algérie) : morphologie, distribution et rôle des sels dans la genèse et le comportement des sols. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure Agronomique, Alger.
56. **Huang, J., Yu, H., Guan, X., Wang, G., & Guo, R. (2017).** Accelerated dryland expansion under climate change. *Nature Climate Change*, 7, 166–171.
57. **Huber, G., & Schaub, D. (2011).** Microbial biomass in soils. *Soil Biology Series*, Springer.
58. **Huggett, R. J. (2023).** Soil as part of the Earth system. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 47(4), 454–466.
59. **INRAE. (2023).** Changement climatique et zones arides dans le monde : identification de trois seuils de réponse des écosystèmes. Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement.
60. **ITA (1975).** Méthodes d'analyse des sols : mesure de l'humidité par dessiccation à 105°C. Institut des Techniques Agricoles, Manuel Technique, Alger.
61. **Jeffery, W. H., Bates, J. W., & Preston, C. D. (2013).** Ecology and functional roles of biological soil crusts in semi-arid ecosystems of Spain. *FEMS Microbiology Ecology*, 85(1), 1–13.
62. **Jeffry, L., Smith, J., & Thompson, R. (2013).** Fungal morphology and ecology: From unicellular yeasts to extensive mycelial networks. *Mycological Research*, 117(6), 497–509.
63. **Jiao, S., Li, Y., Chen, W., Wei, G., & He, Z. (2021).** Climate change alters temporal dynamics of alpine soil microbial functioning and biogeochemical cycling via earlier snowmelt. *The ISME Journal*, 15(9), 2403–2415.
64. **Kaboul, A. (2016).** Évaluation de la diversité fongique dans les sols désertiques de la région de Ouargla. Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla.
65. **Karabi M., (2017).** Fonctionnement microbiologique Des sols oasiens. Cas de quelques sols de la région de Ouargla. Thèse de Doctorat. Université de Ouargla. 251p.
66. **Kidron, G. J., Herrnstadt, I., & Barzilay, E. (2022).** Biocrusts and their role in ecohydrological processes in arid environments. *Ecohydrology*, 15(3), e2476.

- 67. Lacheheb, M. F., Khetta, S. E., Khechana, S., & Lamoudi, A. (2023).** Estimation de l'évapotranspiration potentielle et réelle dans une zone hyperaride (cas d'Oued Souf, sud-est algérien). Communication présentée au International Pluridisciplinary PhD Meeting IPPM 23, Université de El Oued.
- 68. Lauber, C. L. et al. (2009).** *Applied and Environmental Microbiology*, 75(15), 5111–5120.
- 69. Le Figaro. (2024).** Climat : sans compter l'Antarctique, les terres arides couvrent désormais plus de 40 % de la planète.
- 70. Malam Issa, O., Trichet, J., Défarge, C., Couté, A., & Valentin, C. (2001).** Role of a microbial cover on structural stability of a sandy soil in Sahelian part of western Niger. *Geoderma*, 101(1–2), 15–30.
- 71. Mandeel, Q. A. (2005).** Fungal contamination of some imported spices. *Mycopathologia*, 159(2), 291–298.
- 72. Maqubela, M. P., Mnkeni, P. N. S., Issa, O. M., Pardo, M. T., D'Acqui, L. P., & Pardo, M. T. (2009).** Nostoc cyanobacterial inoculation in South African agricultural soils enhances soil structure, fertility, and maize growth. *Plant and Soil*, 315(1–2), 79–92.
- 73. Marouf, F. (2000).** Introduction à la botanique des bryophytes. Presses Universitaires de France. Roger, P., & Garcia, M. (2001). Microbial diversity and taxonomy: Morphological criteria in fungi and actinomycetes. In *Microbiology Today* (Vol. 28, pp. 45–58). Springer.
- 74. MEDD. (2021).** État de l'environnement en Algérie – 2021. Ministère de l'Environnement et des Énergies Renouvelables, Algérie.
- 75. Mehda, L. (2022).** Adaptation microbienne aux environnements hyperarides : étude des biocroutes dans les zones désertiques. Thèse de doctorat, Université Mohammed V de Rabat, Maroc.
- 76. Morel, J. L. (1982).** Influence du pH sur la microflore fongique du sol. *Revue d'Écologie et de Biologie du Sol*, 19(2), 123–134.
- 77. Moreno-Jiménez, E., Orgiazzi, A., Jones, A., Saiz, H., Aceña-Heras, S., & Plaza, C. (2022).** Aridity and geochemical drivers of soil micronutrient and contaminant availability in European drylands. *European Journal of Soil Science*, 73(1), e13163.
- 78. Nedjraoui, D. (2003).** Caractérisation bioclimatique des zones arides en Algérie : typologie et implications écologiques.

79. Nisha, N., Kaushik, A., & Kaushik, C. P. (2007). Effect of indigenous cyanobacterial application on structural stability and productivity of an organically poor semi-arid soil. *Geoderma*, 138(1–2), 49–56.
80. Oustani, M. (2006). Contribution à l'étude des champignons du sol de la région de Ouargla. Mémoire de Magister, Université Kasdi Merbah, Ouargla.
81. Parsons, I., & Lee, M. R. (2019). The structure of CaSO₄ nanorods — the precursor of gypsum. *Scientific Reports*, 9(1), 1–11.
82. Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633–1644.
83. Pochon, J. (1954). *Techniques d'analyse microbiologique du sol*. Éditions de la Tourelle, Saint-Mandé, France.
84. Pointing, S. B., & Belnap, J. (2012). Microbial colonization and controls in dryland systems. *Nature Reviews Microbiology*, 10(8), 551–562.
85. Porada, P., Tamm, A., Raggio, J., Cheng, Y., Kleidon, A., Pöschl, U., & Weber, B. (2019). Global NO and HONO emissions of biological soil crusts estimated by a process-based non-vascular vegetation model. *Biogeosciences*, 16(10), 2003–2031.
86. Rameau, J.-C., Mansion, D., Dumé, G., Gaudeul, M., Jauzein, P., Molinier, R., ... & Podaire, A. (2008). *Flore forestière française: guide écologique illustré*. Tome 1: Plaines et collines. Institut pour le Développement Forestier.
87. Rodriguez-Caballero, E., Weber, B., Büdel, B., & Belnap, J. (2018). Biological soil crusts as a model system for understanding the ecology of arid ecosystems. In *Biological Soil Crusts: An Organizing Principle in Drylands* (pp. 1–19). Springer.
88. Roger, P., & Garcia, M. (2001). Microbial diversity and taxonomy: Morphological criteria in fungi. In *Microbiology Today* (Vol. 28, pp. 45–58). Springer.
89. Romain, A. C., Dufresne, A., & Dufresne, M. (2012). Biological soil crusts and their role in soil fertility and stabilization. In J. Belnap & O. L. Lange (Éds.), *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management* (pp. 177–190). Springer-Verlag.
90. Rosentreter, R., Eldridge, D. J., & Greene, S. (2007). Biological soil crusts: Ecology and management. In J. Belnap & O. L. Lange (Éds.), *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management* (pp. 263–280). Springer-Verlag.
91. Sasson, A. (1967). *Microbiologie des sols tropicaux*. Dunod, Paris.
92. Shi, Z., Zhang, Y., Zhang, L., Zhao, Y., & Liu, H. (2023). Biocrusts enhance soil water retention and infiltration in arid regions. *Soil Biology and Biochemistry*, 168, 108617.

-
93. Sun, X., Xiao, Y., Li, Y., Wang, Y., & Huang, Y. (2023). Biocrusts intensify water redistribution and improve water availability to dryland vegetation: Insights from a spatially-explicit ecohydrological model. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1179291.
94. Thomas, S., & Johnson, A. L. (2021). Structure and assembly of the bacterial flagellum. In C. R. Smith & L. M. Brown (Eds.), *Advances in bacterial cell structure* (pp. 45–78). Springer.
95. Tucker, C. L., Reed, S. C., & Belnap, J. (2017). Biocrusts and their impact on soil microclimate and water redistribution. *Journal of Arid Environments*, 145, 1–10.
96. UNCCD. (2020). *Global Land Outlook: Working Paper on Salinization*. United Nations Convention to Combat Desertification.
97. UNCCD. (2022). *Global Land Outlook 2: Land Restoration for Recovery and Resilience*. United Nations Convention to Combat Desertification.
98. UNCCD. (2024). *Three-quarters of Earth's land became permanently drier in last three decades: UN*. United Nations Convention to Combat Desertification.
99. UNESCO. (2021). *Managing Salinity and Soil Quality in Dryland Environments*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
100. UNESCO. (2024). *Rooted in Resilience: Unearthing the Importance of Soil in Sustainable Development*. Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture.
101. Vaishampayan, A., Sinha, R. P., Häder, D. P., & Kumar, H. D. (2001). Cyanobacterial biofertilizers and their role in agriculture and environment. *Botanica Review*, 67(4), 409–435.
102. Wang, M., Zhao, X., & Li, J. (2023). Fungal community structure and functional traits in gypsum-rich arid soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 172, 108904.
103. Weber, B., Belnap, J., Büdel, B., Antoninka, J., Barger, N.N., Chaudhary, V.B., Darrouzet-Nardi, A., Eldridge, D.J., Faist, A.M., Ferrenberg, S., Havrilla, C.A., Huber-Sannwald, E., Malam Issa, O., Maestre, F.T., Reed, S.C., Rodriguez-Caballero, E., Tucker, C., Young, K.E., Zhang, Y., Zhao, Y., Zhou, X. and Bowker, M.A. (2022). What is a biocrust? A refined, contemporary definition for a broadening research community. *Biol. Rev.* (2022), pp. 000–000. 1, Doi: 10.1111/brv.12862.
104. Wierzechos, J., Camara, B., De Los Rios, A., Davila, A. F., & Sanchez Almazo, M. (2011). Microbial colonization of Ca-sulfate crusts in the hyperarid core of the

-
- Atacama Desert: Implications for the search for life on Mars. *Geobiology*, 9(5), 337–351.
- 105. Zhang, B., Ding, Z. J., Tang, M., Cheng, W. X. & Chen, X. (2019).** Measuring rhizosphere effects of two tree species in a temperate forest: A comprehensive method comparison. *Soil Biology and Biochemistry*, 135, 183–192. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.05.002>
- 106. Zhang, Q., Zhang, Q., Zhang, Y., & Zhang, X. (2006).** Effects of biological soil crusts on soil erosion in the Loess Plateau of China. *Catena*, 65(3), 168–174.
- 107. Zhang, Y., Mo, C., Pan, Y., Yang, P., Ding, X., Lei, Q., & Kang, P. (2023).** Responses of soil microbial survival strategies and functional changes to wet–dry cycle events. *Microorganisms*, 11(11), 2783.
- 108. Zhang, Y., Liu, R., & Chen, L. (2024).** Influence of organic matter on fungal diversity in arid desert soils. *Journal of Arid Land Ecology*, 18(2), 125–134.

A decorative graphic consisting of two parallel, dark red curved lines that form an open, semi-circular shape around the text. The lines are slightly thicker at the ends.

Annexes

Annexe I

a- Milieu de culture pour les bactéries : Gélose nutritive à l'extrait de terre (POCHON, 1954) :

- Extrait de viande1g
- Extrait de levure2g
- Chlorure de sodium.....5g
- Peptone.....10g
- Agar-agar.....15g

Dissoudre les constituants dans 900ml d'eau distillée, puis dans l'autoclave à 121°C pendant 15 min.

b- Milieu pour les champignons : P.D.A

- Pomme de terre.....200g
- Glucose.....20g
- Agar-agar.....15g

Dissoudre les constituants dans 900ml d'eau distillée, puis dans l'autoclave à 121°C pendant 15 min.

Annexe II

Echelles d'interprétation des paramètres bio-physico-chimiques du sol

Tableau 01. Grille d'appréciation de la salinité en fonction de la conductivité électrique de l'extrait 1/5 (AFNOR, 1999)

CE (dS/m) à 25° C	Classe du sol
< 0.6	Sols non salé
0.6 < CE < 2	Sol peu salé
2 < CE < 2.4	Sols salé
2.4 < CE < 6	Sol très salé
CE > 6	Sol extrêmement salé

Tableau 02. Grille d'évaluation des valeurs du pH extrait 1/5 (AUBERT, 1978)

pH	Classe du sol
> 9	Sols très alcalins
8,5 < pH < 9	Sols fortement alcalins
7,9 < pH	Sols moyennement alcalins
7,4 < pH < 7,8	Sols légèrement alcalins
6,6 < pH < 7,3	Sols très légèrement acides
6,4 < pH < 6,5	Sols légèrement acides
5,6 < pH < 6	Sols moyennement acides

Tableau 03. Appréciation de la teneur en matière organique (AUBERT, 1978)

Matière organique	Classe du sol
Inférieur à 1	Sol pauvre en MO
1 à 2 %	Sol moyennement riche en MO
2 à 3 %	Sol riche en MO
Supérieur à 3 %	Sol très riche en MO

Tableau 04. Classe des sols gypseux (BARZANJI, 1973)

Gypse (%)	Classe du sol
<0.3	Non gypseux
0.3 à 10	Légèrement gypseux
10 à 15	Modérément gypseux
15 à 25	Extrêmement gypseux

Tableau 05. Grille d'appréciation des taux de calcaire totale dans le sol (BAIZE, 2000)

CaCO₃ total	Classe du sol
CaCO ₃ < 1	Horizon non calcaire
1 < CaCO ₃ < 25	Horizon peu calcaire
25 < CaCO ₃ < 50	Horizon modérément calcaire
50 < CaCO ₃ < 80	Horizon fortement calcaire
80 < CaCO ₃	Horizon excessivement calcaire

Résumé

Dans un contexte de désertification croissante et de raréfaction des ressources biologiques en milieux arides, cette étude propose une contribution à l'évaluation quantitative des micro-organismes colonisant les croûtes biologiques des sols gypseux. Deux stations ont été choisies pour l'échantillonnage : la station 01 M'rara (El M'Ghair) et la station 02 Hassi El Khfif (Ouargla). Les échantillons de sol ont été soumis à des analyses microbiologiques et physico-chimiques selon des protocoles internationalement reconnus et standardisés. Les résultats physico-chimiques ont révélé une texture sableuse, une faible humidité, une teneur notable en gypse, ainsi qu'une pauvreté marquée en matière organique. Le couvert végétal, très clairsemé voire inexistant, reflète les conditions climatiques extrêmes de ces zones. Les analyses microbiologiques ont mis en évidence une diversité microbienne malgré la rudesse de l'environnement. Les communautés bactériennes se sont avérées prédominantes, suivies par les champignons. Une variabilité significative de la densité microbienne a été observée entre les stations, avec un maximum enregistré à M'rara (El M'Ghair). Toutefois, la croissance des croûtes biologiques dans cette région demeure limitée en raison de facteurs abiotiques (aridité) et biotiques (rareté du couvert végétal, faible teneur en matière organique). Ces résultats mettent en lumière la capacité des micro-organismes édaphiques à résister dans les environnements désertiques, et soulignent la nécessité d'approfondir les recherches sur le rôle écologique des croûtes biologiques dans les sols arides.

Mots clés : Croûtes biologiques, milieu aride, microorganisme du sol, Ouargla, El M'Ghair, Algérie.

Physico-chemical and Microbiological Characterization of Selected Biological Soil Crusts: Case of the Hassi El Khfif (Ouargla) and M'rara (El M'Ghair) Stations

Abstract

In the context of increasing desertification and the scarcity of biological resources in arid environments, this study offers a contribution to the quantitative assessment of microorganisms colonizing the biological soil crusts of gypseous soils. Two sampling stations were selected: Station 01 M'rara (El M'Ghair) and Station 02 Hassi El Khfif (Ouargla). Soil samples were subjected to microbiological and physico-chemical analyses using internationally recognized and standardized protocols. The physico-chemical results revealed a sandy texture, low moisture content, a significant amount of gypsum, and a marked deficiency in organic matter. The sparse or absent vegetation cover reflects the extreme climatic conditions of these areas. Microbiological analyses revealed microbial diversity despite the harsh environment. Bacterial communities were predominant, followed by fungi. A significant variation in microbial density was observed between the stations, with the highest concentration recorded at M'rara (El M'Ghair). However, the development of biological soil crusts in this region remains limited due to abiotic factors (aridity) and biotic factors (scarce vegetation cover, low organic matter content). These findings highlight the resilience of soil microorganisms in desert environments and emphasize the need for further research into the ecological role of biological soil crusts in arid soils.

Keywords: Biological crusts, arid environments, soil microorganisms, Ouargla, El M'Ghair, Algeria

التوصيف الفيزيوكيميائي والميكروبيولوجي لبعض القشور البيولوجية: حالة محطة حاسي الخفيف (ورقلة) ومحطة مرارة (المغیر)

ملخص

في ظل تزايد ظاهرة التصحر وتناقص الموارد البيولوجية في المناطق الجافة، تهدف هذه الدراسة إلى الإسهام في التقييم الكمي للكائنات الحية الدقيقة التي تحتل القشور البيولوجية لتراب الجبس. تم اختيار محطتين لأخذ العينات: المحطة 01 مرارة (المغیر)، والمحطة 02 حاسي الخفيف (ورقلة). خضعت عينات التربة لتحاليل ميكروبيولوجية وفيزيوكيميائية وفق بروتوكولات معترف بها ومعتمدة دوليًا. أظهرت النتائج الفيزيوكيميائية نسبة منخفضة، رطوبة منخفضة، نسبة ملحوظة من الجبس، وفقراً شديداً في المادة العضوية. كما أن الغطاء النباتي كان متناثراً جداً أو منعدماً، مما يعكس الظروف المناخية القاسية التي تميز هذه المناطق. رغم قسوة البيئة، كشفت التحاليل الميكروبيولوجية عن وجود تنوع ميكروبي ملحوظ. وقد تبين أن المجتمعات البكتيرية هي السائدة، تليها الفطريات. كما لوحظ تباين كبير في الكثافة الميكروبية بين المحطتين، حيث سجلت أعلى كثافة في محطة مرارة (المغیر). ومع ذلك، فإن تطور القشور البيولوجية في هذه المناطق يبقى محدوداً نتيجة لعوامل لأحيائية (كالجفاف) وأحيائية (قلة الغطاء النباتي وانخفاض محتوى المادة العضوية). تبرز هذه النتائج قدرة الكائنات الحية الدقيقة في التربة على الصمود في البيئات الصحراوية، وتؤكد على ضرورة تعميق البحث حول الدور البيئي الذي تلعبه القشور البيولوجية في الترب الجافة.

الكلمات المفتاحية: القشور البيولوجية، المناطق الجافة، الكائنات الحية الدقيقة في التربة، ورقلة، المغیر، الجزائر.