



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ KASDI MERBAH – OUARGLA
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département : Sciences Agronomiques

Mémoire de Fin d'Études
Master Académique

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Protection des ressources Eau - Sol - environnement

Présenté par :

Mlle ABABSIA Malak

Thème :

Caractérisation de la biomasse microbienne des croûtes
biologiques des sols sous culture

Soutenu publiquement le : 16/08/2026

Devant le jury :

Qualité	Nom et Prénom	Grade	Établissement
Président	OUSTANI Mabrouka	MCA	UKM Ouargla
Examinatrice	BOUDERHEM Amel	MCB	UKM Ouargla
Encadrant	KARABI Mokhtar	MCA	UKM Ouargla
Co- Encadrant	HAMDI AISSA Baelhadj	Professeur	UKM Ouargla

Année Universitaire: 2025/2026

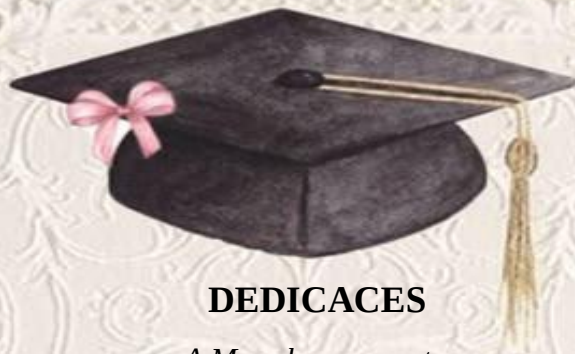


REMERCIEMENTS

Avant tout je remercie "Allah" tout puissant qui m'a donné le courage, la volonté et la force pour accomplir ce travail. Merci de m'avoir éclairé le chemin de la réussite. En préambule à ce mémoire, je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Je tiens à remercier chaleureusement M. KARABI Mokhtar, en tant qu'encadrant de mémoire, trésor de savoir et d'expérience, pour son grand soutien au travail. Je tiens à exprimer notre profonde gratitude à mon co-encadrant Mr HAMDY AISSA Baelhadj pour son aide et ses conseils judicieux afin de m'amener jusqu'au bout de ce mémoire. Mes vifs remerciements à Mme OUSTANI Mabrouka, Maître de conférences classe A d'avoir accepté de présider ce jury. Je remercie infiniment Mme BOUDERHEM Amel Maître-de Conférences classe B à l'Université de Ouargla, de me faire l'honneur d'examiner ce travail et d'avoir accepté de faire partie de notre jury.

Mes remerciements iront à toute la famille et surtout mes parents et Je remercie également tous les ami(e) s, et toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin, d'une manière ou d'une autre dans la réalisation de ce travail



DEDICACES

A Mes chers parents

*Sans vous, je ne serais pas ce que je suis et que toute ma réussite dans
La vie et dans mes études dépendra de ce que vous m'avez donné
Acceptez ce travail comme un témoignage de ma profonde Sympathie.*

Que Dieu vous accorde la santé et la vie.

A Mes chère frangines

Nesrine et yousra

A Mon chère frangin

GUENDAFI Tarek

*. Que Dieu puisse me permettre de vous
récompenser.*

A tous la famille ABABSIA

*A tous mes amies parmi lesquels j'ai le plaisir de citer : Fatima, Aicha,
Soumia,*

.....

A tous ceux qui m'aiment.

A tous ceux que j'aime.

Je dédie ce travail

Liste des abréviations

EPS	Exo-polysaccharides
BMS	Biomasse microbienne du sol
CMA	Champignons mycorhiziens à arbuscules
PGPR	<i>Plant Growth-Promoting Rhizobacteria</i>
AIA	Acide indole-acétique
PDAU	Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme
CRAPC	Plateau Technique d'Analyse Physico-Chimique
AFNOR	Association Française de Normalisation
COT	Carbone organique totale
COD	Carbone organique dissous
UFC	Unité formant colonie
ISO	Organisation internationale de normalisation
NTD	Azote total dissous
IUSS	Union internationale des sciences du sol
WRB	Base de référence mondiale pour les ressources en sols
FAO	Organisation pour l'alimentation et l'agriculture
ITPS	Intégrateur de système général de technologies de l'information

Liste des tableaux

N°	Tableau	
01	Spécificités des milieux de culture et conditions d'incubation	35
02	Résultats des analyses physico-chimiques du sol	37
03	Résultats des analyses microbiologiques du sol	42
04	Résultats de la biomasse microbienne ($C_{\text{microbien}}$ et $N_{\text{microbien}}$) du sol <i>sous</i> les différents systèmes de culture étudiés	48

Liste des figures

N°	Figure	
01	Définition de la croûte biologique du sol basée sur une approche par arbre de décision	04
02	Schéma fonctionnel d'une croûte biologique du sol avec des colonisateurs typiques	08
03	Estimation de la couverture mondiale des croûtes biologiques	08
04	Localisation géographique des différents types de croûtes biologiques du sol (croûtes biologiques) dans le Sahara septentrional algérien	09
05	Effets bénéfiques potentiels des croûtes biologiques	12
06	Localisation géographique des régions d'étude	22
07	Méthodologie de travail	23
08	Localisation géographique de station d'étude de Ouargla	24
09	Localisation géographique de station d'étude de Guerrara	25
10	Protocole d'échantillonnage sur terrain	26
11	Densité des bactéries dans les deux sols.	42
12	Les différentes formes de colonies obtenues d'une culture des bactéries sur milieu solide (a :sol de Ouargla, b :sol de Guerrara)	43
13	Densité des champignons dans les deux sols.	43
14	Les différentes formes de colonies de la microflore fongique, développées sur milieu solide Sabouraud (a :sol de Ouargla, b :sol de Guerrara)	44
15	Densité des actinomycètes dans les deux sols.	44
16	Colonie obtenue d'une culture d'Actinomycètes sur milieu solide (a :sol de Ouargla, b :sol de Guerrara)	45
17	Densité des <i>azotobacter</i> dans les deux sols.	45
18	Colonie obtenue d'une culture d' <i>Azotobacter</i> sur milieu solide (a :sol de Ouargla, b :sol de Guerrara)	46
19	Densité des cyanobactéries bg 11 dans les deux sols.	46
20	Densité des cyanobactéries bg 110 dans les deux sols étudiés	47
21	Aspect macroscopique des cyanobactéries sur milieu solide (a :sol de Ouargla, b :sol de Guerrara)	48
22	Aspect microscopique des cyanobactéries sur milieu solide (a :sol de Ouargla, b :sol de Guerrara)	48

Liste des Photos

N°	Photo	
01	Etat de surface du site 1 (Palmeraie)	27
02	Etat de surface du site 2 (Pivot)	28
03	Etat de surface du site 3 (Serre)	28
04	Etat de surface du site 4 (Palmeraie)	28

Table des matières

Remerciements

Dédicaces

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des photos

Introduction

01

Partie I. Synthèse bibliographique

Chapitre I. Croûtes biologiques des sols

04

1. Définition

04

2. Formation des croûtes biologiques

05

3. Composition des croûtes biologiques

07

4. Distribution des croûtes biologiques

08

5. Rôles des croûtes biologiques

09

6. Facteurs influençant leur développement

12

Chapitre II. Biomasse microbienne du sol

15

Définition de la biomasse microbienne

15

Importance dans les agrosystèmes

17

Paramètres influençant l'activité microbienne

18

Relation entre croûtes biologiques et activité biologique (microbienne)

19

Partie II. Matériel Et Méthodes

1. Localisation géographique des régions d'étude

21

2. Approche méthodologique

23

3. Choix des stations

24

4. Description des sites d'étude

27

5. Prélèvement des échantillons de croûtes biologiques et du sol associé

30

A. Prélèvements pour les analyses physicochimiques

30

B. Prélèvements pour les analyses microbiologiques

31

6. Méthodes d'analyse

31

6.1. Analyse physicochimique du sol

31

6.1.1. Conductivité électrique (CE)

31

6.1.2. Réaction du sol (pH)

32

6.2. Analyse physique du sol

32

6.2.1. Granulométrie

32

6.2.2. Humidité

32

6.3. Analyses chimiques du sol

32

6.3.1. Dosage du calcaire total

32

6.3.2. Dosage du carbone organique et estimation de la matière organique

33

6.4. Analyses biochimiques

33

6.4.1. Détermination de la teneur en chlorophylle

33

6.5. Analyses microbiologiques

34

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

34

A. Préparation de la suspension-mère et de la gamme de dilutions décimales

34

B. Spécificités des milieux de culture et conditions d'incubation

34

C. Lecture des résultats et formulation mathématique

35

6.5.2. Détermination de la biomasse microbienne par la méthode de fumigation extraction	36
--	----

Partie III. Résultats et discussion

1. Caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés	37
2. Caractéristiques biochimiques	40
3. Caractéristiques microbiologiques des sols étudiés	42
3.1. Bactéries totales	42
3.2. Champignons	43
3.3. Actinobactéries	44
3.4. Azotobacter	45
3.5. Cyanobactéries	46
3.6. Caractéristiques de la biomasse microbienne des sols étudiés	48
Conclusion	52
Références bibliographiques	55
Annexes	58
Résumé	62

Introduction

Introduction

Les zones arides et semi-arides, qui englobent la majeure partie du Sahara algérien, représentent des environnements terrestres soumis à des contraintes physiques extrêmes et couvrent désormais plus de 41 % de la surface continentale du globe (Mirzabaev et al., 2022). Ces milieux se caractérisent structurellement par une instabilité climatique chronique, des températures de surface très élevées, une évapotranspiration intense et une pénurie sévère en matières organiques labiles (Sorensen et al., 2023 ; Xiao et al., 2026). Dans ce contexte restrictif, la dégradation des terres et la désertification menacent l'équilibre fragile des agrosystèmes oasiens, rendant urgente l'exploration de leviers écologiques locaux pour restaurer la fertilité et la fonctionnalité biologique de ces sols cultivés (Prăvălie et al., 2021). À la surface immédiate de ces sols désertiques, les espaces interstitiels non occupés par la végétation supérieure sont colonisés par des communautés d'organismes poïkilohydrés formant des assemblages complexes appelés croûtes biologiques du sol ou croûtes biologiques (Weber et al., 2022). Ces croûtes biologiques, principalement initiées par des micro-organismes pionniers comme les cyanobactéries, agissent comme de véritables « peaux vivantes » régulatrices des cycles biogéochimiques. L'importance de ces structures repose en grande partie sur leur biomasse microbienne active, qui constitue le compartiment le plus dynamique de la matière organique et le moteur invisible de la fertilité oasienne (Baumann et al., 2021 ; Young et al., 2025).

Sous l'influence des pratiques de culture (agrosystèmes), la biomasse microbienne des croûtes biologiques remplit des fonctions agronomiques interdépendantes majeures. Premièrement, par la sécrétion d'exo-polysaccharides (EPS) et le développement de réseaux filamenteux, elle assure la stabilisation mécanique des agrégats de surface, augmentant la résistance du sol à l'érosion éolienne et optimisant la rétention de l'eau d'irrigation (Chamizo

et al., 2022). Deuxièmement, ce réservoir microbien régule la biodisponibilité des nutriments en sécrétant des enzymes telles que les phosphatases, capables de solubiliser le phosphore bloqué par le pH alcalin des sols sahariens, et en stimulant la minéralisation de l'azote indispensable aux cultures (Baumann et al., 2021). Troisièmement, cette biomasse induit un effet protecteur de « tampon osmotique » qui aide la microflore et les racines à tolérer la pression saline provoquée par le Na Cl, un paramètre omniprésent dans les zones cultivées du Sud algérien (Hui et al., 2025 ; Messaoudi, 2024).

Malgré cet intérêt agronomique capital, les dynamiques fonctionnelles et la caractérisation quantitative de la biomasse microbienne des croûtes biologiques au sein des sols cultivés du Nord de l'Afrique, et plus particulièrement dans le Sahara algérien, restent encore très peu explorées. Si l'on recense quelques rares investigations menées sur la microflore des sols arides en Algérie (Mehda et al., 2021 ; Barka et Rachedi, 2022 ; Benabdallah, 2024), la majorité des données internationales sur les interactions entre cultures et croûtes biologiques proviennent d'autres déserts mondiaux comme ceux d'Asie ou d'Amérique (Xiao et al., 2026 ; Hui et al., 2025). Cela met en exergue un manque de connaissances évident concernant l'impact des perturbations culturelles et de la salinité sur la taille et l'activité de cette biomasse microbienne en milieu saharien algérien.

C'est dans ce cadre scientifique que s'inscrit notre travail, dédié à la caractérisation de la biomasse microbienne des croûtes biologiques du sol sous culture. L'objectif principal de cette étude est de quantifier ce compartiment microbien vivant à l'aide de méthodes biochimiques (telles que la fumigation-extraction), physicochimique et microbiologique, et de préciser le rôle de la croûtes biologiques comme bioindicateur de la santé des sols au sein des agrosystèmes de la région de Ouargla. Cette caractérisation constitue un préalable fondamental pour valoriser le potentiel des micro-organismes indigènes dans les futurs

programmes d'agriculture durable et de réhabilitation des terres arides.

Ce manuscrit est structuré en trois grandes parties :

- **La première partie** présente une synthèse bibliographique approfondie scindée en deux chapitres, le premier détaillant la biologie et l'écologie des croûtes biologiques du sol (croûtes biologiques), et le second s'intéressant aux concepts et rôles de la biomasse microbienne dans les agrosystèmes.
- **La deuxième partie** décrit le matériel et les méthodes expérimentales, comprenant la présentation de nos sites d'étude ainsi que l'explication détaillée des protocoles de laboratoire retenus pour les analyses physico-chimiques et microbiologiques.
- **La troisième partie** est entièrement consacrée à l'exposition, l'analyse critique et la discussion des résultats obtenus au cours de notre expérimentation.

Enfin, une conclusion mettra en relief les principaux enseignements de cette étude et proposera des perspectives d'application agronomique pour la préservation des sols sahariens.

Partie I

Synthèse bibliographique

Chapitre I. Croûtes biologiques des sols

1. Définition des croûtes biologiques des sols

Les croûtes biologiques du sol (communément appelées croûtes biologiques) désignent des assemblages hautement intégrés vivant à l'interface sol-atmosphère. Elles sont constituées d'organismes microscopiques (cyanobactéries, algues, bactéries, micro-champignons) et macroscopiques (lichens, bryophytes/mousses) (Figure 01), intimement liés aux particules minérales du sol par leurs structures morphologiques (rhizoïdes) ou par des sécrétions biochimiques (Belnap et al., 2001 ; Weber et al., 2022). Contrairement aux plantes vasculaires, ces communautés sont poïkilohydriques : elles entrent en état d'anhydrobiose (dormance) lors des périodes de dessiccation extrême et reprennent instantanément leur activité métabolique (photosynthèse, fixation d'azote) dès la moindre pluie ou rosée (Belnap, 2006 ; Mehda et al., 2021). En Algérie, elles représentent un élément structurel majeur des sols des zones arides et semi-arides, souvent appelées localement "le tapis du désert" (Kaboul, 2015).

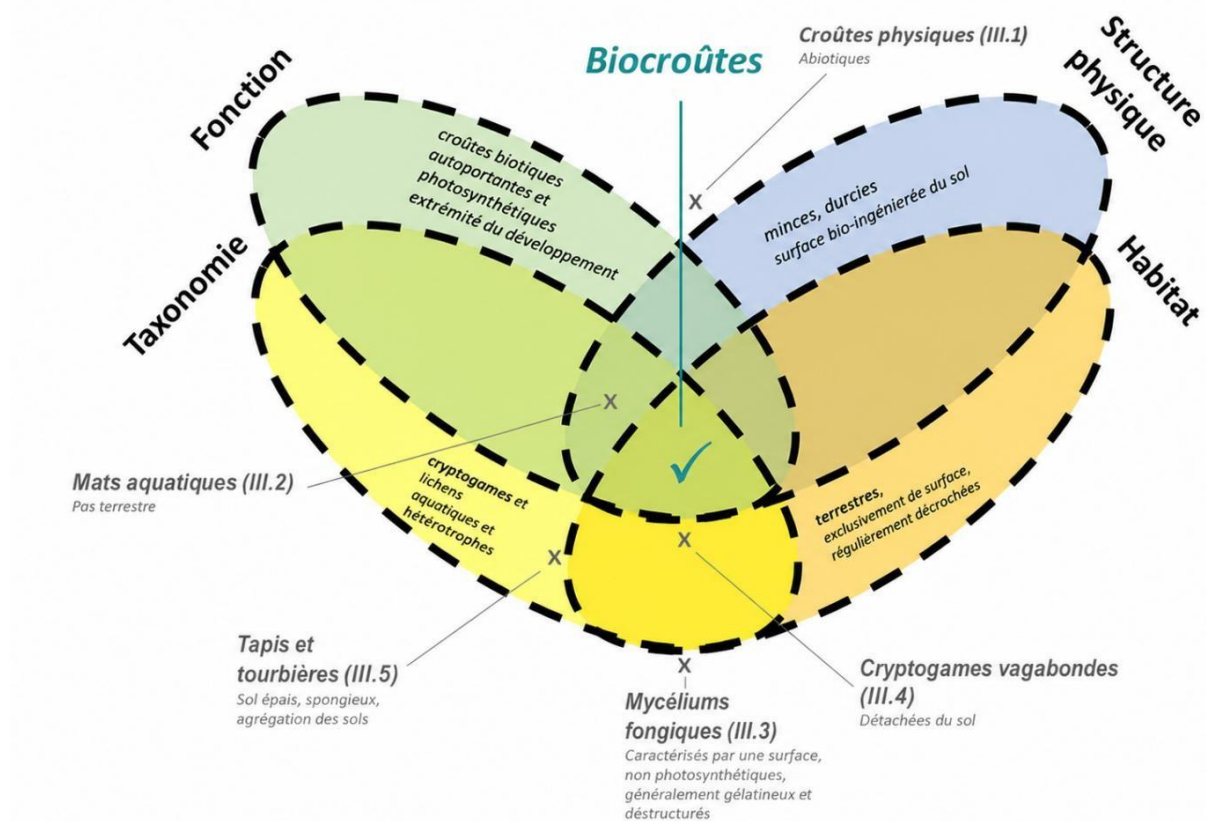


Figure 1. Définition de la croûte biologique du sol basée sur une approche par arbre de décision (Weber et al., 2022).

2. Formation des croûtes biologiques

La formation des croûtes biologiques du sol n'est pas un phénomène statique, mais un processus dynamique de succession écologique primaire ou secondaire rigoureusement ordonné. En milieu aride et saharien, ce processus permet la transition d'un substrat minéral nu, instable et stérile (sable vif, sédiment d'oued, sol gypseux lessivé) vers un horizon de surface stabilisé, structuré et biologiquement actif (Belnap, 2003 ; Rodriguez-Caballero et al., 2022).

Ce développement s'articule autour de trois phases éco-physiologiques successives, caractérisées par un remplacement graduel des groupes fonctionnels d'organismes :

Phase 1 : La colonisation pionnière et l'ancrage mécanique (Croûtes cyanobactériennes claires)

Sur un sol nu, les premiers organismes capables de surmonter l'instabilité du substrat et l'absence de nutriments sont des micro-organismes procaryotes photoautotrophes, principalement des cyanobactéries filamenteuses motiles de grande taille appartenant à l'ordre des Oscillatoriales (genres *Microcoleus*, notamment *M. vaginatus* et *M. steenstrupii*, *Phormidium*, et *Lyngbya*) (García-Pichel, 2023).

Le mécanisme d'action de ces pionniers repose sur deux processus couplés :

- L'entrelacement mécanique : Lors des périodes d'humidification (faibles pluies, rosée nocturne), ces cyanobactéries s'activent et migrent par glissement entre les pores du sol, créant un réseau tridimensionnel de filaments qui enserre physiquement les grains de quartz ou de gypse.
- La cimentation biochimique : En se déplaçant, elles sécrètent d'importantes quantités de Substances Polymériques Extracellulaires (EPS), une matrice visqueuse composée de polysaccharides complexes, de lipides et de glycoprotéines. Lors des phases de dessiccation, cette matrice d'EPS se déshydrate, se contracte et durcit, agissant comme un ciment biologique permanent qui colle les particules minérales entre elles (Kidron et Drahorad, 2022).

À ce stade, la croûte est dite claire ou immature ; elle est presque invisible à l'œil nu à l'état sec, mais stabilise déjà le sol contre l'érosion éolienne de surface.

Phase 2 : La consolidation nutritionnelle et la photoprotection (Croûtes cyanobactériennes sombres)

Une fois la micro-topographie superficielle fixée et l'érosion ralentie par la matrice d'EPS, une seconde vague de micro-organismes s'installe. Il s'agit de cyanobactéries secondaires à hétérocystes (genres *Nostoc commune*, *Scytonema*, *Tolypothrix*, *Calothrix*) et de premières algues vertes eucaryotes microphytiques (Mehda et al., 2021).

Cette phase introduit deux innovations fonctionnelles majeures :

- La fixation de l'azote (N_2) : Contrairement à *Microcoleus*, les genres comme *Nostoc* possèdent des hétérocystes capables de fixer l'azote atmosphérique gazeux pour le transformer en ammonium (NH_4^+), initiant ainsi le cycle de l'azote dans un sol originellement stérile.
- La synthèse de pigments de protection (Mélanisation) : Pour survivre à l'indice UV extrême des milieux désertiques (comme le Sahara algérien), ces organismes synthétisent de fortes concentrations de scytonémine (un pigment jaune-brun stable logé dans les gaines extracellulaires qui absorbe efficacement les radiations UV-A et UV-C) et de métabolites secondaires de type mycosporine. Cette accumulation de pigments confère à la croûte une coloration caractéristique gris foncé à noire, d'où le terme de croûtes sombres (Benaziza et al., 2023).

L'apport continu de débris cellulaires et d'exsudats enrichit le sol en matière organique labile.

Phase 3 : Climax biologique (Croûtes matures à Lichens et Mousses)

L'altération biogéochimique des minéraux de surface, l'augmentation du taux d'azote et l'amélioration de la capacité de rétention en eau du sol pavent la voie à l'établissement des organismes eucaryotes macroscopiques : les lichens biocrustaux (stade intermédiaire) puis les bryophytes/mousses (stade climacique) (Weber et al., 2022).

- Les Lichens : Les formes crustacées et squamuleuses (ex : *Collema*, *Placidium*, *Fulgensia*) développent des structures d'ancrage (rhizines) qui s'insèrent profondément entre les agrégats. Certains lichens abritent des cyanobactéries (cyanolichens), démultipliant la capacité de fixation de l'azote.

- Les Mousses : Les mousses acrocarpes (ex: *Syntrichia caninervis*, *Bryum argenteum*), très fréquentes dans les zones moins perturbées, forment de véritables micro-tapis. Leurs rhizoïdes stabilisent le sol sur plusieurs centimètres de profondeur. De plus, leur structure morphologique aérienne piège activement les poussières atmosphériques fertiles (limons, argiles) apportées par le vent, augmentant la richesse texturale du sol (Gufwan et al., 2025).

3. Composition des croûtes biologiques

La structure biologique d'une croûte biologique varie selon son stade de maturité, répartie en trois grands groupes écologiques (Belnap et Lange, 2003 ; Rodriguez-Caballero et al., 2018) (Figure 02) :

- Cyanobactéries et Algues (Croûtes claires/immatures) :

Dominées par les genres *Microcoleus*, *Nostoc*, *Tolypothrix*. Elles prédominent dans les zones hyper-arides d'Algérie comme la cuvette de Ouargla (Bazzine et Hamdi Aissa, 2014).

- Lichens (Croûtes sombres) :

Symbiose entre champignons (mycobiontes) et algues/cyanobactéries (photobiontes). Ils augmentent drastiquement la rugosité micro-topographique du sol.

- Mousses / Bryophytes (Croûtes matures) :

Présentes dans les micro-habitats plus humides (sous l'ombre des buissons ou dans les lits d'oueds steppiques).

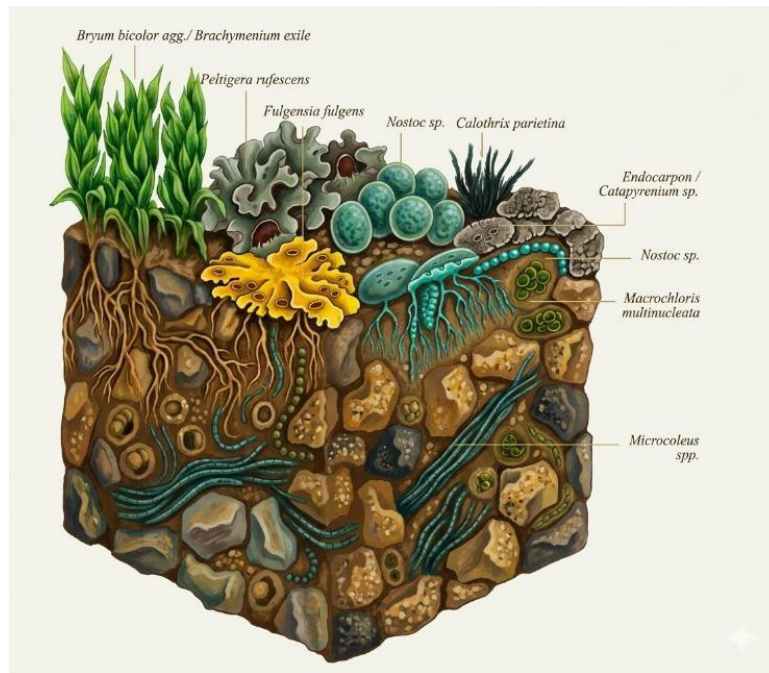


Figure 2. Schéma fonctionnel d'une croûte biologique du sol avec des colonisateurs typiques (Belnap et Lange, 2013).

4. Distribution des croûtes biologiques

À l'échelle mondiale, les croûtes biologiques couvrent environ 12 % de la surface terrestre globale. Elles représentent la matrice dominante des zones arides (*drylands*), qui occupent 41 % de la planète (Maestre et *al.*, 2022) (Figure 03).

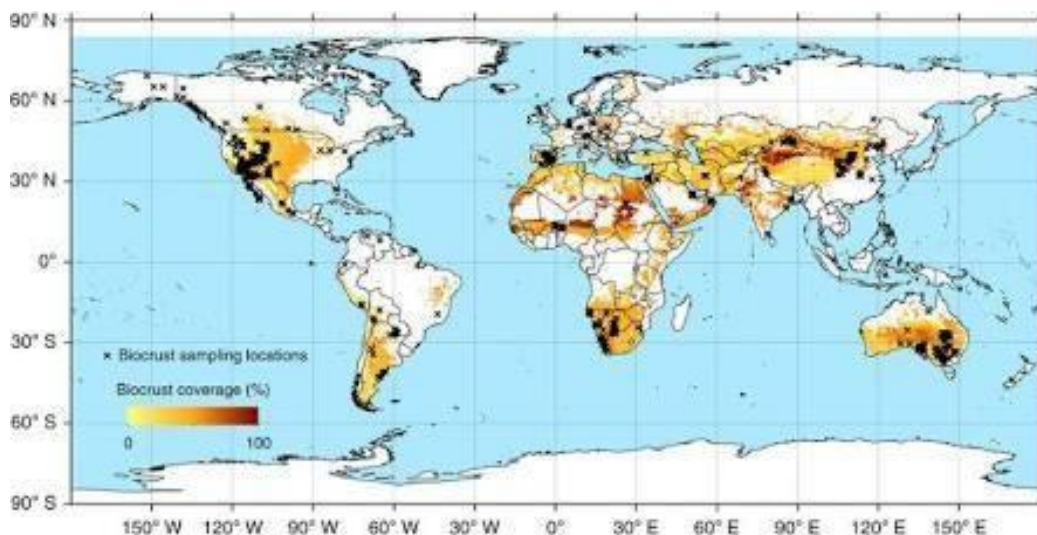


Figure 3. Estimation de la couverture mondiale des croûtes biologiques (Rodríguez-Caballero et *al.*, 2018).

À l'échelle algérienne, leur répartition suit un gradient d'aridité :

- Dans les Hauts Plateaux Steppiques (Sétif, Tiaret, Tébessa) : Dominance de croûtes matures à lichens et mousses cohabitant avec *Stipa tenacissima* (alfa).
- Dans le Sahara Septentrional (Ouargla, El Oued, Ghardaïa) : Dominance marquée de croûtes cyanobactériennes claires à sombres s'étendant dans les espaces inter-végétaux des plaines de reg et des chotts salés (Mehda et al., 2021).

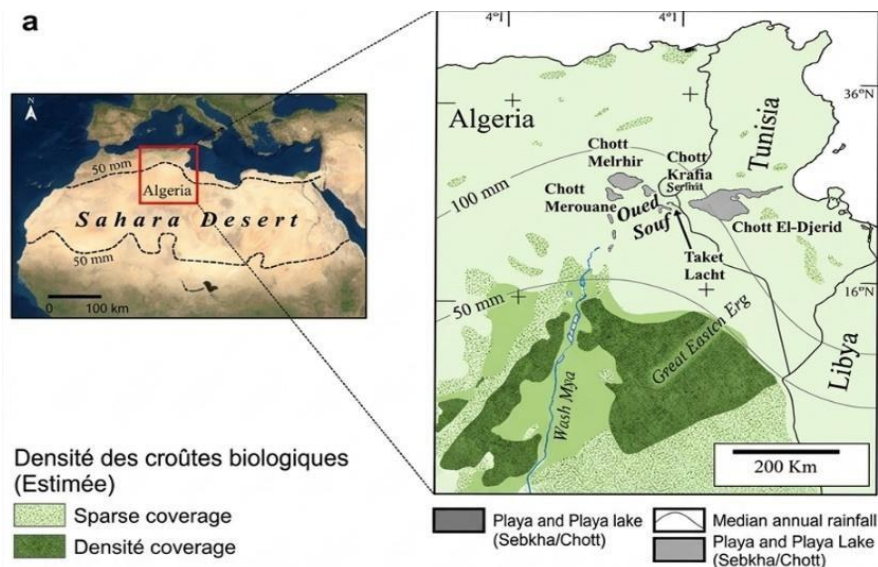


Figure 4. Localisation géographique des différents types de croûtes biologiques du sol (biocrusts) dans le Sahara septentrional algérien (Benhamou et al., 2024).

5. Rôles des croûtes biologiques

Les croûtes biologiques du sol agissent comme des "ingénieurs des écosystèmes" majeurs dans les milieux arides. Par leurs activités métaboliques et leur interaction avec la matrice minérale, elles assurent soutiennent la fertilité et la résilience des sols sahariens (Belnap et Lange, 2003 ; Chamizo et al., 2022) (Figure 5).

- **Stabilisation mécanique et lutte contre l'érosion éolienne :** C'est le rôle primaire des biocrusts. L'enchevêtrement tridimensionnel des filaments de cyanobactéries (ex :

Microcoleus vaginatus) combiné à la sécrétion de substances polymériques extracellulaires (EPS) cimente les grains de sable superficiels. Cette cohésion augmente le seuil de friction du vent, empêchant la déflation éolienne et stabilisant les sols sableux sensibles à la désertification (Kidron et Drahorad, 2022).

- **Protection contre l'érosion hydrique** : Lors des rares mais violents épisodes pluvieux, la croûte biologique dissipe l'énergie cinétique des gouttes de pluie (effet *splash*). En consolidant l'horizon de surface, elle limite le détachement des particules sédimentaires et prévient la formation de ravines, réduisant ainsi les pertes en terre par ruissellement érosif (Chamizo et al., 2022).
- **Régulation de l'infiltration et du ruissellement** : L'impact des croûtes biologiques sur l'hydrologie dépend de leur rugosité et de leur nature. Les croûtes matures à lichens et mousses créent une micro-topographie rugueuse qui ralentit l'eau, augmentant le temps de contact et favorisant l'infiltration. À l'inverse, le gonflement des EPS des cyanobactéries peut générer un micro-ruissellement localisé, redistribuant l'eau vers les zones de bas-fond et les racines des plantes vasculaires (Rodriguez-Caballero et al., 2022).
- **Modération de l'évaporation et maintien de l'humidité** : En agissant comme une barrière physique ou "paillage biologique" à l'interface sol-atmosphère, la croûte biologique modifie la porosité de surface. Les EPS hydrophiles retiennent l'eau au sein de la matrice crustale, limitant les pertes hydriques par évaporation directe induite par l'insolation intense du désert (Hui et al., 2022).
- **Fixation du carbone atmosphérique (Puits de carbone)** : Grâce à la présence d'organismes photosynthétiques (cyanobactéries, algues vertes, lichens, mousses), les biocrusts fixent le dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique. Ce processus enrichit les sols arides, naturellement pauvres, en matière organique carbonée fraîche, initiant ainsi les premiers maillons de la chaîne trophique souterraine (Miralles et al., 2020).
- **Fixation de l'azote atmosphérique (N₂)** : En zone aride, l'azote est le principal facteur limitant de la production végétale. Les cyanobactéries hétérocystées (ex : *Nostoc* sp., *Scytonema* sp.) possèdent l'enzyme nitrogénase capable de réduire l'azote

gazeux (N_2) en ammonium (NH_4^+) directement assimilable. Cet azote est ensuite relargué dans la rhizosphère, fertilisant naturellement le sol au profit des plantes vasculaires voisines (Mehda et al., 2021).

- **Amélioration de la biodisponibilité des nutriments (P et métaux) :** Les micro-organismes des croûtes biologiques sécrètent des acides organiques et des chélatants (siférophores) qui acidifient localement le micro-environnement. Ce processus permet de solubiliser le phosphore bloqué sous forme de phosphates de calcium (très fréquent dans les sols alcalins de Ouargla) et de libérer des oligo-éléments essentiels comme le fer (Fe) ou le zinc (Zn) (Asensio et al., 2023).
- **Stimulation de la biologie du sol (Effet biostimulant) :** La croûte biologique constitue un "hotspot" de biodiversité microbienne. La matière organique et les exopolysaccharides qu'elle produit servent de substrat nutritionnel pour les bactéries hétérotrophes et les champignons telluriques. Elle stimule l'activité enzymatique globale du sol (déshydrogénases, phosphatases), augmentant ainsi la biomasse microbiologique totale (Slimani, 2022).
- **Atténuation des stress abiotiques (Salinité et Gypse) :** Dans le contexte des sols cultivées halomorphes de la cuvette de Ouargla, les croûtes biologiques jouent un rôle d'amendement biologique. Les EPS hautement chargés négativement sont capables de séquestrer les ions toxiques comme le sodium (Na^+), limitant leur absorption par les racines des cultures. De plus, leur présence maintient une stabilité structurale face à la dispersion des argiles causée par le sel (Bazzine et Hamdi Aissa, 2014 ; Mehda et al., 2021).

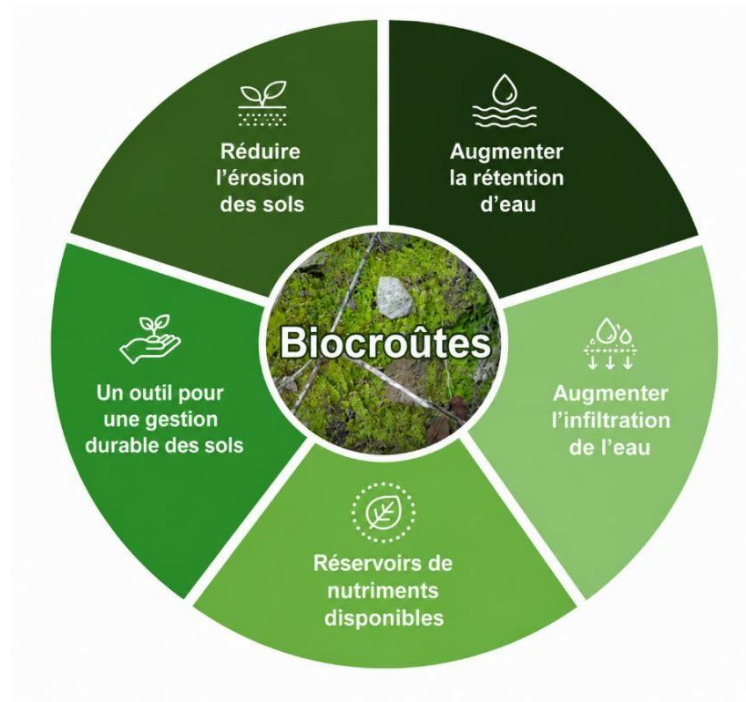


Figure 5. Effets bénéfiques potentiels des croûtes biologiques (Dartsch et al., 2022)

6. Facteurs influençant leur développement

Le développement, la composition taxonomique et la pérennité des croûtes biologiques du sol sont régis par des forçages abiotiques et des pressions anthropiques imbriqués. Ces facteurs agissent comme des filtres écologiques successifs déterminant la trajectoire de la succession écologique du sol (Belnap et Lange, 2003).

➤ Facteurs climatiques

Le climat des zones arides constitue le premier niveau de filtrage de la biodiversité au sein des biocrusts :

- Régime hydrique et poïkilohydrie** : Les organismes des croûtes biologiques étant poïkilohydres, leur métabolisme dépend strictement de l'humidité superficielle. En zone hyper-aride, au-delà des rares pluies, les condensations occultes (rosée nocturne et brouillard) jouent un rôle vital. Ces micro-apports quotidiens permettent de réactiver la photosynthèse des cyanobactéries pionnières dès les premières lueurs du jour, juste avant que l'évaporation intense ne les replonge en état de cryptobiose (Hui et al., 2022).

- b) **Stress thermique et rayonnement ultraviolet (UV) :** Les températures extrêmes de surface (dépassant 60°C en été à Ouargla) provoquent de sévères stress oxydatifs. Comme l'a démontré (Belnap., 2003), l'élévation thermique globale induit un glissement taxonomique, réduisant la biomasse des mousses et des lichens au profit des cyanobactéries filamenteuses. Face à ce forçage couplé à une forte insolation, les communautés sahariennes ont développé des adaptations uniques : elles synthétisent des pigments photoprotecteurs hydrophobes, notamment la scytonémine (dans la gaine extracellulaire), qui absorbe les UV-A/B nocifs et confère aux croûtes leur teinte sombre caractéristique (Mehda et al., 2021).

➤ **Facteurs édaphiques**

La nature physico-chimique du substrat conditionne l'ancrage mécanique et la stabilité de la niche écologique :

a) **Granulométrie et stabilité mécanique**

Les textures sableuses-limoneuses stables offrent des conditions optimales. La fraction fine (limons) retient l'eau par capillarité, tandis que la fraction sableuse fournit une matrice tridimensionnelle idéale pour le tissage des filaments de cyanobactéries (ex: *Microcoleus* sp.). À l'inverse, les sables grossiers des dunes vives (*Ergs*) interdisent toute colonisation durable en raison de leur mobilité permanente sous l'action du vent (Rodriguez-Caballero et al., 2022).

b) **Chimie des sols (Salinité et Gypse)**

Dans le contexte pédologique de la cuvette de Ouargla, le développement des biocrusts est fortement modulé par l'halomorphie (NaCl) et la gypsification (CaSO₄, 2H₂O). Ces contraintes sélectionnent des communautés extrémophiles (halotolérantes à halophiles, et gypsophiles) spécifiques (Bazzine & Belhadj, 2014). Pour surmonter le stress osmotique qui tend à déshydrater les cellules, ces micro-organismes modifient la structure biochimique de leurs substances polymériques extracellulaires (EPS) pour piéger l'eau, permettant la fixation du sol là où les plantes vasculaires échouent (Mehda et al., 2021).

➤ **Facteurs anthropiques et perturbations mécaniques**

Les activités humaines rompent les dynamiques de succession naturelle et dégradent rapidement ces structures :

- a) **Surpâturage et le piétinement animal** : À l'état sec, la croûte biologique perd son élasticité et devient très friable. Le piétinement répété par le bétail (ovins et camélidés) rompt physiquement le réseau de filaments microbiens et fracture le thalle des lichens, détruisant la cohésion superficielle du sol (Eldridge et al., 2020).
- b) **Mécanisation agricole** : La circulation d'engins motorisés et le travail du sol (labour) désintègrent instantanément la structure rigide de la croûte et l'enterrent. Privé de cette protection biologique de surface, le sol subit une dégradation physique immédiate, caractérisée par une reprise agressive de l'érosion éolienne, une déflation des éléments fins fertiles et une vulnérabilité accrue à la désertification (Maestre et al., 2022).

Chapitre II . Biomasse microbienne du sol

1. Définition de la biomasse microbienne

La biomasse microbienne du sol (BMS) englobe la totalité de la masse de la matière vivante des micro-organismes (bactéries, champignons, archées, protozoaires) présents dans un volume de sol donné. Bien qu'elle ne constitue qu'une fraction infime (1 % à 4 % du carbone organique total du sol), elle représente la composante la plus dynamique, agissant comme le principal catalyseur des cycles biogéochimiques terrestres (Dacal et al., 2020). Les recherches récentes soulignent que dans les sols soumis à des stress extrêmes, comme ceux du Bas-Sahara (Ouargla), jusqu'à 90 % de la biomasse microbienne globale peut être en état de dormance (cryptobiose). La définition moderne sépare donc rigoureusement la biomasse microbienne totale de la biomasse métaboliquement active, qui est la seule à piloter immédiatement les flux de nutriments (Fierer et al., 2021 ; Slimani, 2022). Les sols des zones arides et hyper-arides ont longtemps été perçus comme des milieux biologiquement pauvres. Les recherches récentes démontrent au contraire qu'ils abritent une diversité microbienne remarquable, hautement spécialisée. Ces micro-organismes survivent grâce à des stratégies adaptatives poussées (sporulation, dormance, protection pigmentaire) et sont structuralement organisés en quatre grands phylums dominants (Fierer, 2017 ; Kadi et al., 2021).

➤ Actinobactéries

C'est le groupe bactérien non-photosynthétique le plus abondant et le plus caractéristique des écosystèmes désertiques.

Adaptation : Leur prédominance s'explique par leur morphologie filamenteuse et leur capacité à produire des spores de résistance (exospores) extrêmement tolérantes à la dessiccation prolongée et aux chocs thermiques.

Rôle : Ce sont les principaux agents de dégradation des composés organiques complexes (cellulose, chitine, lignine) dans les sols sahariens. Les genres comme *Streptomyces* ou *Micrococcus* jouent un rôle clé dans le recyclage de la matière organique oasienne et la production de molécules antimicrobiennes régulatrices (Reichel et al., 2020).

➤ **Cyanobactéries (Procaryotes photosynthétiques)**

Elles constituent la clé de voûte des croûtes biologiques du sol et représentent la première source de biomasse autotrophe dans les zones dépourvues de plantes vasculaires.

- Formes filamenteuses (ex : *Microcoleus* sp.) : Leurs trichomes s'enchevêtrent entre les grains de sable et sécrètent des exopolysaccharides (EPS). Ce réseau maintient l'humidité et stabilise mécaniquement le sol contre l'érosion éolienne à Ouargla (Kidron et Drahorad, 2022).
- Formes hétérocystées (ex : *Nostoc* sp., *Scytonema* sp.) : Elles possèdent des cellules spécialisées, les hétérocystes, qui protègent la nitrogénase de l'oxygène pour fixer l'azote atmosphérique (N₂), fertilisant ainsi biologiquement ces horizons hyper-arides (Mehda et al., 2021).

➤ **Proteobacteria et Bacteroidota**

Ces deux grands groupes de bactéries à Gram négatif sont fortement représentés, mais leur abondance est intimement liée à la disponibilité en eau et en carbone labile.

Dynamique : Contrairement aux Actinobactéries, ce sont des organismes dits copiotrophes (opportunistes), dont la population explose immédiatement après un apport d'eau (irrigation, pluie) ou de matière organique (amendements oasiens).

Rôle : Ils interviennent massivement dans les phases rapides de minéralisation de l'azote et du carbone facilement assimilables (Fierer et al., 2021).

➤ **Archées (Archaea) et champignons telluriques**

- Archées : Longtemps négligées, les archées (notamment le phylum des *Thaumarchaeota*) se révèlent être des acteurs majeurs des sols arides. Elles sont principalement impliquées dans le cycle de l'azote à travers l'oxydation de l'ammoniac (NH₄⁺) en nitrite (NO₂), première étape de la nitrification, même sous de faibles tensions hydriques.

- Champignons : Bien que leur diversité soit bridée par l'aridité, les champignons filamenteux (Ascomycota dominants) jouent un rôle structural. Leurs hyphes stabilisent mécaniquement les agrégats de sol. De plus, les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) s'associent aux racines des plantes oasiennes pour optimiser l'absorption de l'eau et du phosphore face au stress salin (Slimani, 2022).

2. Importance dans les agrosystèmes

a) Recyclage et la biodisponibilité des nutriments (Le moteur biogéochimique)

La biomasse microbienne régule la transformation des éléments chimiques essentiels de la phase organique (non assimilable par les plantes) à la phase minérale assimilable.

- Cycle de l'Azote (N) : Les micro-organismes dégradent la matière organique pour libérer de l'ammonium (NH_4^+) puis des nitrates (NO_3^-) via la minéralisation et la nitrification. En zone aride, la présence de cyanobactéries fixatrices d'azote dans la biocrust enrichit directement ce compartiment, réduisant la dépendance aux engrais chimiques azotés.
- Solubilisation du Phosphore (P) : Le phosphore est souvent bloqué dans les sols sahariens (précipité avec le calcium en raison du pH alcalin). Les bactéries de la biomasse microbienne sécrètent des acides organiques (comme l'acide citrique ou gluconique) et des enzymes (phosphatases) qui brisent ces liaisons, rendant le phosphore disponible pour les racines (mesurable par la méthode Olsen) (Baumann et al., 2021).

b) Effet « Île de fertilité » (*Fertilizer Island Effect*)

Dans les agrosystèmes de zones arides (comme les cultures oasiennes ou les parcelles de céréaliculture/maraîchage), la fertilité n'est pas homogène.

- La biomasse microbienne se concentre massivement sous la croûte biologique et autour de la rhizosphère des plantes cultivées.
- Cette accumulation crée des micro-zones hautement fertiles riches en carbone organique labile. Cet effet "île de fertilité" protège les nutriments du lessivage et crée un gradient microbien indispensable à la survie des cultures face aux conditions climatiques extrêmes (Benabdallah, 2024).

c) Amélioration de la structure physique du sol

La biomasse microbienne n'a pas qu'un rôle chimique, elle est le "ciment" du sol :

- Les bactéries et microalgues produisent des exopolysaccharides (EPS), des substances gluantes qui lient les particules de sable microscopiques entre elles pour former des micro-agrégats.
- Les filaments des champignons (hyphes mycéliens) tissent un réseau mécanique qui stabilise ces agrégats.
- Impact agronomique : Un sol mieux agrégé résiste beaucoup mieux à l'érosion éolienne (très fréquente à Ouargla), retient l'eau d'irrigation plus longtemps (augmentation de la capacité de rétention en eau) et améliore la porosité, ce qui facilite l'aération des racines (Xiao et al., 2026).

d) Stimulation des plantes et protection contre les stress (Effet PGPR)

Une grande partie de la biomasse microbienne est composée de bactéries promotrices de la croissance des plantes (PGPR - *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria*).

- Elles synthétisent des phytohormones (comme l'acide indole-acétique ou AIA) qui stimulent le développement racinaire (racines secondaires), permettant à la plante d'explorer un plus grand volume de sol pour puiser l'eau.
- Elles induisent une tolérance systémique aux stress abiotiques (comme le stress salin dû au NaCl ou le stress thermique), un point crucial pour les cultures testées en zones arides comme le quinoa ou le palmier dattier (Young et al., 2025).

3. Paramètres influençant l'activité microbienne

L'activité de la BMS dépend directement de la dynamique environnementale et des techniques agricoles :

Humidité du sol et le potentiel hydrique : L'eau est le solvant biologique indispensable au transport des nutriments et à la motilité bactérienne. En zone aride, les micro-organismes subissent des cycles de dessiccation-réhumectation (effets "Birch") ; la baisse de l'humidité induit un stress hydrique qui stoppe l'activité métabolique, tandis qu'une irrigation ou une pluie déclenche un pic d'activité enzymatique instantané (Messaoudi, 2024).

Température du sol : Elle régule directement la cinétique des réactions enzymatiques et la respiration microbienne. Dans les agrosystèmes sahariens comme celui de Ouargla, les températures extrêmes de l'été provoquent un stress thermique qui limite l'activité aux horizons profonds ou sous la protection des croûtes biologiques, tandis que le printemps et l'automne offrent des températures optimales induisant des pics de biomasse active (Benabdallah, 2024).

Salinité et la pression osmotique : Une forte concentration en sels solubles (NaCl) réduit la disponibilité de l'eau (abaissement du potentiel osmotique) et exerce une toxicité ionique directe sur les cellules microbiennes. Pour survivre, la microflore doit dépenser de l'énergie pour synthétiser des osmolytes protecteurs, ce qui réduit l'efficacité de la minéralisation de la matière organique (Baumann et al., 2021).

pH et potentiel d'oxydoréduction: Le pH influence la solubilité des nutriments et la stabilité des membranes cellulaires. Les sols sahariens, généralement alcalins (pH supérieur à 8), favorisent le développement des communautés bactériennes et des actinomycètes au détriment des champignons filamenteux qui préfèrent les milieux plus acides (Xiao et al., 2026).

Disponibilité en substrats carbonés (Rapport C/N) : Le carbone organique est la source d'énergie principale de la microflore hétérotrophe. Dans les systèmes cultivés, l'apport d'amendements organiques (compost, fumier) ou les exsudats racinaires de la rhizosphère lèvent la limitation en carbone et déclenchent une prolifération immédiate de la biomasse microbienne (Young et al., 2025).

Pratiques culturales et perturbations anthropiques : Le type de travail du sol (labour mécanique destructeur vs non-labour) et l'utilisation d'intrants chimiques (pesticides, engrais de synthèse) modifient profondément l'habitat microbien. Le retournement du sol expose la biomasse aux rayonnements UV et détruit le réseau de mycélium des champignons, réduisant durablement l'activité biologique globale (Messaoudi, 2024).

4. Relation entre croûtes biologiques et activité biologique (microbienne)

Les recherches mondiales contemporaines et les thèses universitaires algériennes mettent en lumière une interaction symbiotique capitale entre les croûtes biologiques et le microbiome

sous-jacent :

- a) **Une pompe nutritionnelle** : Les cyanobactéries de la croûte captent le carbone atmosphérique par photosynthèse et fixent l'azote (N₂). Une proportion importante de ce carbone et de cet azote est relarguée dans les premiers centimètres du sol sous forme d'exsudats labiles (Hui et al., 2022).
- b) **Une niche écologique protégée** : Ces apports continus de nutriments stimulent massivement la prolifération des bactéries hétérotrophes et des champignons microscopiques résidant directement sous la croûte (horizon sous-crustal).
- c) **Validation scientifique en Algérie** : Des mesures empiriques effectuées sur les sols gypseux de la cuvette de Ouargla ont mis en évidence que les sols couverts de croûte biologique affichent des concentrations en carbone microbien (C_{mic}), en azote microbien (N_{mic}) et une respiration globale significativement plus élevées que les sols nus adjacents dépourvus de croûtes (Bazzine et Hamdi Aissa, 2014 ; Benzaid et Souigat, 2025).

Partie II

Matériel et méthodes

1. Localisation géographique

L'étude a été réalisée dans deux régions géographiques différentes, illustrant les conditions arides et semi-arides caractéristiques de l'Algérie, à savoir Ouargla et Ghardaïa.

A. Région d'Ouargla

La région d'Ouargla constitue l'une des principales oasis du Sahara algérien (Figure 6). La ville d'Ouargla est située dans le Sud-Est de l'Algérie, à environ 790 km de la capitale Alger. Depuis la réorganisation administrative de 2019, la wilaya d'Ouargla couvre une superficie d'environ 29 980 km², après la création de nouvelles wilayas dans le Sud du pays (PDAU Ouargla, 2020). Le chef-lieu de la wilaya est situé à une altitude moyenne de 131 m. Ses coordonnées géographiques sont : 31°58' de latitude Nord et 5°20' de longitude Est.

La wilaya d'Ouargla est limitée :

- Au Nord par les wilayas de Djelfa et de Biskra ;
- Au Nord-Est par la wilaya d'El Oued ;
- À l'Est par la wilaya d'El Oued ;
- À l'Ouest par la wilaya de Ghardaïa ;
- Au Sud par la wilaya de Tougourt ;
- Au Sud-Ouest par la wilaya d'El Meniaa.

La wilaya d'Ouargla comprend actuellement plusieurs daïras et communes, dont Ouargla, Rouissat, Aïn Beïda, Hassi Ben Abdellah, N'Goussa et Sidi Khouiled, qui constituent les principaux pôles de peuplement et d'activité économique de la région.

B. Région de Ghardaïa

La région de Ghardaïa est située dans la partie septentrionale du Sahara algérien. Elle occupe une position stratégique entre les Hauts Plateaux et le Sahara central. La région est caractérisée par la présence d'importantes ressources en eaux souterraines appartenant principalement aux systèmes aquifères du Continental Intercalaire (nappe albienne) et du Complexe Terminal, qui jouent un rôle majeur dans l'approvisionnement en eau, l'agriculture oasienne et les potentialités géothermiques de la région.

Depuis le nouveau découpage administratif, la wilaya de Ghardaïa couvre une superficie d'environ 44 548 km². Son chef-lieu, la ville de Ghardaïa, est situé à environ 600 km au sud d'Alger. Ses coordonnées géographiques sont approximativement 32°29' de latitude Nord et 3°40' de longitude Est, avec une altitude moyenne de 468 m.

Les limites administratives actuelles de la wilaya de Ghardaïa sont (MICLAT, 2024) :

- Au Nord par les wilayas de Laghouat et de Djelfa ;

- À l'Est par les wilayas d'Ouargla et d'El Meniaa ;
- À l'Ouest par les wilayas d'El Bayadh et de Béni Abbès ;
- Au Sud par la wilaya d'El Meniaa.

La wilaya de Ghardaïa comprend plusieurs communes et daïras, dont Ghardaïa, Berriane, El Atteuf, Bounoura, Zelfana, Metlili et Guerrara, qui constituent les principaux centres urbains, agricoles et économiques de la région.

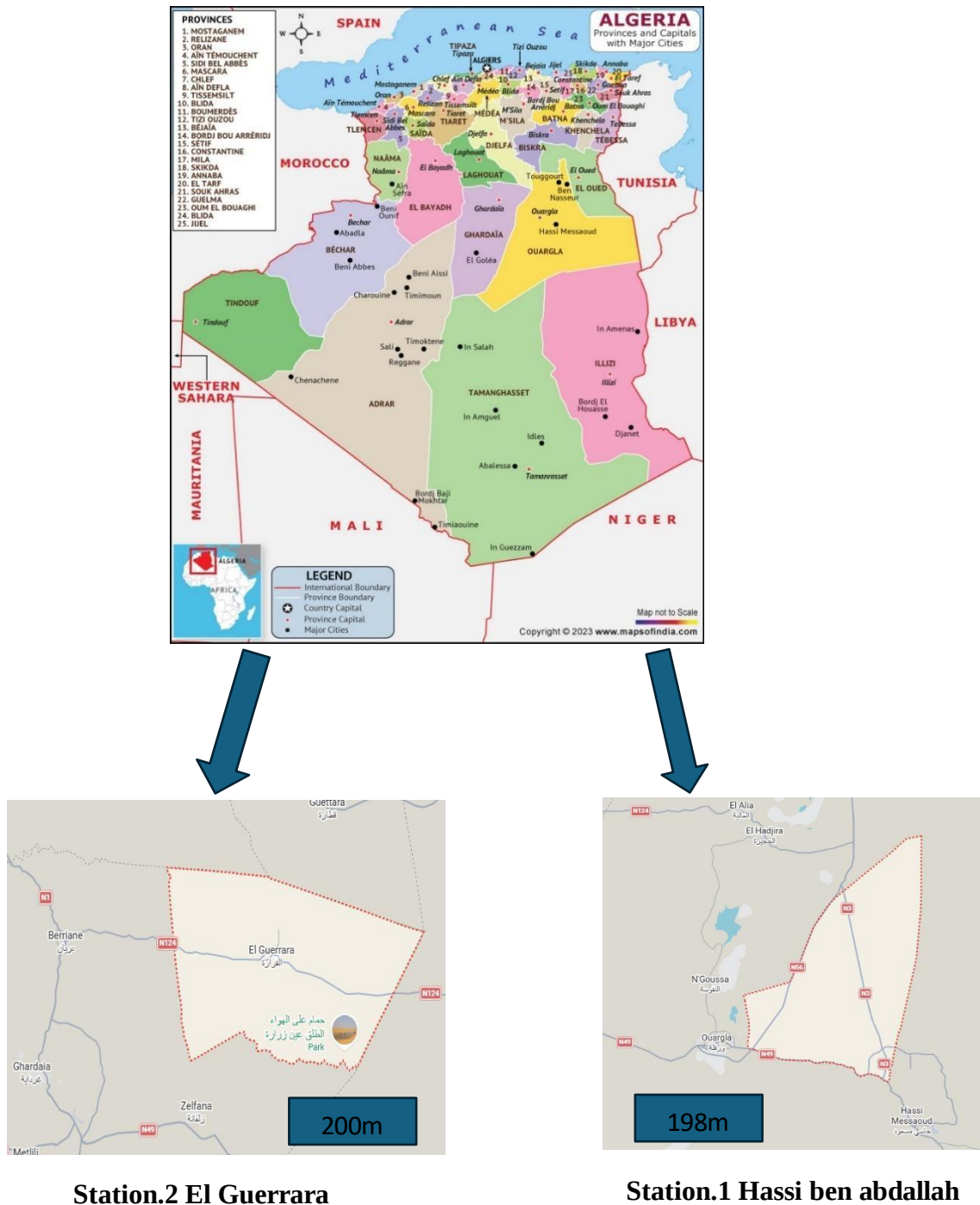


Figure 6. Localisation géographique des régions d'étude

2. Approche méthodologique

L'approche méthodologique adoptée pour la présente étude est illustrée dans la (Figure 7).

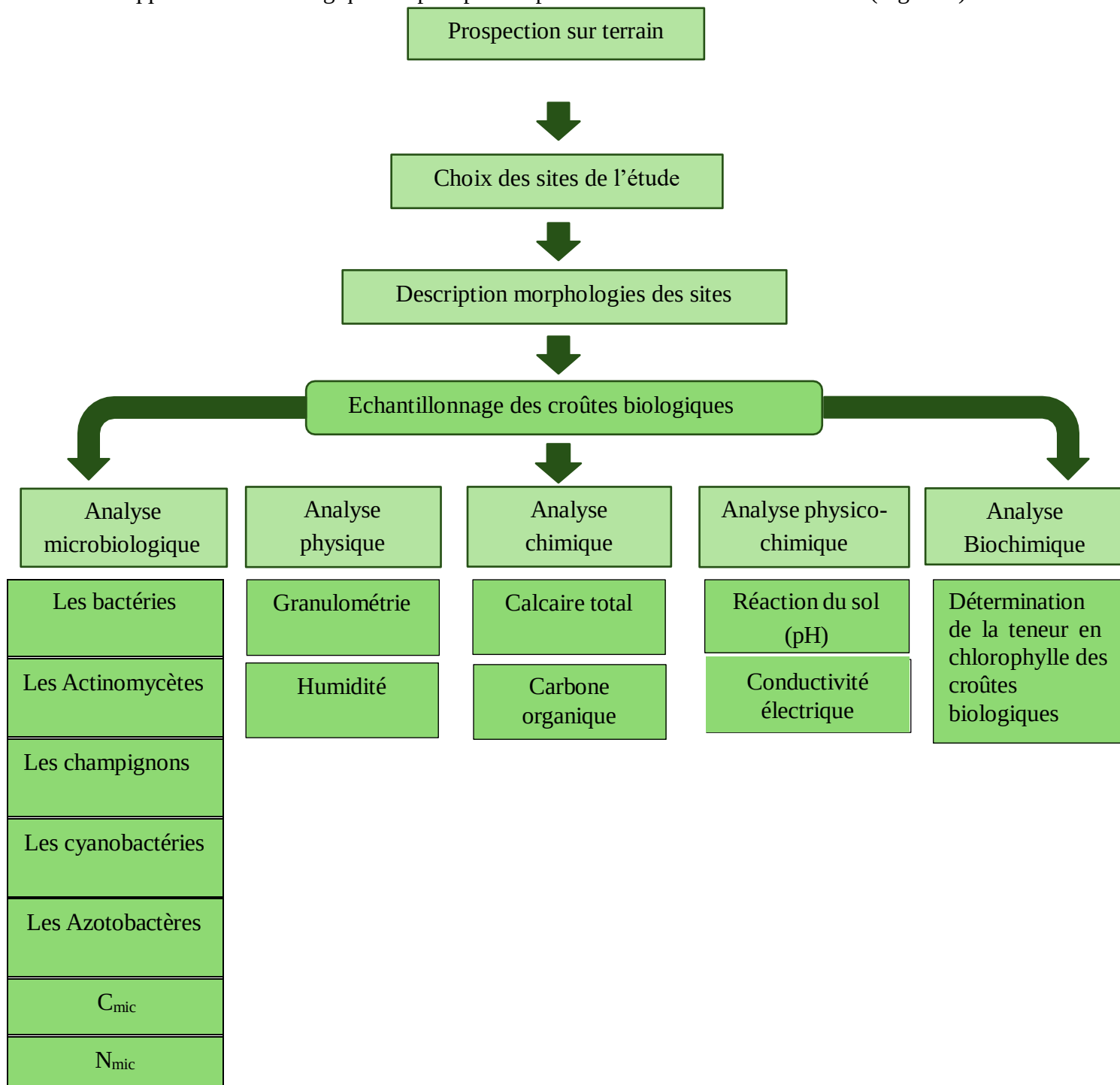


Figure 7. Méthodologie de travail

3. Choix des stations

Le critère du choix des stations est basé sur la disponibilité des croûtes biologique en surface des sols cultivés dans trois systèmes de cultures, palmier dattier, sous pivot et sous serre. Nous avons fait deux sorties de prospection sur terrain réalisées le 17/02/2026 et 05/04/2026, et nous avons prélevé des échantillons dans les deux stations suivantes :

Station de Hassi ben abdallah (Région de Ouargla)

Station de Guerrara (Région de Ghardaïa)

La situation géographique des deux sites d'étude est illustrée dans les Figures 8, 9 et 10.

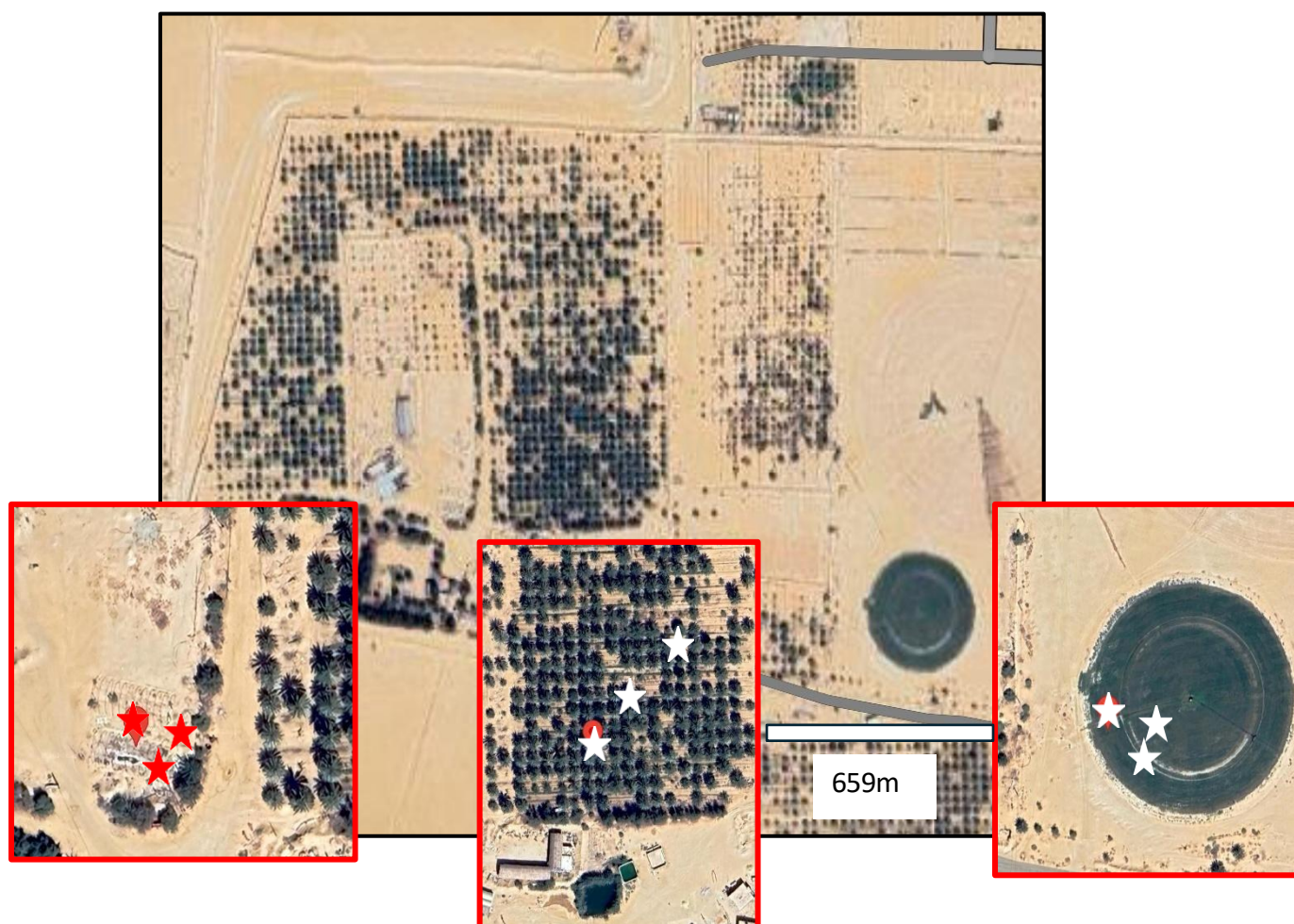


Figure 8. Localisation géographique de station d'étude de Ouargla (google Map et Erthe 2026)

Les étoiles représentent les points de prélèvement

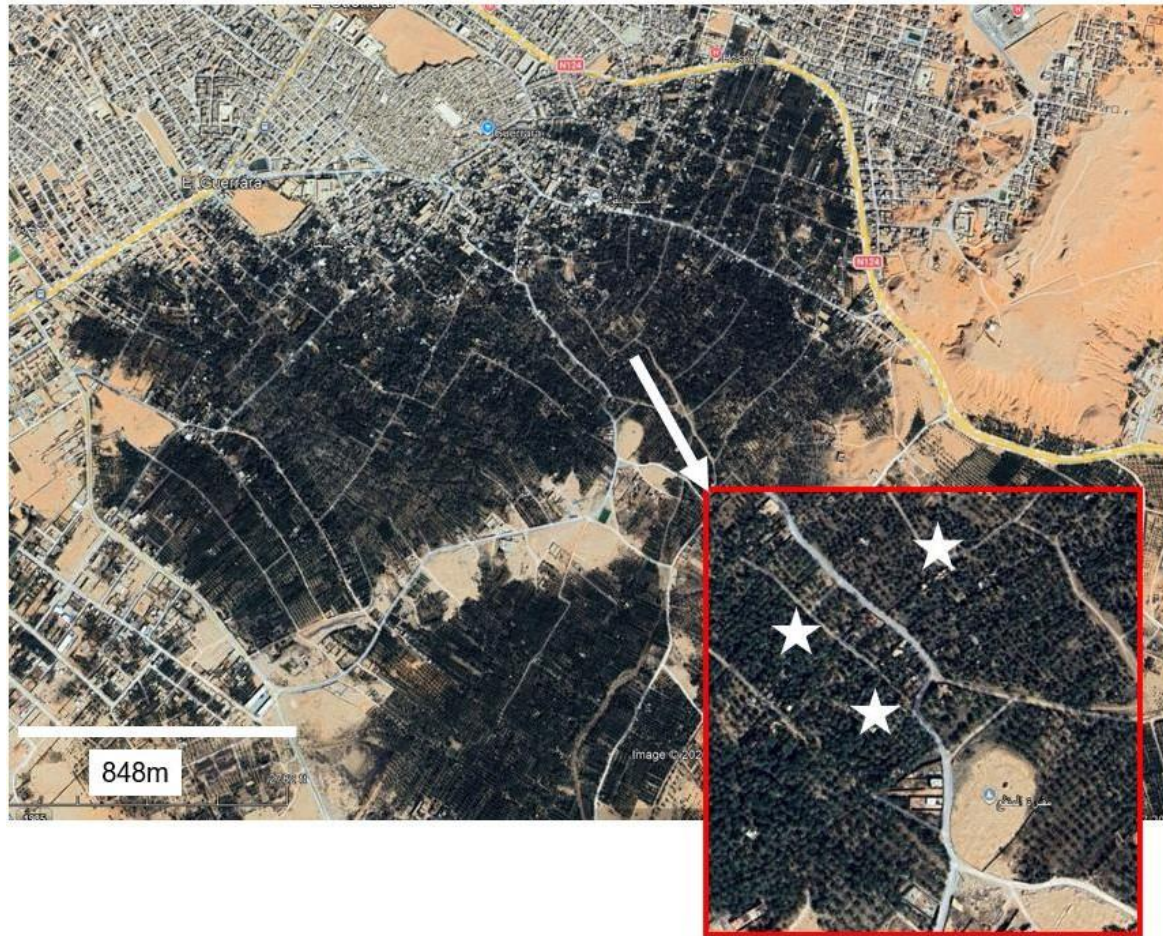


Figure 9. Localisation géographique de station d'étude de Guerrara (google Map et Erthe 2026)

Les étoiles représentent les points de prélèvement

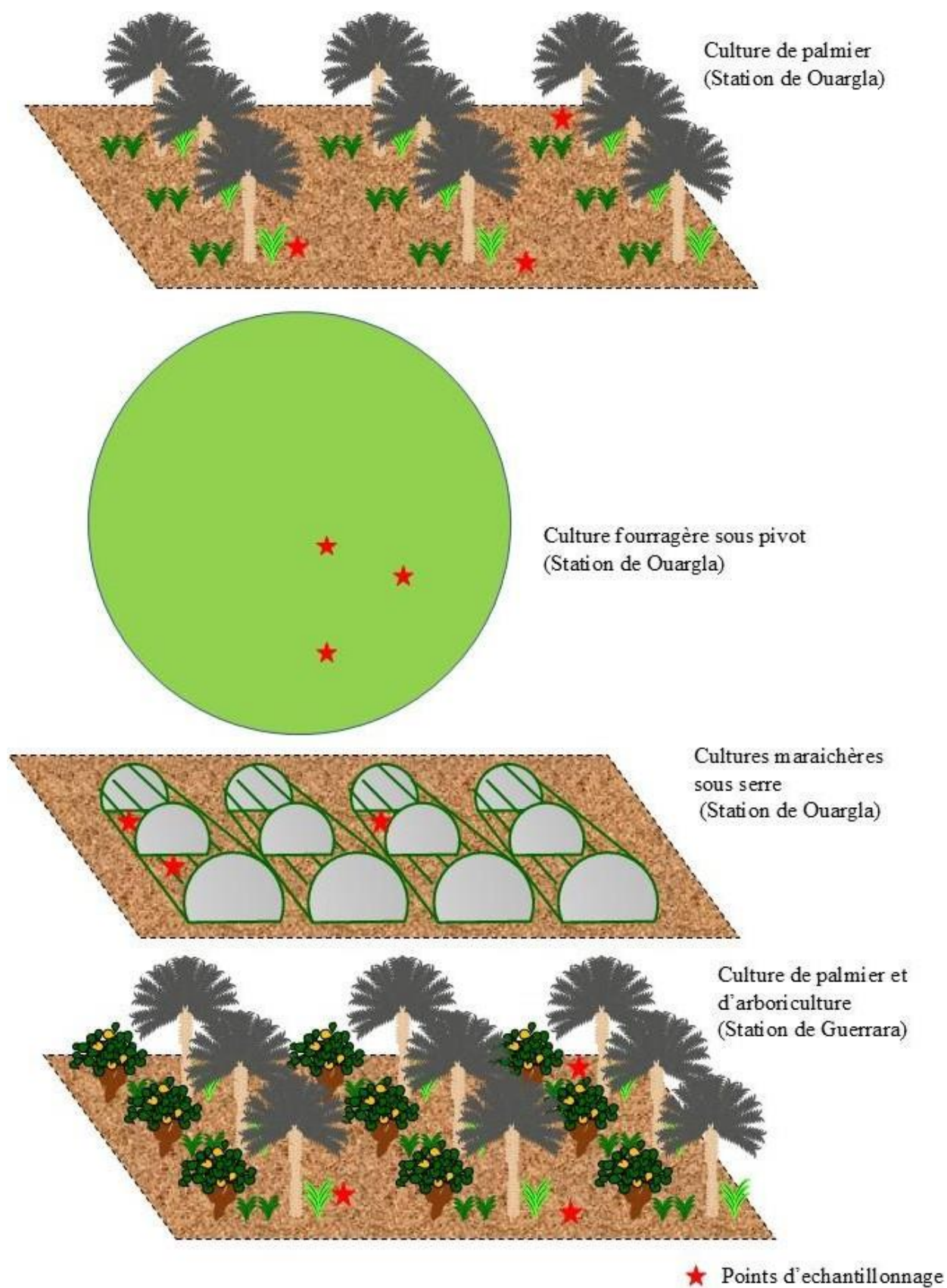


Figure 10. Protocole d'échantillonnage sur terrain

4. Description des sites d'étude

4.1. Station 01. Exploitation agricole de babziz hassi ben abdallah (région de Ouargla)

Descripteurs : Hamdi Aissa Bealhaj, Ababsia Malak

Date de Description : 17/02/2026

Temps : Ensoleillé

Site 1 :

- Longitude : 5°28'11.3''E
- Latitude 31°59'55.2''N
- Culture : Palmier dattier (*Phoenix dactylifera*)

Site 2 :

- Longitude : 5°28'22.8''E
- Latitude : 31°59'51.3 ''N
- Culture : fourrage sous pivot, l'avoine (*Avena sativa*)

Site 3 :

- Longitude : 5°28'07.6'' E
- Latitude : 31°59'54.7''N
- Culture : maraichage sous serre, tomate (*Solanum lycopersicum*) et pimon (*Capsicum annum*)



Photo 1. Etat de surface du site 1 (Palmeraie)



	
Photo 2. Etat de surface du site 2 (Pivot)	
	
Photo 3. Etat de surface du site 3 (Serre)	

Description de la station d'étude

La station agricole de Hassi Benabdallah, située dans le Sahara septentrional au nord-est de la cuvette d'Ouargla, s'intègre dans un milieu oasien et d'enclaves agricoles hautement anthropisées (Korichi, 2021). Sur le plan morpho-pédologique, le pédopaysage de cette région se caractérise par une forte hétérogénéité d'un sol squelettique, dominé structurellement par des sables éoliens quartzeux fins à moyens (Saddouki et Salmi, 2017 ; Benras Moussa, 2025). Situés aux altitudes les plus basses de la vallée, ces sols souffrent d'une contrainte majeure : une couverture de sols gypseux et halomorphes en surface, couplée à un profil pédologique montrant une salinité croissante du bas vers le haut induite par l'évaporation intense (Krima, 2022 ; Benras Moussa, 2025). Ce paysage agro-pédologique, bien que propice à la

phœniciculture (variété *Deglet Nour*) en sol léger, fait face à de lourds défis de dégradation. Les thèses récentes mettent en évidence une dynamique d'abandon de certains périmètres agricoles et pivots céréaliers due à la salinisation des nappes d'irrigation, entraînant la prolifération d'une flore de succession opportuniste dominée par les *Poaceae* et les *Asteraceae* (Benbrahim et Eddoud, 2020).

4.2. Station 02 : Oasis de Guerrara (région de Ghardaïa)

Descripteurs : Hamdi Aissa Bealhaj, Ababsia Malak

Date de Description : 05/04/2026

Temps : Ensoleillé

- Longitude : E 04°30'04.62''
- Latitude : N 32°46'53.51''
- Culture : Palmier dattier (*Phoenix dactylifera*) et arboriculture

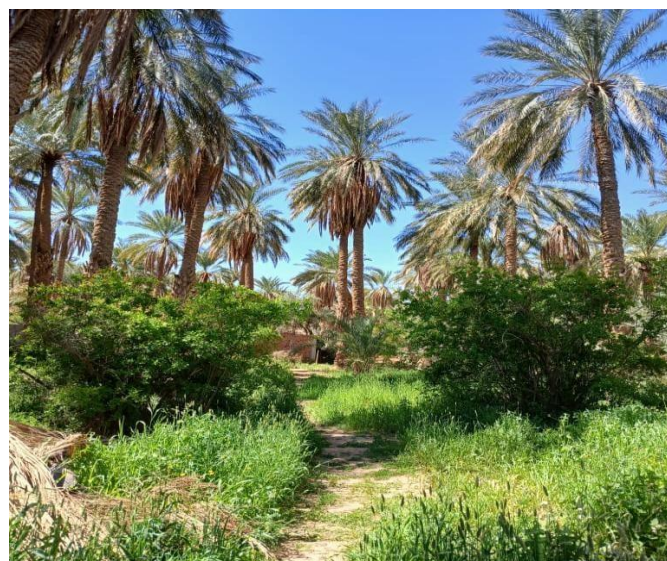


Photo 4. Etat de surface du site 4 (Palmeraie)

Description de station d'étude

La palmeraie d'El Guerrara, située au nord-est de la wilaya de Ghardaïa, constitue un agro-écosystème oasien dynamique marqué par la coexistence d'un système phœnicicole traditionnel et d'extensions agricoles modernes (Idder et al., 2023). Sur le plan morpho-pédologique, le pédopaysage est intimement lié à la vallée de l'Oued Zegrir, dont les crues historiques ont façonné des sols de type fluvisols (alluvionnaires) présentant une grande

variabilité texturale, allant de dépôts sédimentaires sablo-limoneux en surface à de profonds horizons argileux moulants (Djili et Hamdi-Aissa, 2018 ; Hosseinat et Ben Attalah, 2021). L'intensification agricole récente et l'usage d'eaux d'irrigation souterraines de qualité moyenne à médiocre exercent une pression hydro-édaphique critique sur ce milieu. Bien que le sol des parcelles exploitées reste globalement classé comme peu salé à légèrement alcalin, les analyses spatiales fines révèlent une accumulation importante et hautement hétérogène de sodium (Na^+) et de potassium (K^+) induite par le couplage entre l'évaporation intense et les intrants. De plus, ce pédopaysage repose sur un socle géologique d'une grande complexité, exposé en profondeur à des risques de dissolution et à des phénomènes karstiques ou pseudo-karstiques (cavités souterraines) influençant la circulation locale des aquifères (Melouah, 2020). Le sol des parcelles exploitées reste globalement classé comme sols alluviaux, à texture fine (argile-limoneux et argileux) (Djili et Hamdi-Aissa, 2018).

5. Prélèvement des échantillons de croûtes biologiques et du sol associé

On a effectué deux types de prélèvements :

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

La représentativité des analyses physicochimiques et microbiologiques dépend directement de la rigueur de la stratégie d'échantillonnage sur le terrain. Face à l'hétérogénéité spatiale des milieux cultivés de la cuvette de Ouargla, une approche standardisée a été adoptée pour isoler la matrice crustale superficielle de son horizon édaphique sous-jacent (Kadi et *al.*, 2021).

A. Prélèvements pour les analyses physicochimiques

Directement sous la zone de carottage de la croûte biologique, le sol nu sous-jacent (horizon sub-crustal) a été prélevé à la truelle sur une épaisseur de 0 à 10cm pour servir de témoin comparatif et évaluer l'effet de transfert vertical des nutriments (Rodriguez-Caballero et *al.*, 2022).

Les échantillons ont été placés dans des sacs en plastique numérotés, transportés au laboratoire, puis séchés à l'air libre et à l'obscurité (pour éviter la photodégradation de la chlorophylle). Après séchage complet, la fraction terreuse a été broyée doucement puis tamisée à travers une maille de 2mm pour constituer la terre fine d'analyse (Reichel et *al.*, 2020).

B. Prélèvements pour les analyses microbiologiques

L'évaluation quantitative et qualitative des communautés microbiennes (dénombrement de la microflore tellurique) ainsi que la mesure du carbone de la biomasse microbienne (C_{mic}) par la méthode de fumigation-extraction exigent une méthodologie de prélèvement stérile et rigoureuse. L'objectif est double : empêcher toute introduction de micro-organismes exogènes (contamination) et bloquer immédiatement l'évolution de l'activité métabolique cellulaire afin que l'échantillon analysé au laboratoire reflète fidèlement l'état biologique réel du terrain au moment de la collecte (Fierer *et al.*, 2021).

Dès leur collecte sur des boîtes Petri stériles, les échantillons ont été maintenue à une température constante de 4°C. Les analyses de dénombrement microbiologique et les étapes de fumigation-extraction ont été initiées dans un délai maximal de 48 heures après le prélèvement pour garantir la viabilité cellulaire (Slimani, 2022).

6. Méthodes d'analyse

Les analyses physico-chimiques du sol ont été réalisées dans les laboratoires pédagogiques de l'université de Ouargla au niveau de la faculté des sciences de la vie et de la nature et au laboratoire de biogéochimie des milieux désertiques. Quant aux analyses microbiologiques et physiologiques, elles ont été réalisées au laboratoire du CRAPC (Ouargla), ainsi qu'au laboratoire Maria de contrôle de qualité et de la conformité à Ouargla.

6.1. Analyse physicochimique du sol

6.1.1. Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique mesure la capacité d'une solution aqueuse à conduire le courant électrique. Ce paramètre est directement proportionnel à la concentration en ions hydrophiles dissous (Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-}) présents dans la phase liquide du sol. En contexte aride, la mesure de la CE permet de quantifier mathématiquement la pression osmotique de la solution du sol et d'évaluer le degré de salinisation secondaire induit par l'irrigation oasienne (Kadi *et al.*, 2021).

Elle a été mesurée sur un extrait dilué dont le rapport (terre/eau) est de 1/5 en utilisant un conductimètre (AFNOR, 1999).

6.1.2. Réaction du sol (pH)

La réaction du sol est déterminée par la mesure de l'activité des ions hydronium (H⁺) présents dans la solution du sol (pH aqueux). Il a été mesuré par un pH mètre sur un extrait du rapport (terre/eau) 1/2,5 (AFNOR, 1999). Le principe repose sur une mesure potentiométrique mesurant la différence de potentiel entre une électrode de verre indicatrice et une électrode de référence immergées dans une suspension de sol. Le pH est une variable clé qui contrôle directement la spéciation chimique des nutriments et régule l'activité des enzymes sécrétées par la biomasse microbienne sous-crustale (Slimani, 2022).

6.2. Analyse physique du sol

6.2.1. Granulométrie

La granulométrie consiste à déterminer la distribution pondérale des particules minérales individuelles (argiles, limons, sables) après destruction complète des ciments organiques et calcaires. Le principe repose sur la loi de Stokes, qui régit la vitesse de sédimentation de particules sphériques au sein d'un fluide visqueux. La vitesse de chute étant proportionnelle au carré du diamètre de la particule, l'échantillonnage de la suspension à des temps de décantation précis (via la pipette de Robinson) permet d'isoler et de peser chaque fraction texturale (Rodriguez-Caballero et *al.*, 2022).

6.2.2. Humidité

La détermination de l'humidité pondérale repose sur le principe de la gravimétrie par dessiccation. La perte de masse subie par l'échantillon de sol lors d'un chauffage prolongé à une température standardisée correspond exclusivement à l'évaporation de l'eau libre et de l'eau de rétention capillaire. La structure minérale et la matière vivante étant préservées à cette température, le ratio entre la masse d'eau perdue et la masse du sol sec quantifie l'état de réserve hydrique de la matrice crustale (Kidron et Drahorad, 2022).

6.3. Analyses chimiques du sol

6.3.1. Dosage du calcaire total

Le dosage du calcaire total repose sur une réaction de gazométrie acide. Le carbonate de calcium (CaCO₃) présent dans le sol réagit de manière stœchiométrique avec l'acide chlorhydrique (HCl) en excès pour libérer du dioxyde de carbone gazeux (CO₂) selon l'équation chimique :



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

- P: Poids de prise d'essai de l'échantillon.
- P': Poids de CaCO₃.
- V: Volume de CO₂ dégagé par l'échantillon.
- v: Volume de CO₂ dégagé par CaCO₃.

Le volume de CO₂ libéré, mesuré à l'aide d'un calcimètre de Bernard, est directement proportionnel à la masse de carbonates totaux contenus dans l'échantillon (Kadi et *al.*, 2021).

6.3.2. Dosage du carbone organique et estimation de la matière organique

Le dosage du carbone organique a été effectué par la méthode Walkley et Black. Le principe scientifique : Le dosage du carbone organique total (COT) repose sur une oxydation d'oxydoréduction par voie humide. Le carbone organique est oxydé par un excès de bichromate de potassium (K₂Cr₂O₇) en milieu fortement acide et chaud généré par l'acide sulfurique (H₂SO₄). L'excès de bichromate n'ayant pas réagi est ensuite quantifié par un dosage volumétrique de retour à l'aide d'un sel de fer (Sel de Mohr).

L'estimation de la matière organique globale (MO%) s'effectue par l'application du facteur empirique de Van Bemmelen (1,724), basé sur le postulat scientifique post-2020 que la matière organique humifiée des sols arides contient en moyenne 58% de carbone organique stable (Liang et *al.*, 2020).

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

6.4. Analyses biochimiques

6.4.1. Détermination de la teneur en chlorophylle

La quantification de la chlorophylle sert d'indicateur de la biomasse des micro-organismes autotrophes photosynthétiques (cyanobactéries et micro-algues) colonisant les croûtes biologiques. Le principe repose sur l'extraction par solvant organique (solubilisation des pigments lipophiles membranaires dans de l'acétone ou du méthanol) suivie d'une analyse spectrophotométrique. La concentration pigmentaire est calculée en mesurant la densité optique (absorbance) de l'extrait à des longueurs d'onde d'absorption spécifiques 663 nm et 645nm pour la chlorophylle a et la chlorophylle b respectivement, là où l'énergie lumineuse est sélectivement absorbée par le noyau tétrapyrrolique de la molécule de chlorophylle (Mehda et *al.*, 2021).

6.5. Analyses microbiologiques

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

Le dénombrement des grandes communautés de la microflore et des croûtes biologiques repose sur la méthode de mise en culture dépendante après l'établissement d'une gamme de dilutions décimales. Le principe fondamental de cette technique repose sur l'isolement physique des cellules microbiennes viables de la matrice solide du sol, suivi de leur étalement sur des milieux nutritifs gélosés sélectifs. Chaque cellule ou unité viable isolée se multiplie au cours de l'incubation pour former une colonie macroscopiquement visible, appelée Unité Formant Colonie (UFC) (Slimani, 2022).

A. Préparation de la suspension-mère et de la gamme de dilutions décimales

La suspension-mère (10^{-1}) : Une prise d'essai de 1 g de croûtes biologiques est introduite aseptiquement dans un tube à essai stérile contenant 9 ml de diluant (eau peptonée ou eau physiologique stérile à 0,9% \ NaCl). Le mélange est soumis à une agitation mécanique vigoureuse pendant quelques secondes.

Les dilutions en série (10^{-2} à 10^{-5}) : À partir de cette suspension-mère, des transferts successifs de 1 mL sont réalisés dans des tubes à essais contenant 9 mL de diluant stérile sous flux laminaire. Cette gamme de dilutions décimales permet de réduire la densité cellulaire afin d'obtenir des colonies isolées et dénombrables après incubation (Reichel et *al.*, 2020).

B. Spécificités des milieux de culture et conditions d'incubation

Pour chaque groupe microbien cible, un volume de 0,1 mL de la dilution appropriée est ensemencé en surface sur des milieux de culture spécifiques :

Tableau 1. Spécificités des milieux de culture et conditions d'incubation

Groupe Microbien Cible	Milieu de Culture Spécifique	Rôle du Milieu	Conditions d'Incubation
Bactéries	Nutrient Agar (Gélose Nutritive)	Milieu riche non sélectif permettant la croissance de la flore bactérienne aérobie ubiquitaire.	30°C pendant 48 heures.
Champignons	Sabouraud Agar (Gélose Sabouraud)	Milieu de base dont la forte concentration en peptones et en glucose favorise la nutrition des structures fongiques (moisissures et levures). Sa sélectivité vis-à-vis de la flore bactérienne contaminante est renforcée par son pH naturellement acide ou par l'addition systématique d'un antibiotique à large spectre (chloramphénicol).	25°C pendant 5 à 7 jours.
Actinomycètes (Actinomycetota)	Milieu Krinsky	Milieu sélectif formulé avec des sources de carbone complexes, favorisant les bactéries filamenteuses et limitant les bactéries à croissance rapide.	28°C pendant 7 à 10 jours.
Azotobacter (Bactéries fixatrices d'N ₂)	Milieu d'Ashby	Milieu totalement dépourvu d'azote minéral ou organique. Seules les bactéries diazotrophes libres (comme <i>Azotobacter</i> sp.) capables de fixer l'azote atmosphérique peuvent y proliférer	28°C pendant 3 à 5 jours.
Cyanobactéries	Milieu BG11	Milieu minéral synthétique adapté aux exigences des organismes autotrophes phototrophes. Les plaques sont placées sous une rampe lumineuse (photopériode 16h lumière / 8h obscurité).	25°C pendant 21 à 28 jours.

C. Lecture des résultats et formulation mathématique

Seules les boîtes de Pétri présentant un nombre de colonies compris strictement entre 30 et 300 sont retenues pour le calcul final (entre 10 et 100 colonies pour les champignons et les cyanobactéries). L'expression de la charge microbienne est calculée en Unités Formant Colonie par gramme de sol sec (UFC/g) selon l'équation standardisée de la norme ISO :

$$N = \frac{\sum C}{V \times d \times (1 - H\%)} \times 10$$

Où :

- C : Somme des colonies comptées sur les boîtes retenues d'une même dilution.
- V : Volume de l'inoculum étalé sur la gélose (0,1mL).
- d : Facteur de la dilution retenue (ex: 10^{-4}).
- H% : Humidité pondérale de l'échantillon de sol (exprimée en décimale), permettant de corriger le résultat par rapport à la masse de sol sec (Kadi et al., 2021).

6.5.2. Détermination de la biomasse microbienne par la méthode de fumigation extraction

La quantification du carbone (C_{mic}) et de l'azote (N_{mic}) de la biomasse microbienne est réalisée selon la méthode princeps de Vance et al. (1987) et Brookes et al. (1985), actualisée par les cadres méthodologiques post-2020. Le principe fondamental repose sur la lyse in situ des membranes cellulaires de la microflore vivante par des vapeurs de chloroforme ($CHCl_3$). Les constituants intracellulaires ainsi rendus solubles sont extraits par une solution saline, puis quantifiés par comparaison avec un lot témoin non fumigé (*Dynamic Soil Biology Consortium*, 2024 ; Reichel et al., 2020).

Carbone microbien (C_{mic})

Le carbone organique dissous (COD) contenu dans les extraits de K_2SO_4 est déterminé soit par un analyseur automatique de COT, soit par oxydation chimique par voie humide. Dans ce dernier cas, le carbone est oxydé par un excès de bichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$, 66, 7 mM) en milieu fortement acide (H_2SO_4 concentré) à 150°C. L'excès de dichromate est ensuite titré par retour à l'aide d'une solution de sel de Mohr (sulfate d'ammonium et de fer II, 33,3 mM) en présence de ferroïne comme indicateur de fin de réaction (Kadi et al., 2021).

La teneur en carbone de la biomasse microbienne (mg C/kg de sol sec) est calculée par la formule suivante :

$$C_{mic} = \frac{E_C}{k_{EC}}$$

Où E_C = (Carbone extrait du lot fumigé) - (Carbone extrait du lot non-fumigé) et k_{EC} représente le facteur d'efficacité d'extraction du carbone microbien, fixé conventionnellement à 0,45 (Vance et al., 1987).

Azote microbien (N_{mic})

L'azote total dissous (NTD) présent dans les extraits est quantifié après une phase de digestion/minéralisation selon la méthode de Kjeldahl (oxydation de l'azote organique en ammonium via H_2SO_4 à 360°C en présence d'un catalyseur), suivie d'une distillation et d'un titrage colorimétrique automatique ou manuel (Reichel et al., 2020).

La teneur en azote de la biomasse microbienne (mg N/kg de sol sec) est établie selon l'équation:

$$N_{mic} = \frac{E_N}{k_{EN}}$$

Où $E_N = (\text{Azote extrait du lot fumigé}) - (\text{Azote extrait du lot non-fumigé})$ et k_{EN} correspond au coefficient de proportionnalité d'extraction de l'azote lysé, fixé par consensus international à **0,54** (Brookes et *al.*, 1985).

Partie III

Résultats et Discussion

1. Caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés

Les résultats des analyses physico-chimiques du sol de station de Ouargla et Guerrara sont présentés dans le tableau 02.

Tableau 2. Résultats des analyses physico-chimiques du sol

Paramètres		Site1 (Palmeraie)	Site 2 (Pivot)	Site 3 (Serre)	Site 4 (Palmeraie Guerrara)
Classes granulométriques	(A%)	9,95%	9,28%	11,30%	36,1%
	(LF%)	2,66%	8 %	5,33%	23%
	(LG%)	8%	8%	17,33%	10,3%
	(SF%)	37,23%	34,77%	30,8%	28,5 %
	(SG%)	37,65%	43,5%	47,41%	2%
pH 1 / 5		8,25	7,87	8,6	08,66
CE 1/5 (dS/m)		1,10	3,1	1,12	00,56
Calcaire total (%)		4,43%	1,83%	3,83	12,04 %
Matière organique (%)		1,44%	2,10%	1,51%	2,23 %
Carbone organique (%)		0,88%	0,59%	1,22%	1,3 %
Humidité du sol		9,90%	9,33%	11,33%	14,41

Les résultats physico-chimiques montrent que les quatre sites présentent des différences importantes de texture, de pH, de conductivité électrique, de calcaire total, de matière organique, de carbone organique et d'humidité. Ces paramètres contrôlent fortement la formation, la stabilité et l'activité biologique des croûtes biologiques des sols en zones arides. (Weber et al., 2022 ; Cantón et al., 2020).

Pour la granulométrie, les sites 1, 2 et 3 d'Ouargla sont dominés par les fractions sableuses, surtout le sable fin et le sable grossier. Le site 1 présente 37,23 % de sable fin et 37,65 % de sable grossier, le site 2 présente 34,77 % de sable fin et 43,5 % de sable grossier, et le site 3 présente 30,8 % de sable fin et 47,41 % de sable grossier. Cette dominance sableuse indique des sols légers, perméables et généralement pauvres en rétention d'eau et en matière organique. (Cantón et al., 2020 ; Naylor et al., 2020).

Le site 4 de Guerrara se distingue nettement par une teneur élevée en argile, 36,1 %, et en limon fin, 23 %, avec seulement 2 % de sable grossier. Cette texture plus fine favorise généralement la rétention de l'eau, la fixation des nutriments et la stabilité des agrégats du sol. Elle peut donc expliquer une meilleure installation des microorganismes des croûtes biologiques dans ce site. (Weber et al., 2022 ; IUSS Working Group WRB, 2022).

Les sols sableux des sites 1, 2 et 3 peuvent être plus sensibles à la dessiccation rapide et à l'érosion éolienne, car les particules grossières retiennent moins l'eau et les éléments nutritifs. Dans les milieux arides, les croûtes biologiques jouent alors un rôle important en stabilisant la surface du sol et en limitant la perte des particules fines (Cantón et al., 2020 ; Xiao et al., 2023).

Le pH est légèrement à fortement alcalin dans l'ensemble des sites selon l'échelle d'Aubert (1978), avec des valeurs de 8,25 au site 1, 7,87 au site 2, 8,6 au site 3 et 8,66 au site 4. Ces valeurs traduisent des sols basiques, typiques des régions arides et sahariennes où le lessivage est faible et où les carbonates peuvent s'accumuler (IUSS Working Group WRB, 2022 ; FAO et ITPS, 2021).

Le pH le plus faible est observé au site 2, avec 7,87, mais il reste légèrement alcalin. Cette alcalinité modérée peut être favorable à plusieurs groupes bactériens et actinomycètes, qui se développent souvent dans des sols neutres à alcalins. (Naylor et al., 2020 ; Weber et al., 2022).

Les pH les plus élevés sont observés au site 3, 8,6, et au site 4, 8,66. Ces valeurs élevées peuvent être liées à la présence de carbonates et au caractère calcaire des sols. Dans les zones arides, l'accumulation de carbonates est fréquente à cause de la faible pluviométrie et du faible lessivage (IUSS Working Group WRB, 2022 ; FAO et ITPS, 2021).

La conductivité électrique CE 1/5 varie entre 0,56 et 3,1 dS/m selon les sites. Les valeurs les plus élevées sont observées dans les sites d'Ouargla, surtout au site 2 avec 3,1 dS/m et au site 1 avec 1,1 dS/m. Cette augmentation relative de la conductivité peut indiquer une accumulation plus importante de sels solubles dans ces sols. (FAO et ITPS, 2021 ; Adeyemo et al., 2021).

Le site 4 de Guerrara présente la conductivité électrique la plus faible, avec 0,56 mS/m. Cette faible valeur suggère une salinité plus limitée par rapport aux sites d'Ouargla, ce qui peut être favorable au développement de plusieurs microorganismes sensibles au stress salin (FAO et ITPS, 2021 ; Naylor et al., 2020).

Le calcaire total est très élevé au site 4, avec 12,04 %, alors qu'il est plus faible dans les sites de Ouargla : 4,43 % au site 1, 1,83 % au site 2 et 3,83 % au site 3. Cette forte teneur en calcaire à Guerrara peut expliquer le pH élevé du site 4. Les sols calcaires sont fréquents dans les régions arides où les carbonates s'accumulent en raison du faible lessivage (IUSS Working Group WRB, 2022 ; FAO et ITPS, 2021).

Le site 2 présente la teneur la plus faible en calcaire total, avec 1,83 %. Cette faible teneur peut expliquer son pH relativement moins élevé par rapport aux autres sites. La relation entre calcaire, carbonates et alcalinité est bien connue dans les sols des zones sèches (IUSS Working Group WRB, 2022 ; FAO et ITPS, 2021).

La matière organique est faible dans l'ensemble des sites, avec 1,44 % au site 1, 2,10 % au site 2, 1,51 % au site 3 et 2,23 % au site 4. Ces faibles valeurs sont caractéristiques des sols arides, où la production végétale est limitée et où la minéralisation peut être rapide sous l'effet de la chaleur (Naylor et al., 2020 ; Weber et al., 2022).

Le site 4 présente la teneur la plus élevée en matière organique, avec 2,23 %. Cette valeur peut être liée à la texture plus fine du sol, qui protège mieux la matière organique contre la décomposition rapide et favorise son accumulation. La présence d'argile et de limons améliore généralement la rétention du carbone organique dans le sol (Naylor et al., 2020 ; IUSS Working Group WRB, 2022).

Le carbone organique est également plus élevé au site 4, avec 1,3 %, suivi du site 3 avec 1,22 %, du site 1 avec 0,88 % et du site 2 avec 0,59 %. Cette distribution montre que le site 4 possède une meilleure réserve carbonée, ce qui peut soutenir l'activité microbienne et la formation des croûtes biologiques (Naylor et al., 2020 ; Weber et al., 2022).

La faible teneur en carbone organique du site 2, malgré une matière organique relativement élevée, peut être liée à l'hétérogénéité des échantillons ou aux méthodes analytiques utilisées. Dans les sols arides, la répartition de la matière organique est souvent très variable à petite échelle (Naylor et al., 2020 ; Weber et al., 2022).

L'humidité varie entre 9,33% et 14,41%. Le site 4 présente la valeur la plus élevée, avec 14,41%, suivi du site 3 avec 11,33%, du site 1 avec 9,9 % et du site 2 avec 9,33 %. Une humidité plus élevée peut stimuler l'activité microbienne, mais elle peut aussi favoriser certains groupes comme les champignons selon les conditions du milieu (Cantón et al., 2020 ; Naylor et al., 2020).

Le site 4, correspondant au sol alluvionnaire de Guerrara, présente l'humidité la plus élevée. Cette situation peut expliquer une activité biologique particulière dans ce site.

En reliant ces résultats physico-chimiques aux résultats microbiologiques précédents, le site 4 de Guerrara semble offrir des conditions favorables au développement des bactéries, actinomycètes et cyanobactéries grâce à sa texture fine, sa teneur élevée en calcaire, sa matière organique relativement plus importante et sa faible conductivité électrique. Ces conditions peuvent favoriser la stabilité de la croûte biologique et l'activité microbienne superficielle. (Weber et al., 2022 ; Xiao et al., 2023).

Les sites d'Ouargla, surtout les sites 1, 2 et 3, sont plus sableux et présentent une conductivité électrique plus élevée. Ces caractéristiques peuvent limiter la rétention de l'eau et accentuer le stress hydrique ou salin, ce qui peut expliquer une activité microbienne plus variable selon les groupes étudiés (Cantón et al., 2020 ; FAO et ITPS, 2021).

2. Caractéristiques biochimiques

Les résultats du dosage de la chlorophylle totale dans les croûtes biologiques des trois sites d'étude sont présentés dans la (Figure 10).

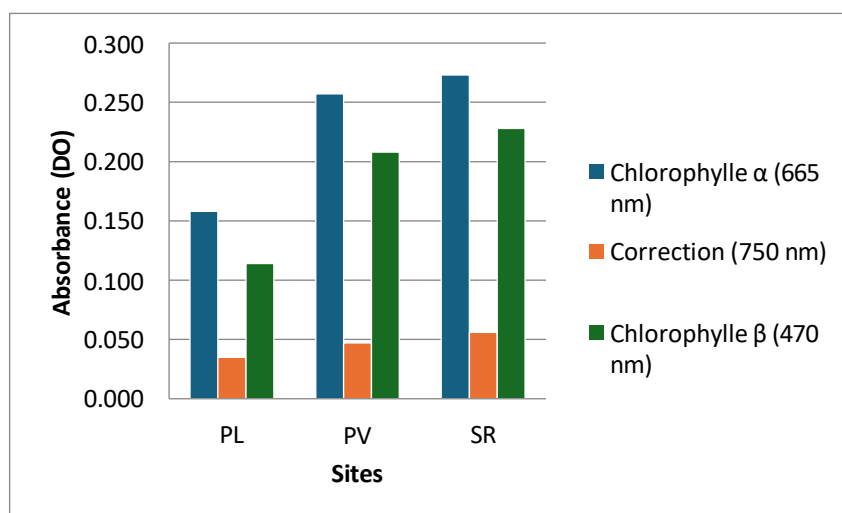


Figure 10. Histogramme représentant les valeurs du dosage de la chlorophylle totale dans les croûtes biologiques des sites de la région de Ouargla

L'histogramme représente les valeurs d'absorbance des pigments chlorophylliens mesurées dans trois sites : PL, PV et SR. Les mesures concernent la chlorophylle α à 665 nm, la correction à 750 nm et la chlorophylle β à 470 nm. L'absorbance permet d'estimer

indirectement la quantité de pigments photosynthétiques présents dans les échantillons. Plus l'absorbance est élevée, plus la teneur en pigments est importante.

Les résultats montrent que la chlorophylle α présente les valeurs les plus élevées dans les trois sites. Elle passe d'environ 0,158 DO dans PL à 0,257 DO dans PV, puis atteint son maximum dans SR avec 0,273 DO. Cette évolution indique que le site SR possède la plus forte biomasse photosynthétique, suivi du site PV, tandis que le site PL présente la valeur la plus faible.

La chlorophylle β , mesurée à 470 nm, suit la même tendance. Elle est plus faible dans PL, avec environ 0,114 DO, puis augmente dans PV avec 0,208 DO, et atteint sa valeur maximale dans SR avec 0,228 DO. Cette augmentation confirme que les sites PV et surtout SR contiennent une quantité plus importante de pigments associés aux organismes photosynthétiques.

La correction à 750 nm reste faible dans les trois échantillons. Elle est d'environ 0,035 DO pour PL, 0,047 DO pour PV et 0,056 DO pour SR. Cette mesure sert généralement à corriger l'effet de la turbidité ou des particules en suspension dans l'extrait. Le fait que ces valeurs soient faibles par rapport aux absorbances mesurées à 665 nm et 470 nm montre que les résultats sont principalement liés à la présence réelle de pigments, et non seulement à la présence de particules ou d'impuretés.

Globalement, l'ordre décroissant des sites selon la richesse en pigments chlorophylliens est :

SR > PV > PL

Cette tendance montre que le site SR présente les conditions les plus favorables au développement des organismes phototrophes des croûtes biologiques, comme les cyanobactéries, les algues et éventuellement les mousses ou lichens. La forte teneur en chlorophylle peut traduire une croûte biologique plus active, plus mature ou mieux développée.

Le site PV présente également des valeurs élevées, ce qui indique une activité photosynthétique importante. Cette situation peut être liée à une meilleure disponibilité en matière organique, une humidité suffisante ou des conditions de culture plus favorables à la biomasse microbienne.

En revanche, le site PL montre les plus faibles valeurs d'absorbance. Cela peut indiquer une biomasse photosynthétique plus réduite, probablement en raison d'une faible humidité, d'une

moindre teneur en matière organique, d'une perturbation du sol ou de conditions moins favorables au développement des croûtes biologiques.

3. Caractéristiques microbiologiques des sols étudiés

Les densités microbiennes des différents groupes microbiens sont représentées dans le tableau 3.

Tableau 3. Résultats des analyses microbiologiques du sol

UFC.g ⁻¹ .s.s	PL	PV	SR	GR I	GR II	GR III
Bactéries (x 10⁴)	1,74	4,77	1,50	23,10	53,15	57,80
Champignons (x 10⁴)	11,09	8,82	39,47	11,5	9,22	4,58
Actinomycète(x10⁴)	1,47	5,51	2,25	50,86	57,80	30,04
Azotobacter(x10⁴)	8,50	19,48	12,78	14,08	18,73	7,84
Cyanobactérie bg11(x10⁴)	8,87	8,08	1,87	34,69	39,27	43,92
Cyanobactérie bg110(x10⁴)	10,72	5,14	4,88	10,82	43,92	39,27

Les résultats microbiologiques montrent une différence nette entre les stations de Ouargla, représentées par PL, PV et SR, et les stations de Guerrara, représentées par GR I, GR II et GR III. Cette variation peut être expliquée par les caractéristiques physico-chimiques du sol, notamment la texture, le pH, la conductivité électrique, le calcaire total, la matière organique, le carbone organique et l'humidité. Ces paramètres contrôlent fortement l'installation et l'activité des microorganismes des croûtes biologiques dans les sols arides (Cantón et al., 2020 ; Weber et al., 2022).

3.1. Bactéries

La densité bactérienne est faible à Ouargla, avec $1,74 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ s.s. en PL, $4,77 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ s.s en PV et $1,50 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ s.s en SR (figure 11).

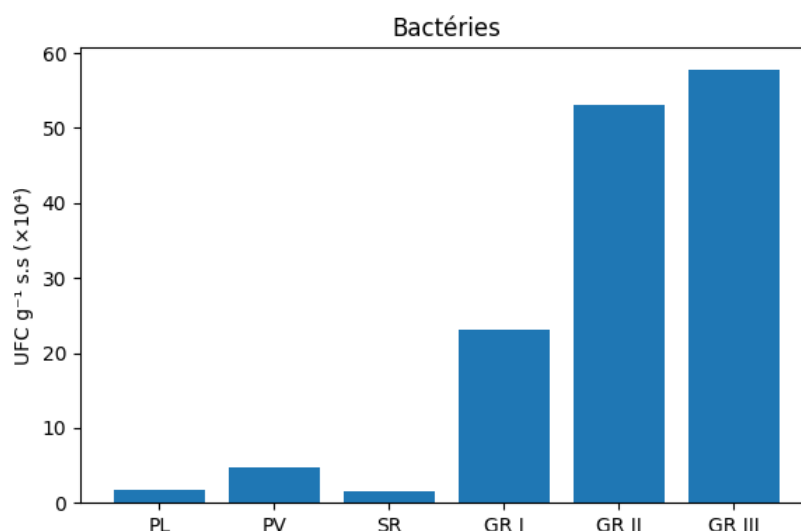


Figure 11. Densité des bactéries dans les deux sols

Cette faible abondance peut être liée à la texture sableuse des sols, qui réduit la capacité de rétention en eau et en nutriments. La station PV présente toutefois la valeur bactérienne la plus élevée parmi les sites d'Ouargla, probablement en relation avec sa matière organique relativement plus élevée, 2,10 % (Naylor et al., 2020 ; Cantón et al., 2020).

À Guerrara, les bactéries atteignent des valeurs nettement supérieures, avec $23,10 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ s.s en GR I, $53,15 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ s.s en GR II et $57,80 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ s.s en GR III. Cette forte densité bactérienne peut être favorisée par la texture argilo-limoneuse du site 4, sa teneur plus élevée en matière organique, 2,23 %, et son humidité plus importante, 14,41 %. Ces conditions créent un milieu plus favorable à l'activité bactérienne dans les croûtes biologiques (Weber et al., 2022 ; Naylor et al., 2020).

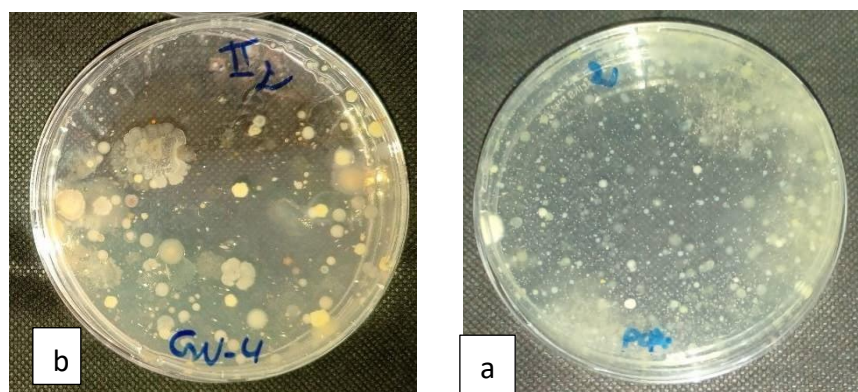


Figure 12. Les différentes formes de colonies obtenues d'une culture des bactéries sur milieu solide (a :sol de Ouargla, b :sol de Guerrara)

3.2. Champignons

Les champignons présentent leur valeur maximale en SR, avec $39,47 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ s.s (figure 13).

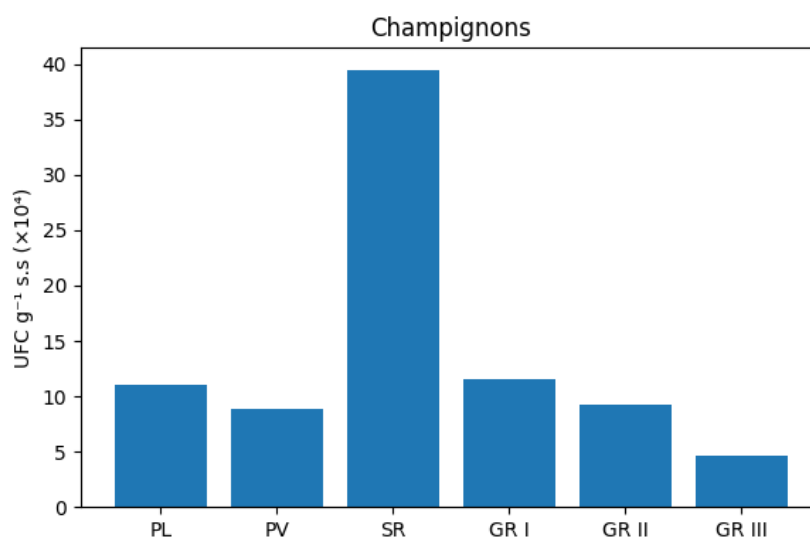


Figure 13. Densité des champignons dans les deux sols

Cette abondance peut être liée à l'humidité relativement élevée du site 3, 11,33 %, et à sa teneur élevée en carbone organique, 1,22 %. Les champignons sont capables de mieux résister aux contraintes hydriques que plusieurs groupes bactériens et participent à la stabilisation du sol grâce à leurs hyphes (Naylor et al., 2020 ; Weber et al., 2022).

Dans la station de Guerrara, les champignons sont moins abondants, avec $11,5 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ s.s en GR I, $9,22 \times 10^4$ en GR II et $4,58 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ s.s en GR III. Cette diminution peut indiquer que les conditions du site 4 favorisent davantage les bactéries, les actinomycètes et les cyanobactéries que les champignons. La faible conductivité électrique du site 4, 0,56 dS/m, peut aussi réduire le stress salin et favoriser d'autres groupes microbiens plus sensibles (FAO & ITPS, 2021 ; Weber et al., 2022).

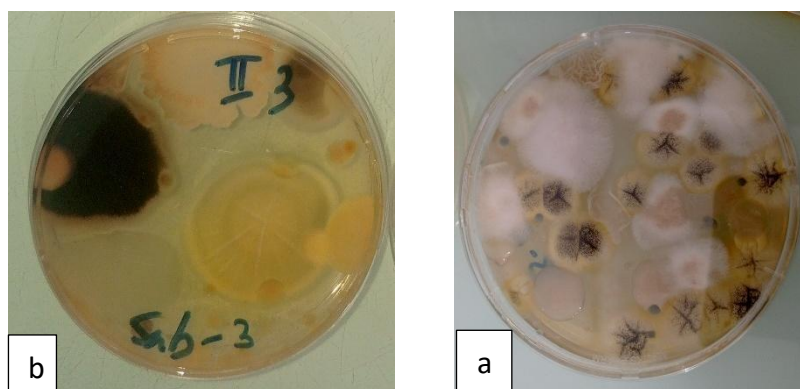


Figure 14. Les différentes formes de colonies de la microflore fongique, développées sur milieu solide Sabouraud (a :sol de Ouargla, b :sol de Guerrara)

3.3. Actinobactéries

Les actinobactéries sont peu représentées dans les stations de Ouargla, avec $1,47 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ s.s en PL, $5,51 \times 10^4$ en PV et $2,25 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ s.s en SR (figure 15).

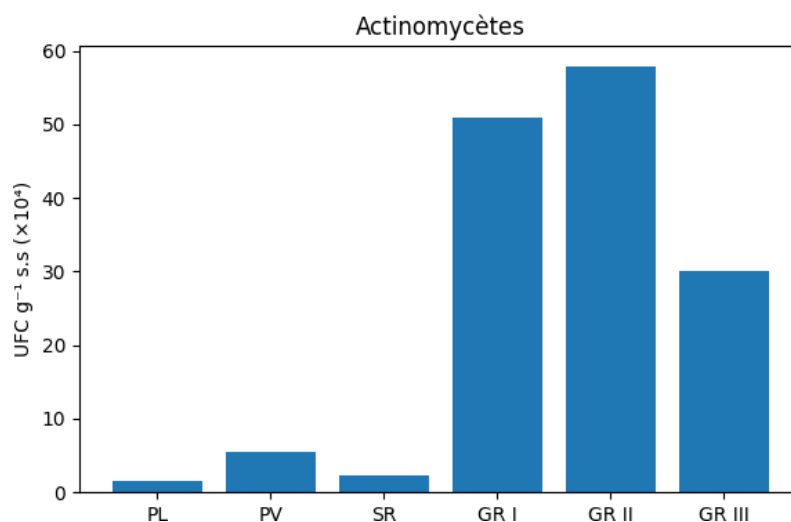


Figure 15. Densité des actinomycètes dans les deux sols

Leur valeur maximale à Ouargla est observée en PV, ce qui peut être lié à la matière organique plus élevée de ce site, 2,10 %, et à son pH légèrement alcalin, 7,87. Les actinomycètes sont généralement favorisés par les sols bien aérés, secs à modérément humides et neutres à alcalins (Naylor et al., 2020 ; IUSS Working Group WRB, 2022).

À Guerrara, les actinomycètes présentent des valeurs très élevées, avec $50,86 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ s.s en GR I, $57,80 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ s.s en GR II et $30,04 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ s.s en GR III. Cette abondance peut être expliquée par le pH alcalin du site 4, 8,66, sa forte teneur en calcaire total, 12,04 %, et sa texture fine. Ces conditions sont favorables aux actinomycètes, qui jouent un rôle important dans la dégradation de la matière organique complexe dans les sols arides. (Weber et al., 2022 ; IUSS Working Group WRB, 2022).

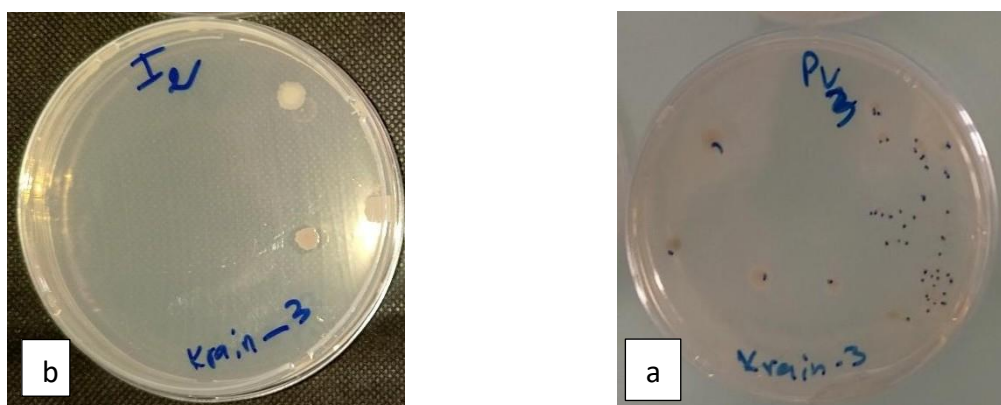


Figure 16. Colonie obtenue d'une culture d'Actinomycètes sur milieu solide (a :sol de Ouargla, b :sol de Guerrara)

3.4. *Azotobacter*

Les *Azotobacter* sont plus abondants en PV, avec $19,48 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ s.s., par rapport à PL, $8,50 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ s.s, et SR, $12,78 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ s.s (figure 17).

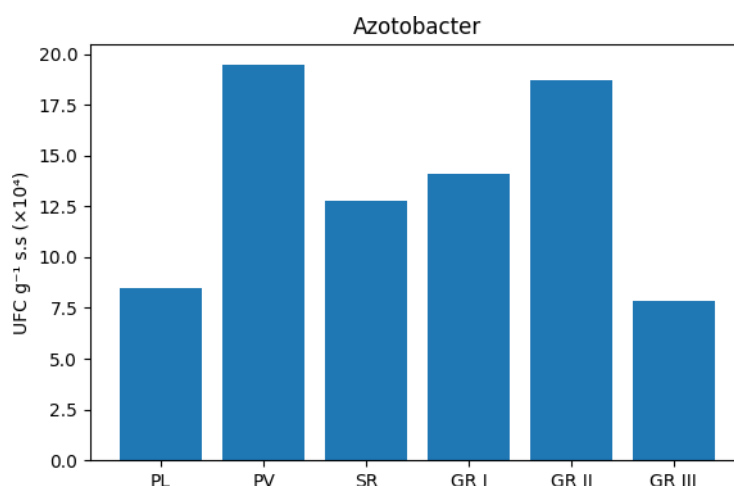


Figure 17. Densité des *Azotobacter* dans les deux sols

Cette valeur élevée peut être liée à la matière organique relativement importante du site 2, 2,10 %, qui fournit une source de carbone nécessaire au développement de ces bactéries libres fixatrices d'azote. *Azotobacter* joue un rôle important dans l'enrichissement biologique du sol en azote, surtout dans les sols cultivés pauvres en nutriments (Naylor et al., 2020 ; Weber et al., 2022).

À Guerrara, les *Azotobacter* sont surtout représentés en GR II, avec $18,73 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ s.s., tandis que GR III présente une valeur plus faible, $7,84 \times 10^4$. Cette différence montre que la richesse bactérienne totale ne signifie pas toujours une forte abondance d'*Azotobacter*. L'abondance de ce groupe dépend aussi de la disponibilité en carbone organique, de l'aération du sol, du pH et de la salinité. (Naylor et al., 2020 ; FAO et ITPS, 2021).



Figure 18. Colonie obtenue d'une culture d'*Azotobacter* sur milieu solide (a : sol de Ouargla, b : sol de guerrara)

3.5. Cyanobactéries

Cyanobactéries cultivées sur milieu BG11

Sont faibles à Ouargla, avec $8,87 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ s.s en PL, $8,08 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ s.s en PV et $1,87 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ s.s en SR (figure 19). Cette faible abondance, surtout en SR, peut être liée à la texture très sableuse du site 3, qui contient 47,41 % de sable grossier. Les sols très sableux sont souvent moins favorables à la fixation durable des croûtes cyanobactériennes, car ils retiennent moins l'eau et les particules fines (Cantón et al., 2020 ; Weber et al., 2022).

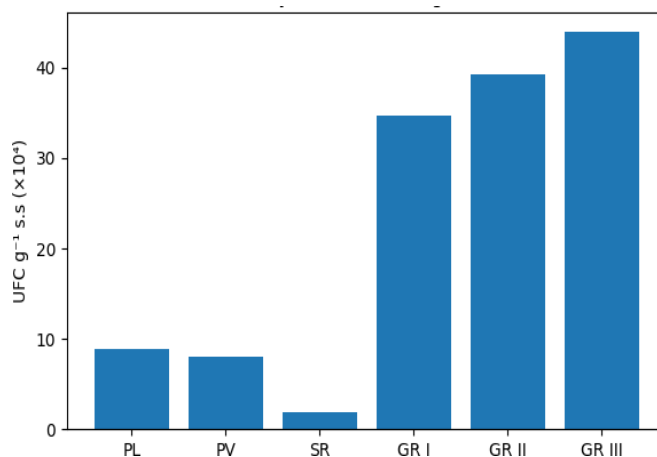


Figure 19. Densité des cyanobactéries bg 11 dans les deux sols étudiés

À Guerrara, les cyanobactéries BG11 sont beaucoup plus abondantes, avec $34,69 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ s.s en GR I, $39,27 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ s.s en GR II et $43,92 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ s.s en GR III. Cette forte présence peut être expliquée par la texture fine du site 4, qui favorise la rétention d'eau et la stabilité de la surface. Les cyanobactéries sont des organismes clés des croûtes biologiques, car elles produisent des substances extracellulaires capables de lier les particules du sol (Weber et al., 2022 ; Xiao et al., 2023).

Cyanobactéries cultivées sur milieu BG11₀

Présentent une valeur relativement élevée en PL, avec $10,72 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ s.s. Le milieu BG11₀ ne contient pas d'azote combiné, ce qui suggère la présence de cyanobactéries potentiellement fixatrices d'azote. Cette caractéristique peut être importante dans les sols arides pauvres en azote disponible. (Weber et al., 2022 ; Naylor et al., 2020).

A Guerrara, les valeurs de cyanobactéries BG11₀ sont très élevées en GR II, $43,92 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ s.s, et en GR III, $39,27 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ s.s. (figure 20).

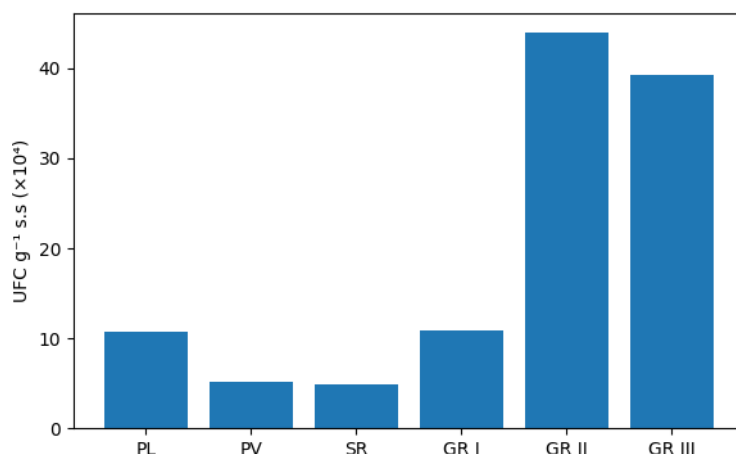


Figure 20. Densité des cyanobactéries bg 11₀ dans les deux sols étudiés

Ces résultats indiquent une forte présence possible de cyanobactéries diazotrophes dans les croûtes biologiques de Guerrara. Cette abondance peut être favorisée par la texture argileuse et limoneuse, l'humidité plus élevée et la faible conductivité électrique du site 4 (Cantón et al., 2020 ; Weber et al., 2022).

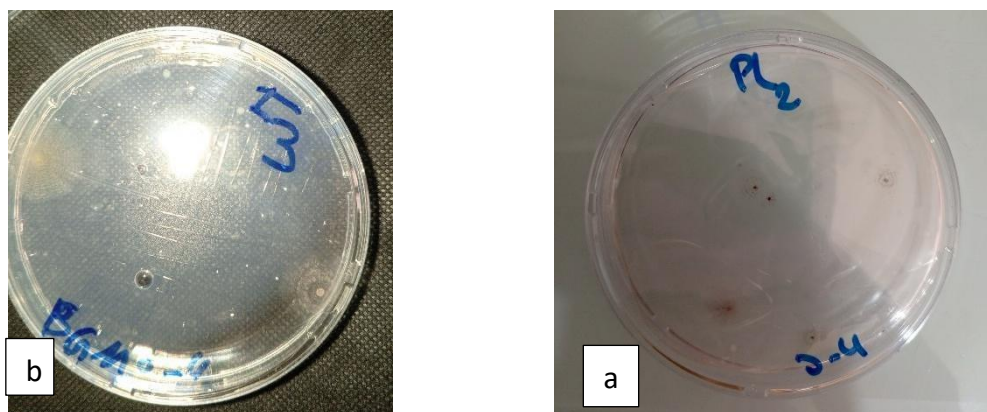


Figure 21. Aspect macroscopique des cyanobactéries sur milieu solide (a :sol de Ouargla, b :sol de guerrara)

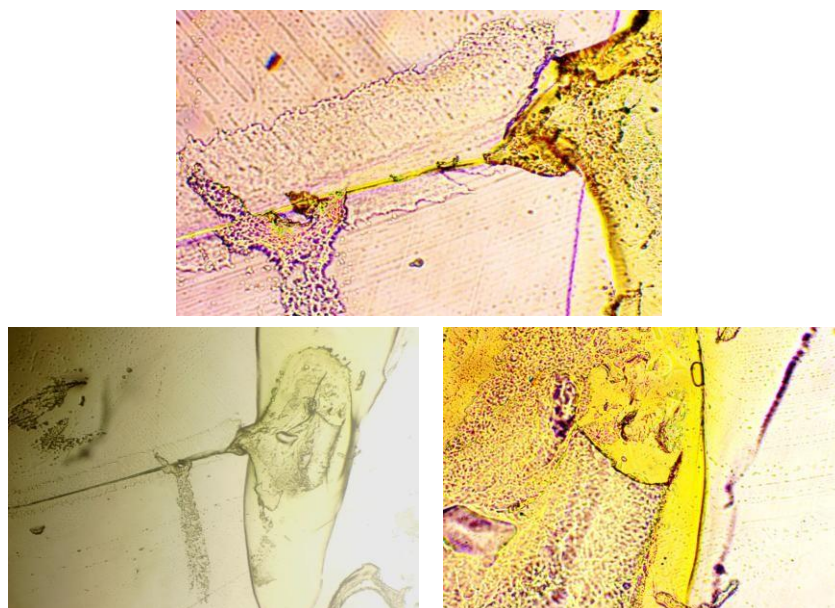


Figure 22. Aspect microscopique des cyanobactéries sur milieu solide (a :sol de Ouargla, b :sol de guerrara)

4. Caractéristiques de la biomasse microbienne des sols étudiés

Les résultats de la biomasse microbienne ($C_{\text{microbien}}$ et $N_{\text{microbien}}$) du sol sous les différents systèmes de culture étudiés sont représentés dans le tableau 4.

Tableau 4. Résultats de la biomasse microbienne ($C_{\text{microbien}}$ et $N_{\text{microbien}}$) du sol sous les différents systèmes de culture étudiés

Site	$N_{\text{microbien}}$ (mg N.kg ⁻¹ de s.s)	$C_{\text{microbien}}$ (mg C.kg ⁻¹ de s.s)
PL	16,09	311
PV	18,52	222
SR	8,63	89

Les résultats de la biomasse microbienne calculée par la méthode de fumigation-extraction montrent une variation entre les trois sites étudiés : PL, PV et SR. Cette variation concerne à la fois la biomasse microbienne azotée et la biomasse microbienne carbonée.

Pour la biomasse microbienne azotée, la valeur la plus élevée est observée au niveau du site PV, avec $18,52 \text{ mg N.kg}^{-1}$ de s.s. Cela indique que ce site présente une activité microbienne plus importante liée au cycle de l'azote. Cette richesse peut être expliquée par des conditions plus favorables au développement des microorganismes, comme une meilleure disponibilité en matière organique, une bonne aération du sol ou une humidité suffisante.

Le site PL présente également une biomasse microbienne azotée importante, avec une valeur de $16,09 \text{ mg N.kg}^{-1}$ de s.s. Cette valeur montre que ce site possède une activité microbienne relativement élevée, mais légèrement inférieure à celle de PV. Cela peut traduire une disponibilité modérée en nutriments et une population microbienne active.

Le site SR enregistre la valeur la plus faible de biomasse microbienne azotée, avec $8,63 \text{ mg N.kg}^{-1}$ de s.s.. Cette faible valeur peut indiquer une activité microbienne plus limitée dans ce site. Elle peut être liée à des conditions moins favorables, comme une faible disponibilité en azote, une matière organique moins accessible, un stress hydrique ou une salinité plus marquée.

Concernant la biomasse microbienne carbonée, la valeur la plus élevée est observée au niveau du site PL, avec 311 mg C.kg^{-1} de s.s.. Cela montre que ce site possède la plus grande quantité de carbone contenu dans la biomasse microbienne. Cette valeur peut refléter une meilleure activité des microorganismes hétérotrophes utilisant le carbone organique comme source d'énergie.

Le site PV présente une valeur intermédiaire de biomasse microbienne carbonée, avec 222 mg C.kg^{-1} de s.s. Cette valeur indique une activité microbienne carbonée modérée. Même si PV possède la biomasse azotée la plus élevée, sa biomasse carbonée reste inférieure à celle de PL, ce qui peut traduire une différence dans la composition ou l'activité des communautés microbiennes.

Le site SR présente encore une fois la valeur la plus faible, avec 89 mg C.kg^{-1} de s.s. Cela confirme que ce site est le moins favorable au développement de la biomasse microbienne, aussi bien pour le carbone que pour l'azote. Cette faible biomasse peut être liée à des contraintes environnementales limitant l'activité microbienne.

Conclusion

Conclusion

Les croûtes biologiques des sols constituent une composante écologique essentielle des écosystèmes arides, particulièrement dans les agrosystèmes sahariens où les contraintes environnementales (faible disponibilité en eau, pauvreté en matière organique, salinité et températures élevées) limitent fortement l'activité biologique des sols. Le présent travail avait pour objectif de caractériser la biomasse microbienne et l'activité biologique des croûtes biologiques présentes dans des sols cultivés de deux régions sahariennes, Ouargla (Hassi Ben Abdallah) et Ghardaïa (Guerrara), à travers une approche combinant des analyses physico-chimiques, microbiologiques et biochimiques.

Les résultats obtenus ont montré des différences importantes entre les sites étudiés. Les sols de la région de Ouargla présentent globalement une texture sableuse et une faible teneur en matière organique, caractéristiques des environnements sahariens soumis à une forte pression climatique et anthropique. En revanche, la station de Guerrara se distingue par une texture plus fine, une humidité plus élevée et une teneur plus importante en matière organique, offrant ainsi des conditions plus favorables au développement des communautés microbiennes.

L'étude microbiologique a mis en évidence la richesse biologique des croûtes étudiées. Les dénombrements microbiens ont révélé une présence significative des bactéries, champignons, actinomycètes, cyanobactéries et *Azotobacter*, avec une variabilité selon les conditions propres à chaque station. La station de Guerrara présente globalement une abondance microbienne plus importante, notamment pour les bactéries, actinomycètes et cyanobactéries. Les stations de Hassi Ben Abdallah montrent quant à elles une distribution plus hétérogène de la microflore, liée aux différences de pratiques culturales et aux caractéristiques locales des sols.

Les résultats obtenus montrent également une différenciation fonctionnelle entre les sites étudiés. La station PV se caractérise par une biomasse azotée plus importante et une forte présence d'*Azotobacter*, traduisant un potentiel intéressant de fixation biologique de l'azote. La station PL présente une biomasse carbonée élevée ainsi qu'une présence notable de cyanobactéries, organismes capables de contribuer à l'enrichissement du sol en carbone organique et à la stabilisation de sa surface par la production d'exopolysaccharides. La station SR se distingue par une dominance fongique et une activité microbienne relativement plus faible.

L'approche biochimique basée sur le dosage des pigments chlorophylliens a permis de compléter l'évaluation de l'activité biologique des croûtes. Les résultats montrent une variation des teneurs en chlorophylles α et β selon les sites. La station SR présente les valeurs les plus élevées, suivie par PV, alors que PL présente les plus faibles teneurs. Cette tendance traduit une activité photosynthétique plus importante au niveau de SR et souligne l'importance des organismes phototrophes, notamment les cyanobactéries et microalgues, dans le fonctionnement des croûtes biologiques.

Ainsi, cette étude confirme que les croûtes biologiques représentent de véritables réservoirs microbiens et biochimiques dans les sols arides cultivés. Elles jouent un rôle majeur dans les cycles biogéochimiques, l'amélioration de la fertilité des sols, la fixation du carbone et de l'azote, ainsi que dans la stabilité structurale des horizons superficiels face aux processus de désertification. Leur préservation apparaît donc comme un élément important pour maintenir la durabilité des agroécosystèmes sahariens.

Perspectives

Afin d'approfondir la compréhension du fonctionnement des croûtes biologiques dans les milieux arides, plusieurs perspectives peuvent être envisagées :

Réaliser une caractérisation moléculaire des communautés microbiennes par des approches de séquençage (métabarcoding, métagénomique) afin d'identifier précisément la diversité taxonomique et fonctionnelle des microorganismes associés aux croûtes biologiques.

Étudier la dynamique saisonnière de la biomasse microbienne et de l'activité photosynthétique afin de mieux comprendre l'effet des variations climatiques, notamment les cycles humidité–dessiccation, sur le fonctionnement des communautés crustales.

Évaluer l'activité enzymatique des sols (déshydrogénase, phosphatase, uréase, β -glucosidase) afin de mieux caractériser les processus de transformation du carbone, de l'azote et du phosphore.

Approfondir l'étude du rôle des cyanobactéries et des microorganismes fixateurs d'azote dans l'amélioration de la fertilité des sols sahariens et leur potentiel d'utilisation comme biofertilisants.

Étudier l'effet des pratiques agricoles (travail du sol, amendements organiques, irrigation raisonnée) sur la conservation et la restauration des croûtes biologiques dans les agrosystèmes soumis à la dégradation.

Mettre en place des stratégies de conservation des croûtes biologiques comme outil écologique de lutte contre l'érosion, la désertification et la perte de qualité des sols dans les régions sahariennes.

En perspective, les croûtes biologiques pourraient constituer une piste prometteuse dans les programmes de gestion durable des sols arides, en valorisant leurs fonctions naturelles pour améliorer la résilience des systèmes agricoles face aux changements environnementales.

Références bibliographiques

1. Bazzine, M., & Hamdi Aissa, B. (2014). Étude des croûtes biologiques de quelques sols gypseux et salins du milieu saharien : Cas de la cuvette de Ouargla. *Algerian Journal of Arid Environment (AJAE)*, 4(4), 45–52.
2. Belnap, J. (2006). The potential for biological soil crusts to act as bioindicators of regional condition. *Environmental Monitoring and Assessment*, 115, 167–181.
3. Belnap, J., Prasse, R., & Harper, K. T. (2001). Influence of biological soil crusts on soil environments and vascular plants. In *Biological soil crusts: Structure, function, and management*, 281–300.
4. Belnap, J., & Lange, O. L. (2003). *Biological soil crusts: Structure, function, and management*. Springer.
5. Belnap, J., & Lange, O. L. (Eds.). (2003). *Biological soil crusts: Structure, function, and management*. Springer Science & Business Media.
6. Benaziza, A., Bouhoun, M., & Slimani, M. (2023). Characterization of biological soil crusts in the northern Algerian Sahara. *Arid Land Research and Management*, 37(2), 185–201. <https://doi.org/10.1080/15324982.2022.2145678>
7. Benbrahim, K., & Eddoud, A. (2020). Caractérisation bio-écologique de la flore de succession des périmètres céréaliers abandonnés dans la région de Hassi Benabdallah-Ouargla (Sahara, Algérie). *Algerian Journal of Arid Environment*, 10(2), 91–102.
8. Benras Moussa, M. (2026). *Caractérisation sédimentologique et dynamique des dépôts de surface de la cuvette de Ouargla* (Thèse de doctorat). Université Kasdi Merbah Ouargla.
9. Benzaid, F., & Souigat, H. (2025). Étude morphologique et fonctionnelle de cyanobactéries isolées des croûtes biologiques de milieux arides et semi-arides d'Algérie. Mémoire de Master, UKMO.
10. Dacal, M., Bradford, M. A., Plaza, C., García-Palacios, P., & Maestre, F. T. (2020). Soil microbial biomass and activity responses to climate change and dryland degradation. *Nature Climate Change*, 10(4), 345–352. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0835-9>
11. Fierer, N., Wood, S. A., & De Mesquita, C. P. B. (2021). How much do we know about the soil microbiome and its role in agricultural sustainability? *Current Opinion in Biotechnology*, 70, 230–235.
12. García-Pichel, F. (2023). The microbiology of biological soil crusts: An overview of multifunctionality. *Annual Review of Microbiology*, 77, 257–285.
13. Gufwan, L. A., Peng, L., Gufwan, N. M., Lan, S., & Wu, L. (2025). Enhancing soil health through biocrusts: A microbial ecosystem approach for degradation control and restoration. *Microbial Ecology*, 88(1), 8.
14. Huang, H. Y., Tian, D., Zhou, L. H., Su, H., Ma, S., Feng, Y., Tang, Z., Zhu, J., Ji, C., Fang, J., & Liu, L. (2022). Effects of afforestation on soil microbial diversity and enzyme activity: A meta-analysis. *Geoderma*, 423, 115961.
16. Hui, R., Zhao, R. M., & Li, X. (2022). Effect of snow cover on water content, carbon and nutrient availability, and microbial biomass in biological soil crusts. *Geoderma*, 406, 115505.

17. Idder, T., Idder, M. A., Pintos, R. M., & Hamidou, M. (2023). Typologie des oasis algériennes : pour une meilleure considération de ces espaces fertiles dans un milieu aride. *VertigO*, 23(1), 1–22.
17. Kaboul, A. (2015). *Étude des croûtes biologiques des sols des zones arides (Ouargla et El Oued)*. Mémoire de Master, Université d'Ouargla, 67p.
18. Kadi, A., Halilat, M. T., & Chenchouni, H. (2021). Microbial biomass carbon and soil respiration under different land-use systems in arid ecosystems of Algeria. *Journal of Arid Environments*, 191, 104523.
19. Khosravi, H., Abdi, O., Kiani, F., Karimi, H., & Emadi, A. (2023). Soil quality index (SQI) assessment framework integrating biological crust indicators in temperate deserts. *Journal of Arid Environments*, 215, 104991.
20. Kidron, G. J., & Drahorad, S. L. (2022). Biocrust-induced extracellular polymeric substances are responsible for dune stabilization. *Land Degradation & Development*, 33(3), 425–438.
21. Korichi, R. (2021). *Contribution à la caractérisation du peuplement de Mantodea de quelques milieux sahariens*. Thèse de doctorat, Université d'Ouargla.
22. Krime, K. (2022). *Évaluation de la salinité des eaux souterraines utilisées en irrigation : Cas de la cuvette de Ouargla*. Mémoire, Université d'Ouargla.
23. Lemkeddem, F. E., & Hamlaoui, O. S. (2016). *Biomasse et activité microbienne du sol sous systèmes oasiens dans la région de Ouargla*. Mémoire de Master, Université d'Ouargla.
24. Maestre, F. T., Delgado-Baquerizo, M., Jeffries, T. C., et al. (2022). Grazing and global change drivers impact biocrust multifunctionality globally. *Science*, 378(6619), 412–417. <https://doi.org/10.1126/science.abm7838>
25. Mehda, S., Muñoz-Martín, M. Á., Oustani, M., et al. (2021). Microenvironmental conditions drive cyanobacterial community composition of biocrusts from the Sahara Desert. *Microorganisms*, 9(3), 487.
26. Melouah, O. (2020). *Investigation géophysique et géologique des structures karstiques du Sahara septentrional*. Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla.
27. MICLAT. (2024). *Présentation des wilayas de l'Algérie et découpage administratif national*. Ministère de l'Intérieur, des Collectivités Locales et de l'Aménagement du Territoire.
28. PDAU Ouargla. (2020). *Plan directeur d'aménagement et d'urbanisme de la ville d'Ouargla*. Wilaya d'Ouargla.
29. Rodriguez-Caballero, E., et al. (2018). Global ecosystem services provided by biological soil crusts. *Nature Geoscience*, 11(6), 403–411. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0145-2>
30. Rodriguez-Caballero, E., Stanelle, T., et al. (2022). Global cycling and climate effects of aeolian dust controlled by biological soil crusts. *Nature Geoscience*, 15(6), 458463. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00942-1>
31. Saddouki, F., & Salmi, S. (2017). *Caractérisation de l'impact de paramètres hydro-édaphiques sur les dattes Deglet Nour*. Thèse, Université de Ouargla.

32. Slimani, M. (2022). *Rôle des communautés microbiennes des croûtes biologiques dans la restauration des sols sahariens*. Université d'Ouargla.
33. Weber, B., et al. (2022). Biological soil crusts as core ecological infrastructure for dryland restoration. *Earth-Science Reviews*, 243, 104516. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104516>
34. Weber, B., et al. (2022). What is a biocrust? A refined definition for a broadening research community. *Biological Reviews*, 97(5), 1768–1785. <https://doi.org/10.1111/brv.12862>
35. Djili, B. and Hamdi-Aissa, B. 2018. Characteristics and mineralogy of desert alluvial soils: Wadi Zegrir, Northern Sahara of Algeria. *Arid Land Res. Manage.* 32 (1), 1–19 (2018). <https://doi.org/10.1080/15324982.2017.13844>

Annexe I

Tableau 01. Echelle d'interprétation de pH -extrait 1/2,5 (Aubert, 1978)

pH	Interprétation
> 9	Sols très alcalins
8,5 < pH < 9	Sols fortement alcalins
7,9 < pH < 8,4	Sols moyennement alcalins
7,4 < pH < 7,8	Sols légèrement alcalins
6,6 < pH < 7,3	Sols très légèrement acides
6,0 < pH < 6,5	Sols légèrement acides
5,6 < pH < 6	Sols moyennement acides
5,0 < pH < 5,5	Sols fortement acides
4,5 < pH < 5	Sols très fortement acides
< 4,5	Sols extrêmement acides

Tableau 02. Appréciation de la teneur en matière organique (AUBERT, 1978).

Matière organique %	Nom de classe
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 03. Echelle d'interprétation du Calcaire total (BAISE, 2000)

CaCO ₃ total	Horizon
CaCO ₃ < 1	Horizon non calcaire
1 < CaCO ₃ < 5	Horizon peu calcaire
5 < CaCO ₃ < 25	Horizon modérément calcaire
25 < CaCO ₃ < 50	Horizon fortement calcaire
50 < CaCO ₃ < 80	Horizon très calcaire
80 < CaCO ₃	Horizon excessivement calcaire

Tableau 04. Echelle de salinité en fonction de la conductivité électrique de l'extrait 1/5
(AFNOR, 1999)

CE (dS/m)	Degré de salinité
<0.6	Sol non salé
0.6<CE<2	Sol peu salé
2<CE<2.4	Sol salé
2.4<CE<6	Sol très salé
CE>6	Sol extrêmement salé

Tableau 05. Echelle granulométrique

Taille	<5 µm	5 à 100 µm	100 à 200 µm	200 à 500 µm	0,5 à 1 mm
Classes	Argile	Limon fin	Limon grossier	Sable fin	Sable grossier

Annexe II

Milieux de culture

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

→Gélose nutritive.....	20 g
→ Eau distillé... ..	1000 ml

B. Milieu de culture pour actinomycètes : milieu de KRAINSKY (DUCHE, 1934)

D-Glucose (Dextrose) $C_6H_{12}O_6$	10g
L-Asparagine (monohydratée)= $C_4H_8N_2O_3 \cdot H_2O$	0.5g
Phosphate bi-potassique :di (K_2HPO_4).....	0.5g
Agar-agar.....	15g
Eau distillée	1000 ml
Ajusté à pH = 7	

C. Milieu de culture pour les champignons (milieu de Sabouraud)

Glucose	20g
Peptone.....	10g
Agar	20g
Eau distillée.....	1000 ml
pH.	6.5

D. Milieu de culture pour les Azotobacters (milieu Ashby)

Glucose	10g
K_2HPO_4	0.2g
$MgSO_4$	0.2g
K_2SO_4	0.1g
$CaCO_3$	5g
Gélose ou l'Agar... ..	15g
Eau distillée	1000 ml

E. Composition du milieu de culture des cyanobactéries BG11 et BG110 (Rippka et al., 1979)

Composants

$K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$	0.18 mM
Na_2 -EDTA.....	0.003mM
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	0.3mM
$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	0.25mM
$NaNO_3$	17.65mM
Acide citrique.....	0.029mM
Citrate d'ammonium ferrique	0.020mM
Na_2CO_3	0.19mM

Microéléments

H_3BO_3	46uM
$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	9.1uM
$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	0.7uM
$NaMoO_4 \cdot 2H_2O$	1.60uM
$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	0.32uM
$CoSO_4 \cdot 7H_2O$	0.17uM

Préparation de l'extrait de terre

On mélange à poids égal une terre de jardin avec de l'eau du robinet, à condition qu'elle ne soit pas excessivement chlorée, ou idéalement avec de l'eau de source ou de puits. Ce mélange doit macérer pendant 24 heures à température ambiante, puis être porté à l'autoclave pendant une heure à 130°C. Après décantation, on filtre le mélange à chaud sur papier, vérifie que le pH reste proche de la neutralité, puis on répartit l'extrait dans des récipients fermés par du coton avant de procéder à une stérilisation finale de 20 minutes à 112°C.

Résumé

Les croûtes biologiques des sols constituent une composante essentielle des écosystèmes arides, où elles participent au maintien de la fertilité, de la stabilité et du fonctionnement biologique des sols. Cette étude vise à caractériser la biomasse microbienne et l'activité biologique des croûtes biologiques dans des sols cultivés de deux régions sahariennes algériennes : Hassi Ben Abdallah (Ouargla) et Guerrara (Ghardaïa). La caractérisation a été réalisée à travers des analyses physico-chimiques, microbiologiques et biochimiques. Les paramètres étudiés concernent les propriétés du sol ainsi que le dénombrement des principales communautés microbiennes (bactéries, champignons, actinomycètes, cyanobactéries et *Azotobacter*) et l'évaluation de l'activité photosynthétique par le dosage des pigments chlorophylliens. Les résultats montrent que les sols de Ouargla sont généralement sableux et pauvres en matière organique, tandis que le site de Guerrara présente des conditions plus favorables au développement microbien. Une abondance plus élevée des bactéries, actinomycètes et cyanobactéries a été observée à Guerrara. Les stations de Ouargla présentent une variabilité microbienne selon les conditions locales, avec une forte présence d'*Azotobacter* dans la station PV et une biomasse carbonée importante dans la station PL. Le dosage des chlorophylles révèle une activité photosynthétique plus élevée dans la station SR. Cette étude met en évidence le rôle des croûtes biologiques comme réservoirs microbiens importants dans les sols arides cultivés et leur contribution à la durabilité des agroécosystèmes sahariens.

Mots clés : Croûtes biologiques, biomasse microbienne, activité photosynthétique, sols arides cultivés, Ouargla, Guerrara, Algérie.

Characterization of the Microbial Biomass of Biological Soil Crusts in Cultivated Soils of Arid Regions

Abstract

Biological soil crusts represent an essential component of arid ecosystems, where they contribute to soil fertility, stability, and biological functioning. This study aims to characterize the microbial biomass and biological activity of biological soil crusts in cultivated soils from two Algerian Saharan regions: Hassi Ben Abdallah (Ouargla) and Guerrara (Ghardaïa). The characterization was carried out through physicochemical, microbiological, and biochemical analyses. The studied parameters included soil properties, as well as the enumeration of major microbial communities (bacteria, fungi, actinomycetes, cyanobacteria, and *Azotobacter*) and the assessment of photosynthetic activity through chlorophyll pigment determination. The results showed that Ouargla soils are generally sandy and poor in organic matter, whereas the Guerrara site presents more favorable conditions for microbial development. Higher abundances of bacteria, actinomycetes, and cyanobacteria were observed in Guerrara. The Ouargla stations showed microbial variability according to local conditions, with a high presence of *Azotobacter* in the PV station and an important carbon biomass in the PL station. Chlorophyll analysis revealed higher photosynthetic activity in the SR station. This study highlights the role of biological soil crusts as important microbial reservoirs in cultivated arid soils and their contribution to the sustainability of Saharan agroecosystems.

Keywords: Biological soil crusts, microbial biomass, cyanobacteria, chlorophyll, cultivated arid soils, Ouargla, Guerrara, Algeria.

توصيف الكتلة الحيوية الميكروبية للقشور البيولوجية للتربة تحت الزراعة في المناطق الجافة

الملخص

تُعد القشور البيولوجية للتربة مكوناً أساسياً في الأنظمة البيئية الجافة، حيث تساهم في الحفاظ على خصوبة التربة واستقرارها ووظائفها الحيوية. تهدف هذه الدراسة إلى توصيف الكتلة الحيوية الميكروبية والنشاط الحيوي للقشور البيولوجية في الترب الزراعية بمنطقتين صحراويتين جزائريتين هما: حاسي بن عبد الله (ورقلة) ومدينة القارة (غرداية). تم إجراء هذا التوصيف من خلال مجموعة من التحاليل الفيزيائية والكيميائية والميكروبيولوجية والبيوكيميائية. شملت الدراسة خصائص التربة، بالإضافة إلى تعداد أهم المجتمعات الميكروبية (البكتيريا، الفطريات، الأكتينوميسيتات، السيانوبكتيريا و *Azotobacter*) وتقييم النشاط الضوئي من خلال قياس أصباغ الكلوروفيل. أظهرت النتائج أن ترب منطقة ورقلة تتميز عموماً بقوام رملي وفقير في المادة العضوية، بينما يتميز موقع القارة بظروف أكثر ملائمة لتطور الأحياء الدقيقة. كما سجلت وفرة أكبر للبكتيريا والأكتينوميسيتات والسيانوبكتيريا في محطة القارة. أما محطات ورقلة فقد أظهرت تبايناً في التركيب الميكروبي حسب الظروف المحلية، حيث تميزت محطة PV بوجود مرتفع لـ *Azotobacter* وارتفاع الكتلة الحيوية الأزوتية، في حين سجلت محطة PL كتلة حيوية كربونية مهمة. كما بين تحليل الكلوروفيل وجود نشاط ضوئي أعلى في محطة SR. تؤكد هذه الدراسة أن القشور البيولوجية تمثل خزانات ميكروبية مهمة في الترب الصحراوية المزروعة، وتساهم في استدامة النظم الزراعية الصحراوية.

الكلمات المفتاحية: القشور البيولوجية، الكتلة الحيوية الميكروبية، السيانوبكتيريا، الكلوروفيل، الترب الجافة المزروعة، ورقلة، القارة، الجزائر.