

Popular Democratic Republic of Algeria  
Ministry of High Education and Scientific Research  
Abbes Laghrou University- Khenchela-  
Natural and life sciences Faculty  
Molecular and Cellular Biology Department



N° de série : .....

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences de la nature et de la vie**

Filière : **Sciences Biologiques**

Spécialité : **Microbiologie appliquée**

*Présenté par :*

*Ilhem Sellaoui et Chirine Sabeg*

### Thème

Caractérisation des propriétés biotechnologiques des  
actinobactéries issues de la biodiversité autochtone des  
zones semi-arides

*Mémoire soutenu publiquement le 22/06/ 2025* Devant le jury composé de :

**Dr. Nassima LEULMI**

MCA, Université Abbes Laghrou Khenchela , Présidente

**Dr. Ryma MERABTI**

MCA, Université Abbes Laghrou Khenchela , Eencadrante

**Dr. Zakaria BOUTARFI**

MCB, Université Abbes Laghrou Khenchela, Examinateur

2024/2025

## REMERCIEMENTS

Avant tout, nous rendons grâce à Dieu Tout-Puissant, Le Clément, Le Miséricordieux, pour m'avoir accordé la santé, la patience et la force nécessaires à l'accomplissement de ce travail. Sans Sa volonté, rien n'aurait été possible.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à notre encadrante **Dr. MERABTI Ryma**, pour sa précieuse orientation, sa disponibilité et ses conseils éclairés tout au long de cette recherche. Son accompagnement bienveillant a été d'un grand soutien dans la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions sincèrement les membres du jury, **Dr. LEULMI Nassima** et **Dr. BOUTARFI Zakaria**, Maitres de Conférences A à la faculté des sciences de la nature et de la vie de l'université Abbes Laghrour pour l'honneur qu'ils nous font d'évaluer notre travail, ainsi que pour leurs remarques constructives, leur attention et le temps qu'ils nous consacrent.

Nous remercions sincèrement l'ensemble des enseignants de la faculté de science de la nature et de la vie de Université Abbes Laghrour Khenchela qui ont contribué à notre formation, pour leur travail acharné durant notre parcours universitaire.

Merci également à tous nos collègues et amis de promotion Master 2 Microbiologie Appliquée, pour tous les moments partagés, pour leurs mots de soutiens et d'encouragement et pour leur sincère amitié.

Nous exprimons également notre gratitude l'ensemble du personnel des laboratoires pédagogiques pour leur aide dans la réalisation de la partie pratique de notre étude.

Nos vifs remerciements vont à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## **Dédicace :**

Avant toute chose, je rends grâce à Dieu Tout-Puissant, source de force, de sagesse et d'inspiration, sans qui rien n'aurait été possible.

Je dédie ce travail, fruit de plusieurs mois d'efforts, de réflexion et de persévérance :

À mes parents bien-aimés, véritables piliers de ma vie, dont l'amour inconditionnel, les sacrifices silencieux et les prières constantes m'ont accompagné tout au long de ce parcours académique. Leur confiance en moi a été une lumière dans les moments de doute, et leur soutien un moteur dans les moments de fatigue.

À mes frères **Fayssel ,Ayoub, Idris**, qui ont su m'apporter affection, encouragements et sourires réconfortants dans les moments difficiles. Leur présence chaleureuse a été pour moi une source inépuisable de motivation.

À l'ensemble de mes enseignants, qui, par leur savoir, leur passion et leur dévouement, ont semé en moi le goût de l'apprentissage et de l'excellence.

À mes chère cousins , Aux deux petits poussins, **Majdou et Mizou**

À mes amis **Douaa, Hassina Fatima, Imen,Meroua,Rania,Leila** pour leur soutien moral, leurs mots d'encouragement et les précieux moments de partage qui m'ont permis de garder espoir et enthousiasme malgré les épreuves

À toute personne ayant, de près ou de loin, contribué à la réussite de ce projet, recevez ici l'expression de ma profonde reconnaissance. Que ce travail soit un humble témoignage de mon respect et de ma gratitude envers vous tous.

À ceux qui rempliront mon avenir de rires et d'amour.

**ILHEM**

## Dédicace :

Je dédie ce modeste travail :

À ma grand-mère défunte « **HAFSIAIA** »

Qui a toujours été dans mon esprit et dans mon cœur, et à qui je dois ce que je suis devenu aujourd'hui, je regrette qu'elle ne soit plus là pour partager ma joie. Que Dieu l'accueille dans Son vaste paradis.

À celle qui est mon exemple de la réussite, que j'ai tant aimé et respecté, qui m'a donné de l'amour ; de la tendresse, du soutien et de la force, À l'être le plus cher à ma vie à la femme qui a souffert sans me laisser souffrir qui n'a épargné aucun effort pour rendre heureuse. **ma très chère mère**, que Dieu te protège et te prête longue et heureuse vie.

À **mon père**, Tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête Merci pour ta force tranquille, tes conseils justes et ton amour parfois discret, mais toujours présent Qui m'a aidé à devenir ce que je suis aujourd'hui, que dieu le garde et le protège.

Les mots me trahissent pour exprimer l'immense amour que je vous porte. Cette source de tendresse et de générosité qui était toujours à mes côtés, qui fait tout pour ma réussite.

À **mon frère** « **DJAMEL** » et mes sœurs « **AMIRA et DOUAA** »

À tous ceux qui me donnent l'aide de près ou de loin...

**CHERINE**

# SOMMAIRE

Liste des abréviations .....	
Liste des figures .....	
Liste des tableaux .....	
INTRODUCTION GENERALE .....	
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE .....	4

## **Chapitre 1 : Généralités sur les actinobactéries**

1. Définitions et généralité sur les Actinobactéries .....	5
2. Écologie et la distribution des Actinobactéries .....	5
3. Classification des actinobactéries .....	6
3.1 Critères morphologiques des actinobactéries .....	8
3.1.1 Critères phénotypiques .....	8
3.2 Critères chimiotaxonomiques des actinobactéries .....	9
3.3 Les critères physiologiques .....	10
3.3.1 Le pH .....	11
3.3.2 L'Oxygène .....	11
3.3.3 La température .....	11
3.4 Les critères génétiques .....	11

## **Chapitre 2 : Applications biotechnologiques des actinobactéries**

1. Le Métabolisme des Actinobactéries .....	13
1.1 Le métabolisme primaire .....	13
1.2 Métabolisme secondaire .....	13
2. Applications des actinobactéries .....	13
2.1 Applications pharmaceutiques et médicales .....	14
2.1.1 Les antibiotiques .....	15

2.1.2 Actinobactéries et innovations thérapeutiques.....	16
2.2 Applications industrielles .....	17
2.3 Exopolysaccharides et biosurfactants des actinobactéries.....	22
2.4 Applications dans le domaine Agronomique.....	23
ETUDE EXPERIMENTALE .....	26

## **Chapitre 1:MATERIELS ET METHODES**

1. Origine et culture des actinobactéries .....	27
2.Criblage des activités antimicrobiennes.....	27
2.1 Extraction des molécules bioactives .....	27
2.2 Activité antibactérienne .....	27
2.2.1 Les souches tests.....	27
2.2.2 Evaluation des extraits bioactifs .....	28
2.3 Activité antifongique.....	29
2.3.1 Evaluation par la méthode des cylindres d'Agar.....	29
2.3.2 Evaluation des extraits bioactifs .....	29
3.Criblage des activités enzymatiques.....	29
3.1 Activités cellulytiques, amylolytiques et pectinolytiques.....	29
3.2 Activités gélatinolytique et protéolytique.....	30
3.3 Activité xylanolytique.....	30
4. Production des EPS .....	30
4. 2 Propriétés biosurfactantes et émulsifiantes des EPS.....	31

## **Chapitre 2:RESULTATS ET DISCUSSION**

1. Mise en évidence de l'activité antimicrobienne .....	33
1.1 Activité antibactérienne .....	33
1.2 Activité antifongique.....	34
2. Criblage des activités enzymatiques.....	35
3. La production des EPS .....	38

3.1 Propriétés biosurfactantes et émulsifiantes des EPS .....	40
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	43
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	47
<b>ANNEXES</b> .....	62
<b>RESUMES</b> .....	65

## Liste des abréviations

**ADN:** Acide désoxyribonucléique.

**ARNr 16 S:** Acide ribonucléique ribosomal 16S

**ATCC:** American Type Culture Collection

**ATP:** Adénosine Triphosphate.

**CMC:** Carboxyméthylcellulose.

**DAP:** Diaminopimélique.

**EPS:** Exopolysaccharides.

**kDa:** Kilodalton.

**MMP2/ MMP9:** Métalloprotéinases matricielles 2 et 9.

**MA:** Mycélium aérien.

**MS:** Mycélium de substrat.

**MH:** Mueller Hinton .

**nm:** Nanomètre.

**PDA:** Potato Dextrose Agar.

**PBS:** Tampon salin phosphate ( Phosphate Buffered Saline ) .

**PGPR:** Rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes.

**pH:** Potentiel hydrogène.

**UFC:** Unité Formant Colonie.

**ISP:** The International Streptomyces Project.

## Liste des figures

<b>Figure 1:</b> la classification du phylum des actinobactéria.....	7
<b>Figure 2:</b> colonie d'actinobactérie en croissance sur gélose.....	8
<b>Figure 3:</b> Utilisations potentielles des actinobactéries du sol pour les applications pharmaceutiques, alimentaires, agricoles et environnementales .....	14
<b>Figure 4:</b> Antibiotiques issus d'actinobactéries.....	15
<b>Figure 5:</b> application des xylanases dans l'industries alimentaires.....	19
<b>Figure 6 :</b> Différentes applications industrielles des enzymes chitinolytiques.....	21
<b>Figure 7:</b> Organigramme représentant l'activité PGPR d'actinobactéries par des méthodes directes et indirectes .....	24
<b>Figure 8 :</b> Détermination de la zone d'inhibition par la méthode de diffusion des disques .....	27
<b>Figure 9:</b> photographie montrent l'activité antibactérienne sur milieu MH des cinq isolats purs d'actinobactéries AB 6,7,8,9,10, évaluée par la technique des disques. (a) : <i>B.subtilis</i> (b): <i>S. aureus</i> (M): le contrôle négatif méthanol.....	33
<b>Figure 10 :</b> Photographies montrant l'activité antifongique contre <i>A.niger</i> ATCC 16404 sur milieu PDA des cinq isolats d'actinobactéries AB 6 ,7,8,9,10, évaluée par la technique des cylindre d'agar.....	34
<b>Figure 11:</b> Photographie montrant l'activité enzymatique des cinq isolats purs d'actinobactéries AB 6,7,8,9,10, (a):cellulase,(b):péctinase, (c):xylanase,(d):gélatinase,(e):protéase,(f):amylase.....	35
<b>Figure 12:</b> Photographies montrant les EPS obtenus après fermentation des isolats (A): AB6, (B): AB8, (C): AB10.....	38
<b>Figure 13:</b> Photographies montrant les émulsions formées sous l'effets des EPS des cinq isolats d'actinobactéries AB6, 7, 8, 9 et 10 .....	40

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1 :</b> Habitats de certaines actinobactéries .....	6
<b>Tableau 2 :</b> Profils des sucres cellulaires totaux des actinobacteries.....	9
<b>Tableau 3:</b> Types de phospholipides membranaires rencontrés chez les <i>Actinobacteria</i> .....	10
<b>Tableau 4:</b> Coefficient de Chargaff (GC %) des différents genres d'actinobacteries.....	12
<b>Tableau 5:</b> Exemples d'antibiotiques produits par des actinobactéries.....	16
<b>Tableau 6:</b> Liste des enzymes isolées à partir d'actinobactéries et de leurs applications dans l'industrie .....	22
<b>Tableau 7:</b> les activité antibactérienne des cinq isolats d'actinobactéries selon la méthode des disques.....	32
<b>Tableau 08 :</b> Les activités enzymatiques des cinq isolats d'actinobactéries.....	35
<b>Tableau 9:</b> Quantités en gramme et Indices d'émulsification des EPS produits par les cinq isolats d' actinobactérie après la fermentation .....	38
<b>Tableau 10:</b> Synthèse de l'ensemble des propriétés évaluées des 5 isolats d'actinobactérie.....	41

# **INTRODUCTION GENERALE**

Les actinobactéries sont un groupe important de bactéries Gram-positives appartenant au phylum *Actinomycetota*. Elles se distinguent par une teneur élevée en guanine-cytosine (GC) dans leur génome et par la présence de nombreux gènes codant pour des métabolites secondaires bioactifs, notamment des antibiotiques. Le genre *Streptomyces* est le représentant le plus connu de ce groupe, reconnu pour sa remarquable capacité à produire une grande diversité d'antibiotiques, à l'origine de plus de deux tiers des antibiotiques utilisés en clinique à ce jour **(MAST et STEGMANN, 2019)**.

La rhizosphère, zone du sol influencée par les exsudats racinaires, constitue un habitat privilégié pour les actinobactéries. Leur abondance dans cet environnement s'explique par leur aptitude à synthétiser une vaste gamme de composés antimicrobiens, ainsi que d'autres métabolites d'intérêt, leur conférant un net avantage écologique. Ces propriétés contribuent à la fertilité des sols, à la stimulation de la croissance végétale, à la protection des plantes contre les phytopathogènes et à l'amélioration de leur tolérance face aux stress abiotiques **(JAVED *et al.*, 2021 ; NAGENDRAN *et al.*, 2021)**.

Initialement peu considérées sur le plan pratique, les actinobactéries ont suscité un intérêt croissant à partir des années 1940, notamment après la découverte de la streptomycine en 1943. Depuis lors, elles occupent une place centrale dans les domaines pharmaceutique, médical, vétérinaire, agricole et environnemental **(BOUKAHILI *et al.*, 2020)**. En plus de leur rôle antimicrobien, ces microorganismes participent activement aux grands cycles biogéochimiques, notamment à travers la production d'acides organiques, la fixation de l'azote atmosphérique, et la dégradation de composés complexes tels que la cellulose et la chitine, contribuant ainsi au renouvellement de la matière organique et à la dynamique du carbone **(SALWAN et SHARMA, 2020)**.

Au-delà de leur capacité à produire des antibiotiques, les actinobactéries sont également réputées pour leur aptitude à synthétiser diverses enzymes extracellulaires (telles que amylase, protéase, cellulase, xylanase, pectinase et gélatinase), qui trouvent des applications dans de nombreux secteurs industriels (agroalimentaire, pharmaceutique, textile, etc.) **(VIJAYABHARATHI *et al.*, 2016)**. Par ailleurs, ces microorganismes peuvent produire des exopolysaccharides (EPS) et des biosurfactants naturels, qui jouent un rôle crucial dans la formation de biofilms, la biodégradation de composés hydrophobes, et la bioremédiation de sols

contaminés. Les EPS possèdent des propriétés rhéologiques, émulsifiantes et antioxydantes qui les rendent prometteurs pour des usages biotechnologiques variés, notamment en cosmétique, en médecine et dans l'industrie agroalimentaire (**Ghosh et Dutta, 2020**).

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer le potentiel biotechnologique d'actinobactéries isolées à partir de sols de la région semi-aride de Khenchela à travers l'évaluation des activités antimicrobiennes, des activités enzymatiques spécifiques et de la production d'EPS biosurfactants.

Le manuscrit est structuré comme suit :

- **Première partie** : Synthèse bibliographique divisée en deux chapitres :
  - *Chapitre 1* : Généralités sur les actinobactéries.
  - *Chapitre 2* : Applications biotechnologiques des actinobactéries.
- **Deuxième partie** : Partie expérimentale comprenant:
  - Le criblage de souches d'actinobactéries isolées de sols semi-arides pour leur potentiel antimicrobien.
  - L'évaluation de diverses activités enzymatiques (amylase, protéase, xylanase, gélatinase, pectinase, cellulase) chez les isolats étudiés.
  - L'étude de la capacité de production d'EPS par les actinobactéries testées et la détermination de l'indice d'émulsification associé.

# **ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

## Chapitre 1 : Généralités sur les actinobactéries

### 1. Définitions et généralité sur les Actinobactéries

Les actinobactéries, classées parmi les Actinobacteria, sont des bactéries à Gram positif caractérisées par un pourcentage élevé de bases G-C dans leur génome, généralement situé entre 60 et 75 % (BELYAGOUBI, 2014).

Les actinobactéries ont longtemps été perçus comme un groupe intermédiaire entre les bactéries et les champignons (BOUZIANI et ABDELHAFIDI, 2019). Aréobies et formant des spores, la plupart des espèces sont hétérotrophes, mais certaines sont des chimio-autotrophes. La majorité des actinobactéries sont des organismes libres, largement répandus dans les écosystèmes terrestres et aquatiques, affirmant ainsi leur caractère ubiquitaire (BARAKA, 2016). Certaines espèces nécessitent des éléments nutritionnels spécifiques, comme des vitamines ou des acides aminés particuliers (BOUAZIZ, 2018).

### 2. Écologie et la distribution des Actinobactéries

Les actinobactéries sont l'un des groupes de micro-organismes les plus répandus dans la nature (tableau 1). Elles abondent dans une grande variété de sols, notamment les sols sableux, les sols alcalins, les sols forestiers et les sols sahariens (RACHNIYOM *et al.*, 2018). Sur le plan physiologique, les actinobactéries de type aérobie sont les plus répandus, tandis que les formes anaérobies se rencontrent principalement chez les animaux et les humains. Les actinobactéries préfèrent un pH neutre ou peu alcalin, ils sont généralement mésophiles d'autres sont thermophiles (BOUCHEFFA, 2011).

La majorité des actinobactéries sont des organismes saprophytes, capables de décomposer des matières organiques complexes et non biodégradables par les champignons ou d'autres bactéries, telles que la kératine, la cellulose ou encore la lignine sous forme polymérique. Elles possèdent également la faculté de synthétiser des substances à propriétés probiotiques et antibiotiques (BOUAZIZ, 2018).

**Tableau 1:** Habitats de certaines actinobactéries (GRIGOROVA et NORRIS, 1990).

Actinobactéries	Habitats
<i>Actinoplanes</i>	Eau douce, litière végétale, sol.
<i>Frankia</i>	Nodules racinaires des non-légumineuses.
<i>Micromonospora</i>	Eau douce, sédiments, sols humides.
<i>Nocardia amarae</i>	Boues activées.
<i>Rhodococcus coprophilus</i>	Déjections animales, eau, sol.
<i>Saccharopolyspora rectivirgula</i>	Moisissures du foin.
<i>Streptomyces</i>	Sol, litière végétale, eau.
<i>Thermoactinomyces</i>	Compost.

### 3. Classification des actinobactéries

Le phylum des Actinobacteria se distingue par sa grande diversité et sa complexité. Il est composé de 5 ordres, 13 sous-ordres, 48 familles et plus de 200 genres bactériens, comme illustré dans la figure 1 (BELYAGOUBI, 2014).

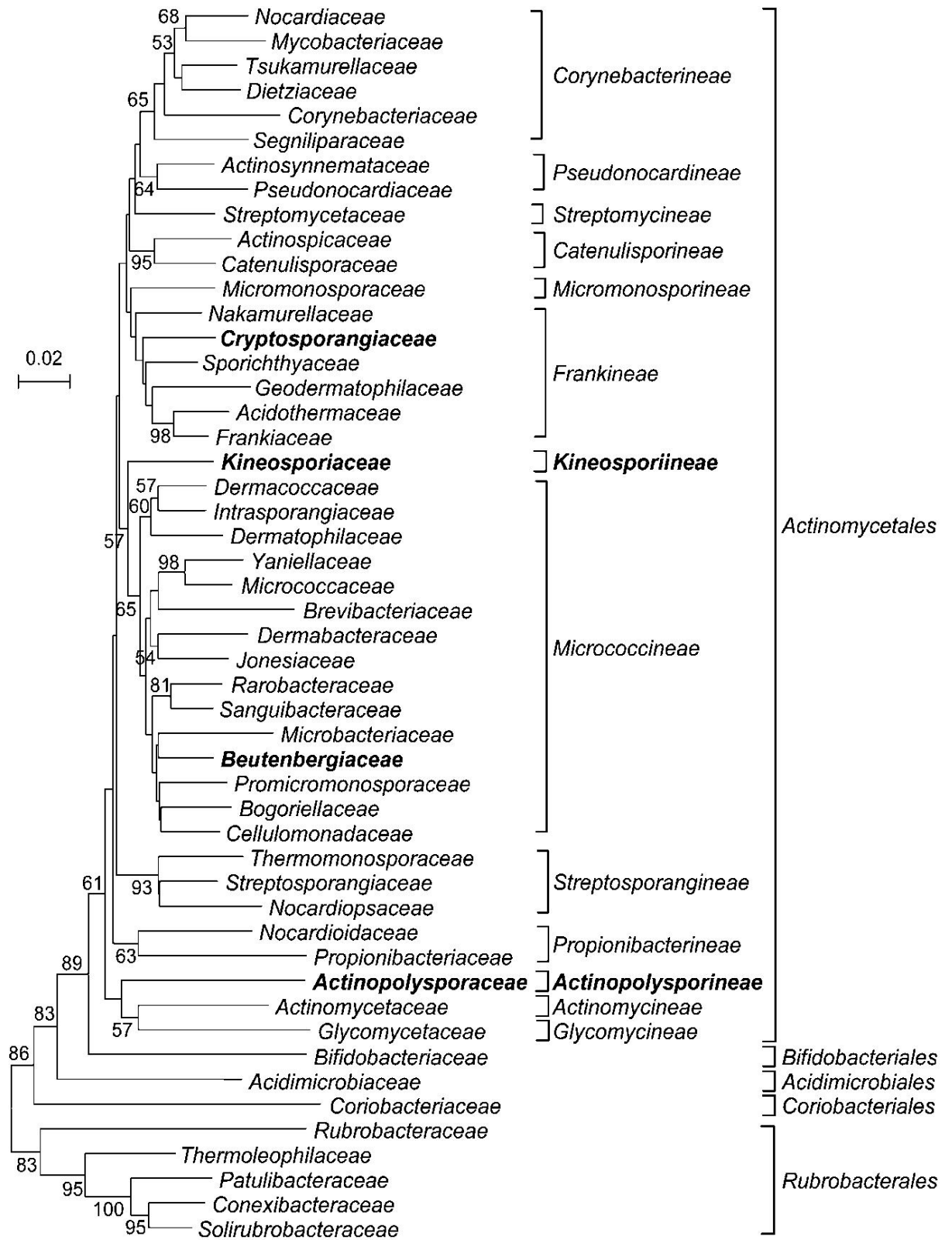
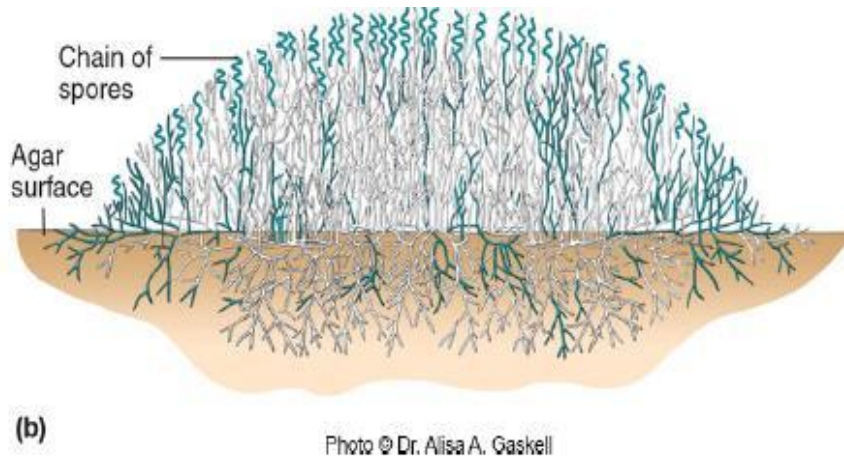


Figure 1: La classification du phylum des actinobactéria (PRESCOTT *et al.*, 2010).

### 3.1 Critères morphologiques des actinobactéries

Les caractéristiques culturelles, autrement dit les traits observables à l'œil nu, permettent parfois de distinguer les groupes d'actinobactéries les uns des autres. Ces caractéristiques incluent les critères macroscopiques et microscopiques (BOUALI *et al.*, 2022).



**Figure 2 :** Colonie d'actinobactéries en croissance sur gélose (PRESCOTT *et al.*, 2010).

#### 3.1.1 Critères phénotypiques

- **Critères macroscopiques (WILLIAMS *et al.*, 1983)**

- La capacité à produire ou non un mycélium aérien (MA).
- La présence d'un mycélium de substrat (MS).
- La L'identification de la couleur du MA et du MS, ainsi que celle des pigments diffusibles dans le milieu de culture.

- **Critères microscopiques (KAMPFER, 2012).**

- Fragmentation ou non du mycélium du substrat.
- Formation de spores exogènes sur milieu MA ou MS : observer la forme, la taille et la disposition de ces spores (en chaînes ou isolées).
- Absence ou présence de sporophores.
- Aspect de la surface des spores : lisse, rugueuse, chevelue ou épineuse.
- Présence ou absence de vésicules sporangées sur les milieux MA ou MS.

- Mobilité des spores : mobiles ou immobiles.

### 3.2 Critères chimiotoxonomiques des actinobactéries

Les composés chimiques tels que les acides aminés, les sucres et les lipides jouent un rôle essentiel en chimiotoxonomie bactérienne. Parmi les acides aminés pariétaux, l'acide diaminopimélique (DAP) peut être remplacé par la lysine et la glycine. En ce qui concerne les sucres d'importance taxonomique (tableau 2), on retrouve notamment les couples arabinose-galactose, xylose-arabinose, ainsi que la madurose. Les lipides d'intérêt en chimiotoxonomie incluent les phospholipides, les acides mycoliques partiels, ainsi que les ménaquinones membranaires (tableau 3), (BOULALI, 2018).

**Tableau 2** : Profils des sucres cellulaires totaux des Actinobactéries, (LECHEVALLIER et LECHEVALLIER, 1970).

Type de composition en sucres cellulaires	Sucres caractéristiques	Genres représentatif
<b>A</b>	Arabinose, Galactose	<i>Nocardia</i> , <i>Rhodococcus</i> , <i>Saccharomonospora</i>
<b>B</b>	Madurose	<i>Actinomadura</i> <i>Streptosporangium</i> <i>Dermaphilus</i>
<b>C</b>	Aucun	<i>Thermomonospora</i> , <i>Actinosynnema</i>
<b>D</b>	Arabinose, xylose	<i>Micromonospora</i> , <i>Actinoplanes</i>

**Tableau 3.** Types de phospholipides membranaires rencontrés chez les actinobactéries  
(BOUAZIZ, 2018).

Types de phospholipids	PE	PC	PG	PGI	Genres représentatifs
PI	-	-	-	V	<i>Actinomadura</i>
PII	+	-	-	-	<i>Streptomyces</i> , <i>Pseudonocardia</i> .
PIII	-	+	-	V	<i>Nocardiosis</i> , <i>Amycolatopsis</i> .
PIV	+	-	+	-	<i>Nocardia</i> , <i>Nonomuraea</i> .
PV	-	-	+	+	<i>Oerskovia</i> .

PE : phosphatidyléthanolamine, PC : phosphatidylcholine, PG : phospholipides contenant de la glucosamine, PGI : phosphatidylglycérol. + : présent; - : absent ; v : variable selon les genres et les espèces. Le Phosphatidylinositol PI est présent chez toutes les actinobactéries.

### 3.3 Les critères physiologiques

L'étude des caractéristiques physiologiques a également été adoptée par les taxonomistes pour différencier les espèces d'actinobactéries. Ces caractéristiques incluent des tests de dégradation de composés organiques (glucides, protéines, lipides, polymères, etc.), des évaluations de résistance à divers agents chimiques (comme les antibiotiques et d'autres substances), ainsi que des tests de tolérance aux variations de pH, de température, et de salinité. (BOUDJELAL et BENCHEIKH, 2012).

### 3.3.1 Le pH

Généralement, les actinobactéries préfèrent un pH neutre ou peu alcalin. Toutefois, certains d'entre elles ont été isolés dans des écosystèmes caractérisés par des conditions de pH extrêmes, comme les lacs hautement alcalins (BELYAGOUBI, 2014).

### 3.3.2 L'Oxygène

Selon leurs types respiratoires, on peut répartir les actinobactéries en deux groupes :

- Les formes fermentatives anaérobies, représentées par le genre type *Actinomyces*, qui sont des commensales obligatoires des cavités naturelles de l'homme et des animaux supérieurs, Ils font partie de la flore de Veillons (ZANANE, 2019).
- Les formes oxydatives aérobies, telles que les *Streptomyces*, sont abondantes dans la nature en particulier sur le sol.

### 3.3.3 La température

Généralement, les actinobactéries sont mésophiles mais certaines espèces sont thermophiles. Les actinobactéries thermophiles tolèrent des températures allant jusqu'à 60°C (BELYAGOUBI, 2014). C'est principalement le genre *Thermoactinomyces* qui produit des spores résistantes à une température de 90°C. Le genre *Streptomyces* comporte aussi des espèces thermophiles comme *Streptomyces thermocrophilus* et même psychrophiles (DJABALLAH, 2010).

## 3.4 Les critères génétiques

Dès 1936, il a été proposé l'utilisation d'une taxonomie phylogénétique, mais les outils nécessaires au développement d'une telle taxonomie n'étaient pas disponibles et il fallut attendre la deuxième moitié du 20<sup>ème</sup> siècle pour qu'une taxonomie phylogénétique commence à se mettre en place (ZANANE, 2019).

Parmi les principales techniques moléculaires utilisées en taxonomie (CHELGHOUM *et al.*, 2019) :

- L'analyse des séquences de l'ADN codant pour l'ARN ribosomique 16S (ADNr 16S).
- L'hybridation ADN-ADN.
- La détermination du pourcentage de guanine-cytosine (GC%) (**tableau 4**).
- L'analyse des séquences des protéines ribosomiques.

**Tableau 4:** Coefficient de Chargaff (GC %) des différents genres d'actinobactéries (BOUAZIZ, 2018).

Genre	GC%
<i>Mycobacterium</i>	64 à 70
<i>Actinomyces</i>	63 à 73
<i>Nocardia</i>	67 à 69,4
<i>Streptomyces</i>	69 à 76
<i>Micromonospora</i>	71,4 à 74,8
<i>Actinoplanes</i>	70,6 à 76

## Chapitre 2 : Applications biotechnologiques des actinobactéries

### 1. Le Métabolisme des Actinobactéries

Les actinobactéries constituent un groupe vaste et diversifié de bactéries connues pour produire une large gamme de métabolites primaires et secondaires, dont beaucoup ont des activités biologiques importantes, notamment des antibiotiques, des agents anticancéreux et des immunosuppresseurs (ALWAL et PARKINSON , 2023).

#### 1.1 Le métabolisme primaire

Les actinobactéries possèdent un métabolisme primaire semblable à celui d'autres organismes. Les métabolites primaires ou généraux essentiels forment la structure cellulaire et garantissent le bon fonctionnement du métabolisme global. Ils sont produits au cours des réactions cataboliques et anaboliques. Ces processus permettent aux cellules de recevoir des métabolites intermédiaires et de fournir l'énergie nécessaire à la synthèse de macromolécules essentielles telles que les lipides, les protéines, les acides nucléiques et les polysaccharides (IBRAHIMI, 2020).

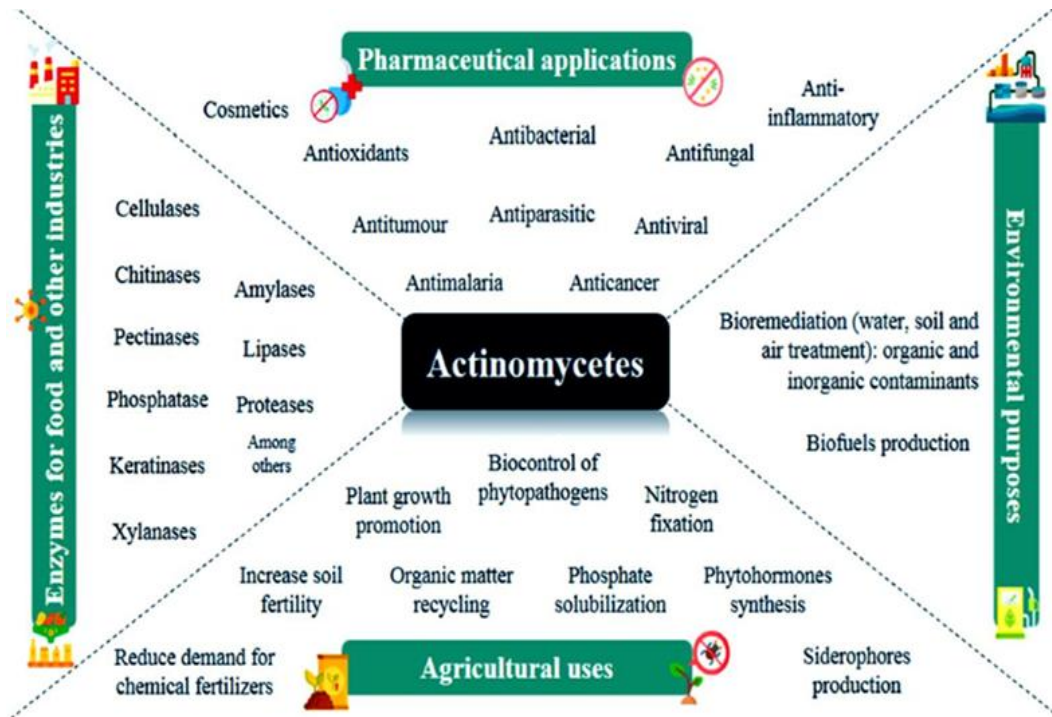
#### 1.2 Métabolisme secondaire

Le métabolisme secondaire se distingue du métabolisme primaire car il englobe des métabolites qui ne jouent pas un rôle direct dans la croissance et la survie de l'organisme (THEILLEUX *et al.*, 1993) .Plus généralement, le métabolisme secondaire est perçu comme l'ensemble des processus de synthèse de composés qui n'exercent pas de fonctions évidentes dans le métabolisme cellulaire (COLOMBIE, 2005).

### 2. Applications des actinobactéries

Les actinobactéries reconnues pour leur extraordinaire capacité à produire des métabolites secondaires, elles jouent un rôle central dans de nombreuses applications biotechnologiques (figure 3). Du célèbre *Streptomyces*, producteur de la streptomycine, aux espèces extrêmophiles

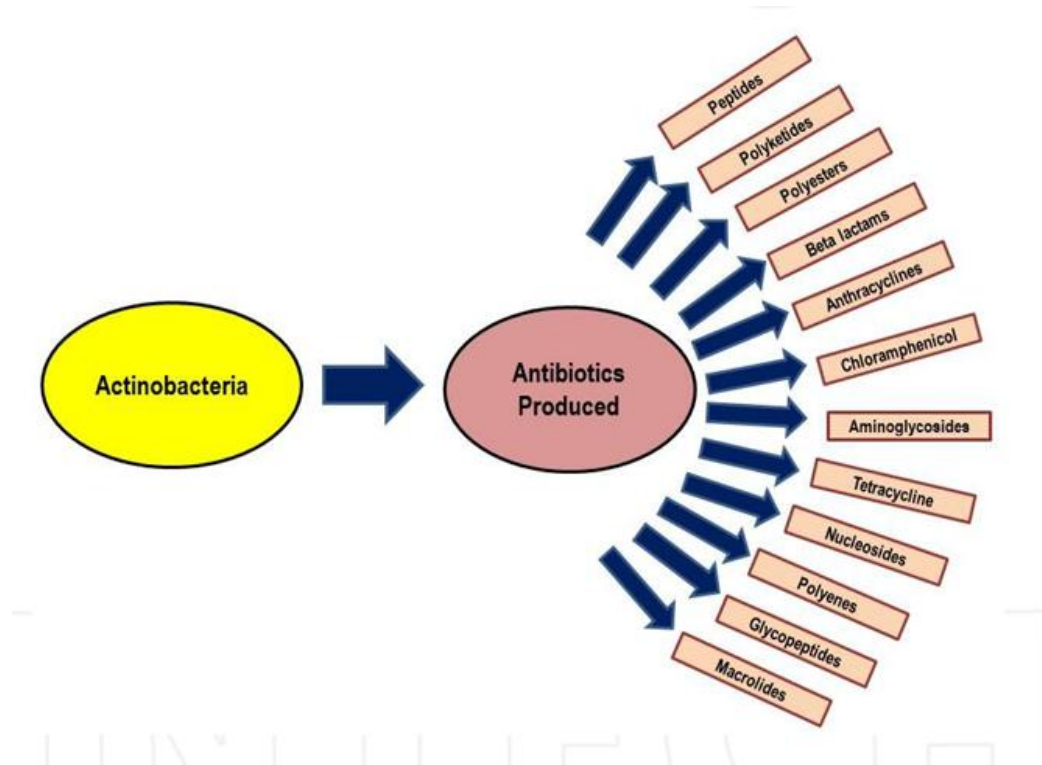
explorées pour leurs enzymes thermostables, les actinobactéries offrent un réservoir inestimable de ressources pour la santé, l'agriculture, l'industrie et l'environnement (MEBRAT, 2024).



**Figure 3:** Utilisations potentielles des actinobactéries du sol pour les applications pharmaceutiques, alimentaires, agricoles et environnementales (NAZARI *et al.*, 2022).

### 2.1 Applications pharmaceutiques et médicales

Les actinobactéries occupent une place cruciale dans la fabrication de plusieurs médicaments indispensables à notre santé et à notre alimentation. L'augmentation récente des maladies provoquées par des bactéries multi résistantes pathogènes explique l'efficacité des recherches de nouveaux antibiotiques pour lutter contre ces agents pathogènes. Des produits naturels dotés de structures bénéfiques présentent des activités biologiques. L'environnement demeure le réservoir le plus abondant et le plus multifonctionnel pour la découverte de nouveaux antibiotiques (figure 4) (RANJANI *et al.*, 2016).



**Figure 4 :** Antibiotiques issus d'Actinobactéries (RANJANI *et al.*, 2016).

### 2.1.1 Les antibiotiques

Les actinobactéries sont largement reconnus comme la principale source d'antibiotiques (**tableau 5**), fournissant les deux tiers des antibiotiques actuels. Produits par ces micro-organismes figurent notamment les anthracyclines, les aminosides, les  $\beta$ -lactamines, le chloramphénicol, les macrolides, les tétracyclines, les nucléosides, les peptides et les polyéthers. Jusqu'en 1974, la production d'antibiotiques à partir d'actinobactéries concernait presque exclusivement les espèces du genre, *Streptomyces*. Récemment, l'accent a été mis sur l'exploration des souches d'espèces rares d'autres genres comme *Actinomadura*, *Actinoplanes*, *Ampullariella*, *Actinosynnema* et *Dactylosporangium* pour découvrir de nouveaux antibiotiques (CHAVAN *et al.*.,2013).

**Tableau 5** : Exemples d'antibiotiques produits par des actinobactéries (ARAR, 2019).

<b>Principales Classes d'antibiotiques</b>	<b>Exemples d'antibiotiques</b>	<b>Actinobactéries productrices</b>	<b>Mode d'action</b>
<b>Aminocyclitols</b>	Streptomycine	<i>Streptomyces griseus</i>	Inhibent la synthèse protéique au niveau de la sous unités 30S du ribosome.
<b>Tétracycline</b>	Chlortétracycline	<i>Streptomyces aureofaiens</i>	Inhibent la synthèse protéique au niveau de la sous unités 30S du ribosome.
<b>B-lactamines</b>	Céphamycine	<i>Streptomyces spp</i>	Inhibent la dernière étape de la synthèse du peptidoglycane, ce qui entraîne une lyse bactérienne.
<b>Macrolides</b>	Tylosine	<i>Streptomyces fradiae</i>	Inhibent la synthèse protéique au niveau de la sous unités 50S du ribosome.
<b>Rifamycines</b>	Rifampicines	<i>Nocardia mediteranei</i>	Inhibent la synthèse des acides nucléiques (forment un complexe avec l'ARN polymérase).

### 2.1.2 Actinobactéries et innovations thérapeutiques

Les actinobactéries, notamment celles du genre *Streptomyces*, sont depuis longtemps reconnues pour leur capacité à produire des antibiotiques, mais leur potentiel pharmaceutique s'étend bien au-delà de cette seule catégorie de biomolécules. De nombreuses espèces sont en

effet capables de biosynthétiser des composés anticancéreux, immunomodulateurs, antiviraux ou encore antiparasitaires. Parmi les anticancéreux les plus notables figurent la dactinomycine, la mitomycine C et la doxorubicine, qui interfèrent avec l'ADN des cellules tumorales et sont largement utilisés en chimiothérapie (NEWMAN et CRAGG, 2020). D'autres actinobactéries produisent des immunosuppresseurs tels que la rapamycine (ou sirolimus), utilisée dans la prévention du rejet de greffe et étudiée pour ses effets potentiels sur la longévité cellulaire (SAXTON et SABATINI, 2017). Leurs métabolites secondaires comprennent également des agents antiviraux, et des molécules antiparasitaires, à l'instar de l'ivermectine, issue de *Streptomyces avermitilis*, couramment utilisée contre les parasites humains et vétérinaires (OMURA et CRUMP, 2004).

Grâce aux avancées en génomique, il devient aujourd'hui possible d'exploiter les voies biosynthétiques silencieuses et de révéler un immense potentiel encore inexploité. Ainsi, les actinobactéries apparaissent comme des ressources majeures dans la recherche de nouveaux agents thérapeutiques, au-delà du spectre antimicrobien classique (NEWMAN et CRAGG, 2020).

## 2.2 Applications industrielles

Un large éventail d'enzymes et de leurs produits (**tableau 6**), utilisés dans les industries biotechnologiques et biomédicales, (PRAKASH *et al.*, 2013). Les actinobactéries sont connues comme des bio-usines d'enzymes, avec des applications dans les secteurs du textile, des bioraffineries, de l'alimentation, des pâtes et papiers, de l'agriculture, des détergents et de l'industrie pharmaceutique (OUCHARI, 2019). Ainsi, de nouvelles enzymes peuvent être obtenues à partir d'actinobactéries présents dans des habitats extrêmes, offrant un potentiel commercial considérable.

### 2.2.1 Les enzymes

- Les Amylases

Les amylases sont des enzymes hydrolases capables de dégrader l'amidon en sucres plus simples, tels que le maltose, le glucose ou les dextrans. Parmi les divers microorganismes producteurs, les actinobactéries, notamment les genres *Streptomyces*, *Nocardopsis* et

*Actinomyces*, se distinguent par leur capacité à produire des amylases extrêmement stables, actives dans des conditions extrêmes de pH, de température ou de salinité (SEYEDKAZEMI et NAJAFPOUR, 2019). Ces propriétés confèrent à ces enzymes un intérêt majeur pour des applications industrielles variées telles que la saccharification de l'amidon dans l'industrie alimentaire, le détachage des tissus dans le secteur textile, le traitement des pâtes à papier en papeterie, ou encore la production de biocarburants par hydrolyse enzymatique des substrats lignocellulosiques (SAXENA *et al.*, 2007).

Les amylases des actinobactéries présentent une grande diversité structurale, incluant notamment des  $\alpha$ -amylases, des glucoamylases et des pullulanases, ce qui permet une adaptation à différentes conditions et processus industriels (SEYEDKAZEMI et NAJAFPOUR, 2019). Par ailleurs, les techniques modernes telles que la fermentation en milieu solide, l'ingénierie enzymatique et la bioinformatique structurale permettent d'optimiser leur production et leurs performances. L'exploitation de souches isolées d'environnements extrêmes, tels que les milieux halophiles ou thermophiles, ouvre la voie à la découverte d'amylases innovantes, robustes et adaptées à des procédés industriels respectueux de l'environnement (SAXENA *et al.*, 2007).

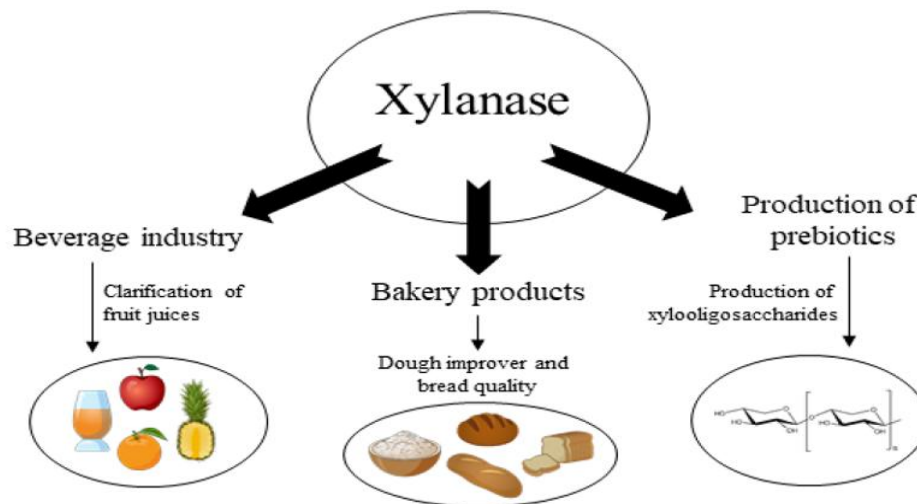
- **Les Cellulases**

Le genre *Streptomyces* est le principal producteur de cellulases et possède la capacité de fermenter la cellulose. Il a été rapporté que les cellulases produites par *Streptomyces sp* sont hautement thermostables. Cependant, elles peuvent être utilisées comme détergents et restaurer la couleur des tissus. De plus, certaines cellulases recombinantes utilisées commercialement sont issues des genres *Thermobifidaet Micromonospora* (MANDAL, 2020) .

- **Les xylanases**

Les xylanases sont une autre catégorie d'enzymes importantes produites par le genre *Streptomyces* et utilisée commercialement. Les xylanases extraites de deux espèces d'actinobactéries : *Actinomadura sp* et *Nonomurae aflexuosa*, sont hautement thermostables et possèdent une activité spécifique qui leur confère une grande valeur industrielle. La production de xylanases a également été observée chez les espèces de *Thermomonospora fusca* toutefois,

les industries du papier et de la pâte à papier utilisent fréquemment des xylanases recombinantes issues d'actinobactéries en raison de leur grande résistance à la chaleur et de leur stabilité de pH (figure 5) (MANDAL, 2020).



**Figure 5:** Application des xylanases dans l'industrie alimentaire (FERNANDES DE SOUZA *et al.*, 2022).

- **Les Pectinases**

Les pectinases sont un ensemble d'enzymes responsables de la dégradation des substances pectiniques, soit par des réactions de dépolymérisation, comme les hydrolases et les lyases, soit par désestérification grâce aux estérases. Certaines actinobactéries sont capables de produire ces enzymes, comme le démontrent les recherches sur *Streptomyces lydicus*. Parmi les pectinases, les polygalacturonases occupent une place très importante et sont largement utilisées dans l'industrie (MUKHTAR *et al.*, 2017).

- **Les Protéases**

Depuis des décennies, la recherche de nouvelles protéases pour leurs applications industrielles se poursuit. Certaines espèces de *Streptomyces* produisent des protéases, tandis que d'autres genres produisent des protéases tolérantes au sel. Les industries du cuir utilisent les protéases de *Nocardioopsis sp* ; pour la dégradation des protéines des peaux. Les protéases de

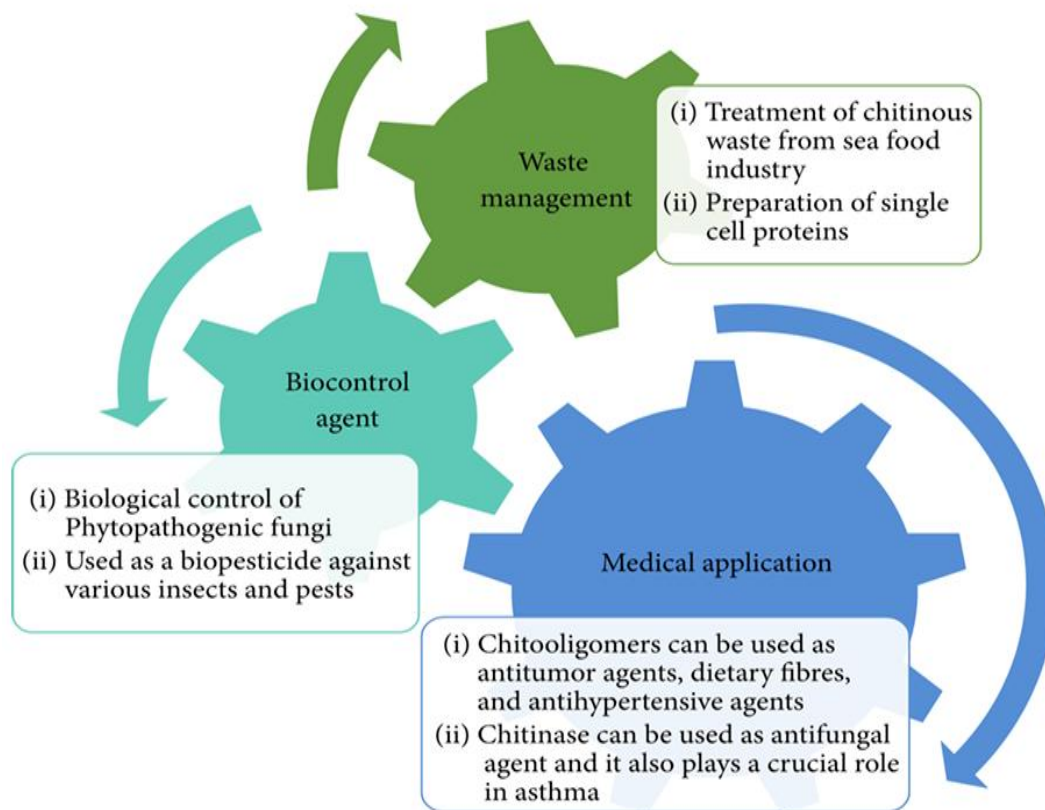
*Streptomyces sp.* sont utilisées pour décaper les peaux de chèvre, ce qui s'est avéré rentable économiquement et écologiquement ; Elles sont également utilisées comme additifs dans les détergents. Les protéases de *Streptomyces sp* ont une activité kératinolytique utilisée dans les procédés agroalimentaires pour dégrader les plumes, les poils, les ongles et la corne. De plus, le genre *Microbispora* est également connu pour produire les protéases (MANDAL, 2020).

- **Les Chitinases**

Les chitinases sont réputées pour leur rôle en tant qu'agents biologiques de lutte contre les champignons phytopathogènes, les nématodes et autres. Par conséquent, les actinobactéries produisent des chitinases qui sont fortement thermostables et efficaces à divers niveaux de pH. Ainsi, ces propriétés particulières de cette enzyme lui offrent une multitude d'applications dans le domaine industriel (**figure 6**) (RIFAT et al., 2013).

Les chitinases ont de nombreuses applications dans les domaines biochimiques, alimentaires et chimiques. Surtout dans le domaine de la biotechnologie pour la gestion des déchets, la conversion des déchets de chitine en bio-fertilisant, ou encore la production de protéines unicellulaires (POU). Et aussi des applications dans la lutte contre les parasites en agriculture et dans les soins de santé pour l'homme. Ces dernières sont également utilisées pour la conversion de la biomasse à forte teneur en chitine en composants utiles (dépolymérisés) pour combattre les agents pathogènes fongiques et les insectes nuisibles aux végétaux. Dans le domaine médical, Ils sont essentielles pour augmenter l'efficacité des traitements antifongiques destinés à traiter les infections fongiques (RIFAT et al., 2013).

Les chitobioses générées par *Microbispora sp* ont des vertus antioxydantes et servent d'additifs alimentaires ainsi que dans le domaine biomédical (MANDAL, 2020).



**Figure 6:** Différentes applications industrielles des enzymes chitinolytiques ( SINGH et GUPTA, 2015).

**Tableau 6** : Liste des enzymes isolées à partir d'actinobactéries et de leurs applications dans l'industrie (DEROUICHE *et al.* , 2011).

<b>Enzyme</b>	<b>Exemples d'Actinobactéries productrices</b>	<b>Application dans l'industrie</b>
<b>Protéase</b>	<i>Micromonospora sp</i>	Dans le traitement des eaux usées.
<b>Cellulase</b>	<i>Streptomyces spp</i>	La production durable de biocarburants.
<b>Lipase</b>	<i>Streptomyces griseus</i>	Utilisées dans la bio remédiation et dans la synthèse d'arômes.
<b>Xylanase</b>	<i>Actinomadura sp.</i>	L'hydrolyse des résidus agricoles comme les déchets, les tourteaux
<b>Pectinase</b>	<i>Actinomadura</i>	Le traitement des déchets agro industriels comme le cheveux.
<b>Amylase</b>	<i>Saccharomonospora viridis</i>	Utilisées dans l'industrie de la boulangerie.

### 2.3 Exopolysaccharides et biosurfactants des actinobactéries

Les actinobactéries, en particulier celles appartenant au genre *Streptomyces* et *Rhodococcus*, sont capables de produire une large gamme de biopolymères extracellulaires, notamment des exopolysaccharides (EPS) et des biosurfactants, qui présentent un intérêt croissant pour les

biotechnologies industrielles, environnementales et biomédicales. Les EPS, tels que la xanthane, le levane ou des polysaccharides spécifiques à certaines espèces, sont des macromolécules hydrophiles sécrétées dans le milieu extracellulaire. Ils jouent un rôle clé dans la protection cellulaire, la formation de biofilms, mais aussi dans des applications industrielles comme les agents épaississants, gélifiants ou stabilisants (**KAUR *et al.*, 2019**). Par ailleurs, certaines actinobactéries produisent des biosurfactants amphiphiles, capables de réduire la tension de surface et d'émulsifier des composés hydrophobes, ce qui les rend particulièrement utiles pour la bioremédiation, le nettoyage pétrolier, ou encore comme adjuvants dans les formulations pharmaceutiques (**SATPUTE *et al.*, 2010**).

Comparés à leurs homologues synthétiques, ces bioproduits se distinguent par leur biodégradabilité, leur faible toxicité et leur production à partir de substrats renouvelables, ce qui en fait des alternatives écologiques prometteuses. Les approches de bio-ingénierie et l'utilisation de milieux de culture optimisés permettent d'augmenter significativement les rendements de production de ces composés. Ainsi, l'exploitation des EPS et biosurfactants des actinobactéries ouvre de nouvelles perspectives en bioéconomie circulaire, notamment dans les secteurs de l'environnement, de l'agroalimentaire et de la médecine (**KAUR *et al.*, 2019**).

## 2.4 Applications dans le domaine Agronomique

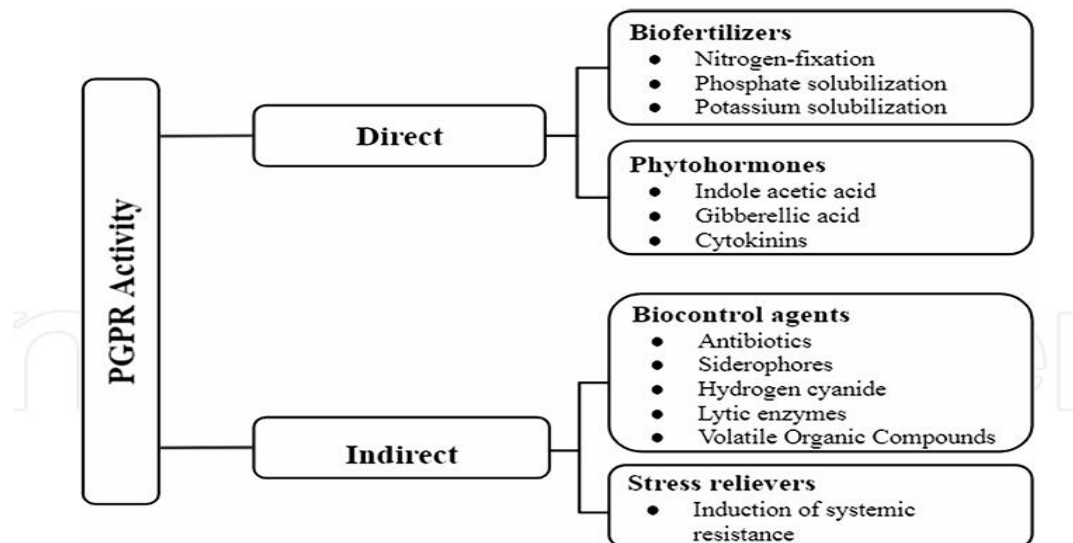
Les actinobactéries jouent un rôle crucial dans le recyclage de la matière organique, grâce à leur capacité à dégrader des substances complexes que les autres bactéries non mycéliennes et les champignons ne peuvent pas décomposer. En outre, ils protègent les racines des plantes contre les invasions fongiques. Ils ont également la capacité de dégrader ou recycler les toxines produites par des champignons toxigènes, réduisant ainsi leur teneur dans les produits agroalimentaires finis (**LAMARI, 2006**).

En agriculture, les actinobactéries sont valorisées comme biofertilisants ou agents de lutte biologique. Toutefois, une grande partie des recherches portent surtout sur leurs capacités de lutte biologique, en raison de leur aptitude à produire des composés bioactifs utilisés pour défendre les plantes. Les actinobactéries stimulent la croissance des plantes et aident à la gestion des maladies par le biais d'actions directes et indirectes (**figure 7**). La fixation de l'azote, la solubilisation des

nutriments, la production d'hormones de croissance et des sidérophores constituent des mécanismes directs essentiels (KAARI *et al.*, 2022).

Les trois nutriments essentiels à la croissance des plantes sont l'azote, le phosphore et le potassium (NPK). Ces besoins sont satisfaits par différents microbes du sol, les actinobactéries étant les principaux. Le NPK est nécessaire aux plantes pour la synthèse de plusieurs macromolécules, la biosynthèse de l'ATP, la photosynthèse et d'autres processus cellulaires (JAIN *et al.*, 2022).

Les actinobactéries, notamment *Streptomyces*, semblent constituer une alternative naturelle largement accessible pour mettre en place de nouvelles stratégies de lutte contre les maladies des plantes. L'une des capacités essentielles de biocontrôle de *Streptomyces* est la production à grande échelle de métabolites bioactifs. Le meilleur exemple du potentiel de *Streptomyces* est la production de sidérophores, de chitinase et de divers antibiotiques (KAARI *et al.*, 2022).



**Figure 7 :** Organigramme représentant l'activité PGPR d'actinobactéries par des méthodes directes et indirectes (JAIN *et al.*, 2022).

# **ETUDE EXPERIMENTALE**

# **MATERIEL ET METHODES**

## 1. Origine et culture des actinobactéries

Cinq isolats d'actinobactéries ont été utilisés dans cette étude. Ils ont été précédemment isolés à partir d'échantillons de sol collectés dans la région semi-aride de la wilaya de Khenchelas sur un milieu spécifique favorisant la croissance des actinobactéries. Les isolats ont été cultivés sur le milieu YMEA (Yeast Malt Extract Agar, **Annexe 1**) et incubés à 30 °C pendant une semaine. Pour leur conservation à long terme, des cultures pures issues des repiquages sont stockées à -24°C (cryotubes 1,5 ml) dans le milieu ISP2 (**Annexe 1**) contenant le glycérol (1/1) à 60% (v/v).

## 2. Criblage des activités antimicrobiennes

### 2.1 Extraction des molécules bioactives

Pour l'extraction des molécules bioactives, les cinq isolats ont été précédemment cultivés sur milieu YMEA, réparti en boîtes de Pétri. Chaque souche a été ensemencée en stries serrées sur 40 boîtes. Après incubation à 30 °C pendant 7 jours, la gélose a été fragmentée, puis additionnée d'acétate d'éthyle (**LEULMI,2018**). La macération a été réalisée trois fois afin de maximiser la récupération des molécules bioactives produites. Les extraits bruts obtenus ont ensuite été filtrés, puis concentrés à sec à l'aide d'un évaporateur rotatif sous vide à 40 °C. Les résidus secs ont été repris dans 1 mL de méthanol en vue d'évaluer leur activité antimicrobienne et antifongique par la méthode de diffusion des extraits sur disques de papier.

### 2.2 Activité antibactérienne

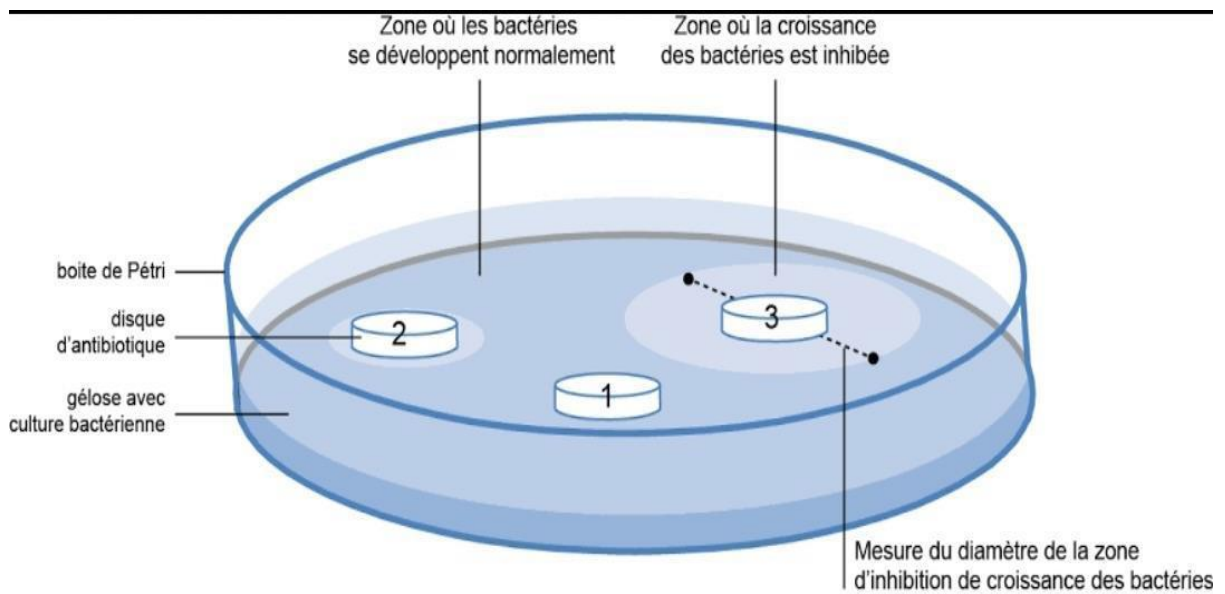
#### 2.2.1 Les souches tests

L'activité antibactérienne des isolats purs d'actinobactéries a été recherchée contre des bactéries-testes référencées de Gram positive ; *Staphylococcus aureus* ATCC 65 38 et *Bacillus subtilis* ATCC 66 33, et de Gram négative ; *Pseudomonas aeruginosa* NCIMB 86 26, et *Escherichia coli* NCTC 10538.

### 2.2.2 Evaluation des extraits bioactifs

À partir d'une culture de 24h sur gélose nutritive, une suspension de chaque bactérie test est préparée. La densité cellulaire de chaque suspension est ajustée par addition d'eau physiologique stérile en comparaison avec une solution de Mac Farland 0,5 de façon à obtenir une concentration de  $10^6$  UFC/ ml (CAVALA et EBERLIN, 1994; JOSEPH *et al.*, 2022).

L'activité antibactérienne est évaluée en utilisant des disques de papiers filtres stériles de 6 mm de diamètres imprégnés par 20 $\mu$ l de chaque extrait. Des disques contiennent les solvants purs sont utilisés comme témoins (PRABAKARAN et RAJA, 2011). Après séchage, les disques sont déposés à la surface du milieu Muller-Hinton (Annexe 1) préalablementensemencé par les souches testes cibles. Les boites sont placées à 4 °C pour permettre une diffusion des substances, puis elles sont incubées à 37 °C. Les zones d'inhibitions sont mesurés après 24 heures d'incubation (Figure 9), (AYARI *et al.*, 2012).



**Figure 8** : Détermination de la zone d'inhibition par la méthode de diffusion des disques (ZAIKA, 1988).

## 2.3 Activité antifongique

### 2.3.1 Evaluation par la méthode des cylindres d'Agar

La production de métabolites antifongiques est mise en évidence par la technique des cylindres d'Agar qui se réalise en deux étapes : La première consiste à ensemencer en stries serrées les souches d'actinobactéries sur le milieu YMEA et sont incubées à 28 °C pendant 7 jours. Dans la deuxième étape, des cylindres d'Agar de 6 mm de diamètre des cultures d'actinobactéries sont prélevés et sont déposés sur milieu PDA (**Annexe 1**) préalablement ensemencé avec un champignon-test (*Aspergillus niger* ATCC 16404). Les boîtes sont placées à 4 °C pendant deux heures, pour permettre la diffusion des molécules bioactives puis sont incubées à 30 °C (**TOTORA et al., 1979**).

### 2.3.2 Evaluation des extraits bioactifs

L'activité antifongique est évaluée en utilisant des disques de papiers filtres stériles de 6 mm de diamètres imprégnés par l'extrait brut des actinobactéries. Après séchage, les disques sont déposés à l'aide d'une pince stérile dans la surface du milieu PDA préalablement ensemencé par le champignons *A.niger* ATCC 16404. Les boîtes sont placées à 4 °C pour permettre une bonne diffusion des substances, puis elles sont incubées à 30 °C. (**AYARI et al., 2012**).

## 3.Criblage des activités enzymatiques

### 3.1 Activités cellulolytiques, amylolytiques et pectinolytiques

Pour l'activité cellulolytique , le milieu M9 avec le cellulose (**Annexe 1**) a été ensemencé avec les isolats testés et incubés pendant 4 jours à 30°C, suivi d'une coloration au lugole à 1 % pendant 15 minutes. Une production des cellulases est observée après le développement de zone de décoloration jaune au tour des cultures.

Pour l'activité amylolytique , une solution de lugole à 1% a été ajoutée aux cultures sur gélose à l'amidon (**Annexe 2**) âgées de 72 heures afin de détecter une zone claire résultant de l'hydrolyse de l'amidon (**VENKATA et al., 2013**).

Afin d'évaluer l'activité pectinolytique, les cinq isolats ont été inoculés sur des boîtes de gélose de Vincent (**Annexe 1**) selon la même méthode décrite précédemment, puis incubées à 37 °C pendant 24 heures. Après la période d'incubation, les boîtes ont été inondées avec une solution de 1% lugole et observées pour détecter la formation de zones claires autour des colonies, indiquant la production de pectinases (**VENKATA *et al.*, 2013**).

### 3.2 Activités gélatinolytique et protéolytique

Pour tester le potentiel d'hydrolyse de la gélatine, les isolats ont été ensemencés sur un milieu contenant de la gélatine (**Annexe 1**) et incubés pendant 72 heures. L'activité protéolytique a été évaluée sur gélose au lait écrémé (**Annexe 1**). Après 72 heures d'incubation, la présence d'une zone claire de dégradation indiquait l'hydrolyse de la caséine et de la gélatine (**PRIHANTO et NURSYAM, 2018**).

### 3.3 Activité xylanolytique

Les isolats bactériens ont été soumis à un criblage pour leur activité xylanolytique en utilisant la méthode de criblage sur boîte contenant un milieu minimal à base d'agar à 0,5 % de xylane (**Annexe 1**) comme seule source de carbone (**SRIDEVI et CHARYA, 2013**). Les boîtes de Pétri contenant le milieu ont été ensemencées au centre de la boîte et après incubées à 30°C pendant 3 à 10 jours.

Les boîtes de Pétri sont ensuite inondées avec une solution de rouge Congo à 0.4% (**Annex 2**), après 10 minutes, lavées avec une solution de NaCl 1M (**Annexe 2**) pour rechercher une éventuelle zone jaune claire indiquant la dégradation du xylane et la sécrétion de xylanases (**ADESINA et ONILUDE, 2013**).

## 4. Production des EPS

### 4.1. Conditions de fermentation et extraction des EPS

Les cinq isolats d'actinobactéries ont été cultivés pendant 7 jours dans un milieu de production liquide (**Annexe 1**) à pH 7, à 28 °C et sous agitateur rotatif à 150 tr/min. Après incubation, les biomasses microbiennes ont été récoltées par centrifugation à 5000 tr/min pendant 30 min et l'EPS soluble a été précipité par l'ajout au surnageant de 4 volumes d'éthanol absolu,

puis agité vigoureusement et maintenu à 4 °C pendant toute la nuit. Le précipité a été recueilli par centrifugation à 5 000 tr/min pendant 15 min, pesé, puis suspendu dans 1ml d'eau distillée (SELIM *et al.*, 2018).

#### 4. 2 Propriétés biosurfactantes et émulsifiantes des EPS

L'activité émulsifiante des EPS a été mesurée en mélangeant 1 ml de la suspension d'EPS avec un volume égal de benzène, puis agités vigoureusement au vortex pendant 3 minutes. Le mélange a ensuite été incubé à 4 °C pendant 24 heures (KANNAN *et al.*, 2022). Après incubation, la hauteur de l'émulsion formée a été mesurée. Le Triton X-100 a servi de témoin positif et le PBS de témoin négatif. L'indice d'émulsification est ensuite calculé selon la formule suivante :

**Index d'émulsification % = hauteur de l'émulsion (mm)/hauteur totale du mélange (mm) ×100.**

## **RESULTATS ET DISCUSSION**

## 1. Mise en évidence de l'activité antimicrobienne

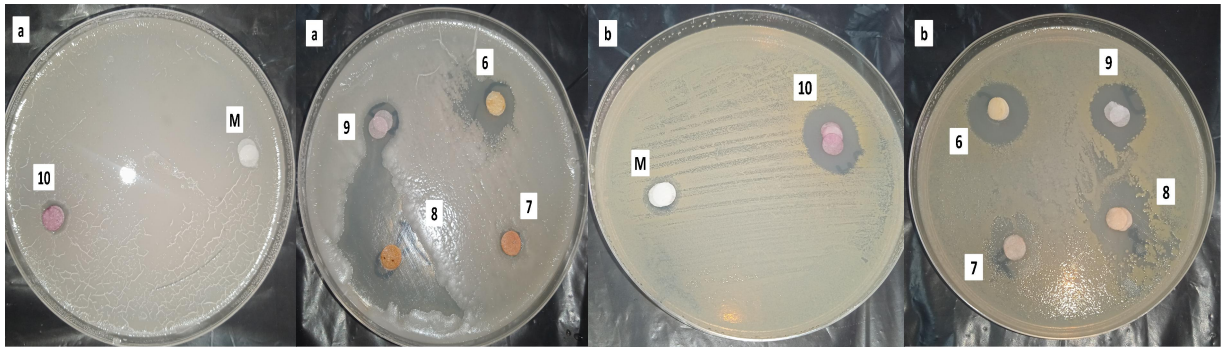
### 1.1 Activité antibactérienne

Nous avons testé l'ensemble des cinq isolats d'actinobactéries (AB6, 7, 8, 9 et 10) contre quatre bactéries pathogènes : *B. subtilis* ATCC 66 33, *S. aureus* ATCC 65 38, *E. coli* NCTC 10538 et *P. aeruginosa* NCIMB 8626. Les résultats sont présentés dans le **tableau 7** et la **figure 09**. Les isolats présentent une activité antibactérienne exclusivement contre les bactéries à Gram positif (*B. subtilis* ATCC 66 33 et *S. aureus* ATCC 65 38), alors qu'aucune activité n'est détectée contre les bactéries à Gram négatif (*E. coli* NCTC 10538 et *P. aeruginosa* NCIMB 86 26) et l'activité antibactérienne varie d'une souche à l'autre.

**Tableau 7** : Les activités antibactériennes des cinq isolats d'actinobactéries selon la méthode des disques.

Les souches tests	Les isolats testés				
	AB6	AB7	AB8	AB9	AB10
<i>B. subtilis</i> ATCC 66 33	++	+	+++	++	+
<i>S. aureus</i> ATCC 65 38	++	+	++	++	++
<i>E. coli</i> NCTC 10538	-	-	-	-	-
<i>P. aeruginosa</i> NCIMB 86 26	-	-	-	-	-

+++ : Forte activité    ++ : Moyenne activité    - : Pas d'activité.



**Figure 9:** Photographies montrant l'activité antibactérienne sur milieu MH des cinq isolats purs d'actinobactéries AB 6, 7, 8, 9, 10, évaluée par la technique des disques. (a) : *B. subtilis* ATCC 66 33, (b): *S. aureus* ATCC 65 38, (M): Méthanol ; le contrôle négatif

Les tests d'activité antibactérienne réalisés sur l'ensemble des isolats révèlent que la majorité d'entre eux exercent une action inhibitrice sur les bactéries à Gram positif (*Staphylococcus aureus* ATCC 6538, *Bacillus subtilis* ATCC 6633), tandis qu'aucun effet n'a été détecté à l'encontre des bactéries à Gram négatif (*Escherichia coli* NCTC 10538 et *Pseudomonas aeruginosa* NCIMB 8626). Ces résultats sont en accord avec les observations faites par d'autres chercheurs dans leurs études (**BASILIO *et al.*, 2003**). Il a été constaté la résistance remarquable des bactéries à Gram négatif par rapport à leurs homologues bactéries Gram positif (**ULLAH *et al.*, 2012**), cela pourrait s'expliquer par la différence de composition des parois cellulaires entre les deux groupes. La structure riche en peptidoglycane dans la paroi cellulaire des bactéries Gram positives rend ces dernières plus sensibles aux agents antibactériens, en particulier les antibiotiques (**YILMAZ *et al.*, 2008**).

## 1.2 Activité antifongique

L'activité antifongique a été évaluée pour les cinq isolats d'actinobactéries (AB6, AB7, AB8, AB9 et AB10) contre *Aspergillus niger* ATCC 16404, selon deux méthodes : la méthode des disques et la méthode des cylindres. Les résultats montrent que seules les souches AB6 et AB10 ont présenté une activité antifongique détectable par la méthode des cylindres (**figure 10**).



**Figure 10:** Photographies montrant l'activité antifongique contre *A.niger* ATCC 16404 sur milieu PDA des cinq isolats d'actinobactéries AB 6,7, 8, 9, 10, évaluée par la technique des cylindres d'agar.

Parmi l'ensemble des isolats testés, seules AB10 et AB6 ont présenté une activité antifongique notable contre le champignon ciblé, avec des effets respectivement modérés et faibles. Ces résultats suggèrent un potentiel antifongique limité mais présent au sein de certaines souches isolées. Des observations similaires ont été rapportées dans une étude menée par **GUPTA *et al.* (2022)**, au cours de laquelle huit souches ont été isolées à partir d'échantillons de solensemencés sur le milieu ISP2. Parmi ces isolats, deux actinobactéries, B11 et B17, ont montré une activité antifongique significative contre *Aspergillus niger* ATCC 16404. Ces deux souches se distinguaient également par la production de pigments solubles, un trait phénotypique fréquemment observé chez divers représentants des actinobactéries.

## 2. Criblage des activités enzymatiques

Nous avons testé l'activité enzymatique des cinq isolats d'actinobactéries étudiés (**tableau 8** et **figure 11**). L'isolat **AB8** se distingue par une forte activité cellulase et une activité moyenne en amylase, ce qui traduit un fort potentiel dans l'hydrolyse des polysaccharides complexes comme la cellulose et l'amidon. **AB10** présente également un profil intéressant, avec une activité élevée en gélatinase et amylase, et une production modérée des xylanases, indiquant une capacité de dégrader à la fois les protéines et les polysaccharides. L'isolat **AB6** montre une forte activité en amylase, une activité moyenne en cellulase et la présence d'activités protéase et pectinase, ce qui suggère une certaine polyvalence. De plus les isolats **AB7** et **AB9** présentent des

capacités hydrolytiques limitées ; **AB7** n'exprime qu'une faible activité protéase, tandis que **AB9** manifeste uniquement des activités moyennes en cellulase.

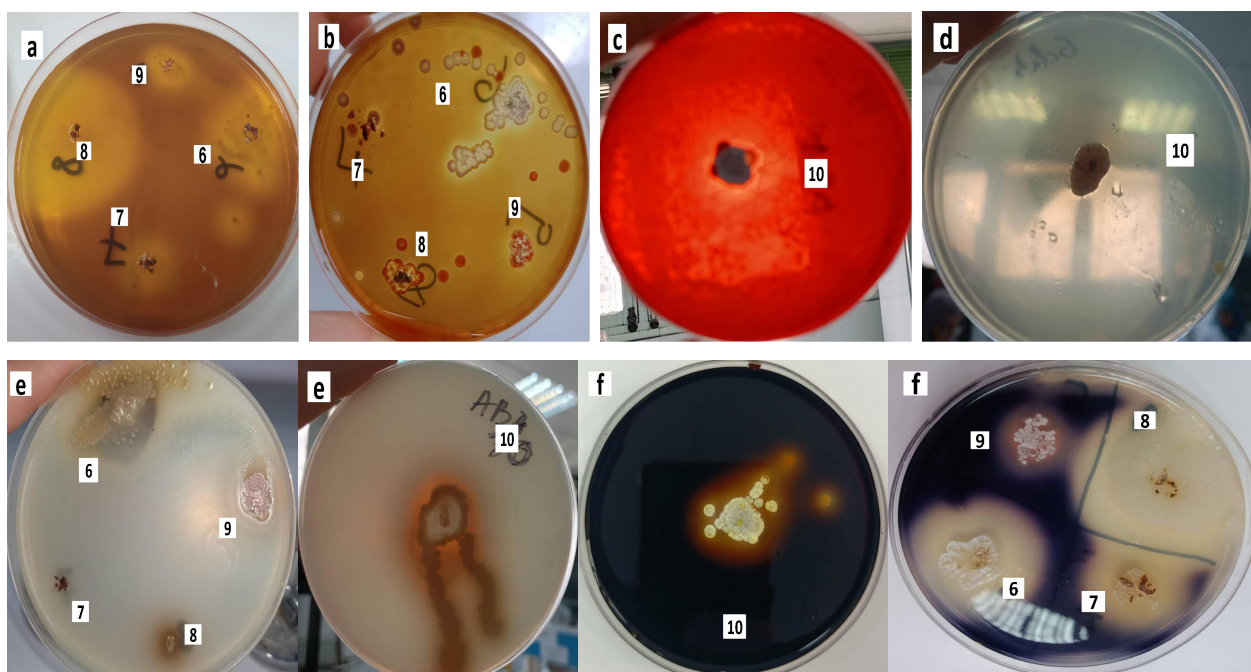
**Tableau 08** : Les activités enzymatiques des cinq isolats d'actinobactéries.

Les Enzymes	AB6	AB7	AB8	AB9	AB10
Cellulase	++	-	+++	+	-
Amylase	+++	++	++	+	++
Protéase	+	-	+	+	+
Péctinase	++	++	-	-	-
Gélatinase	-	-	-	-	+++
Xylanase	-	-	-	-	+

+++ : Forte activité

++ : Moyenne activité

- : Pas d'activité



**Figure 11**: Photographies montrant l'activité enzymatique des cinq isolats d'actinobactéries AB 6, 7, 8, 9, 10, (a): cellulase, (b): péctinase, (c): xylanase, (d): gélatinase, (e): protéase, (f): amylase.

Les enzymes actinobactériennes sont des biocatalyseurs importants ayant diverses applications dans les industries pharmaceutiques, alimentaires, papetières, textiles...etc. (JANAKI *et al.*, 2017). Des études précédentes ont rapporté que les actinobactéries du sol possèdent une forte activité enzymatique. Les actinobactéries étudiées sont décrites souvent comme ayant des activités protéasiques (SUTHINDHIRAN *et al.*, 2013) et amylolytiques importantes (AGUIAR *et al.*, 2022 ; AL-AGAMY *et al.*, 2021; KAFILZADEH et DEHDARI, 2015). De plus, l'activité cellulasique chez les actinobactéries a été rapportée par DAS *et al.* (2014). Ces résultats indiquent que ces bactéries ont le potentiel de produire une large gamme d'enzymes. Cette propriété pourrait résulter de la sélection microbienne naturelle permettant à ces micro-organismes de survivre dans un environnement compétitif (ARJIT *et al.*, 2012). MANIVASAGAN *et al.* (2010) ont étudié vingt-neuf souches isolées des sédiments côtiers de Kodiyakarai (golfe du Bengale), dont dix ont montré une activité enzymatique multiple. Parmi ces souches, la plus prometteuse (GK-22) a été sélectionnée en raison de la formation des zones de lyse des substrats testés (amidon, cellulose et caséines) et des activités enzymatiques élevées après fermentation en milieu liquide pendant 72 heures. L'activité maximale de l'amylase, de la cellulase et de la protéase étaient respectivement estimées à 84, 88 et 89 UI/ml.

La recherche actuelle sur les actinobactéries natives de la région semi-aride du Ceará (Brésil) a mis en évidence leur capacité à synthétiser des enzymes extracellulaires capables de dégrader des substrats contenant le xylane (ALVES *et al.*, 2016 ; LOPES *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2019; SOUSA *et al.*, 2018). Des recherches portant sur l'activité xylanolytique de 17 actinobactéries thermophiles isolées du sol des geysers de Cisolok, ont montré une capacité à dégrader le xylane (RACHMANIA *et al.*, 2020). Selon WALIA *et al.* (2017), l'activité xylanolytique est influencée par des paramètres physiques tels que la température, le pH, la durée d'incubation et la composition nutritive du milieu de culture. Le xylane constitue un composant majeur de l'hémicellulose, présente dans les parois cellulaires des plantes. Ainsi, les bactéries possédant la xylanase pourraient l'utiliser comme source de carbone (MOREIRA et FILHO 2016).

L'activité enzymatique de type gélatinase a été testée chez les cinq isolats d'actinobactéries étudiés. Parmi eux, la seule souche AB10 a présenté une activité gélatinolytique. Cette proportion est différente des proportions observées par SMATI *et al.* (2025) qui ont isolé 18

souches d'actinobactéries à partir de la région de Ghardaïa, en Algérie, dont 13 avaient montré une activité gélatinolytique. De même, **RAMESH et MATHIVANAN . (2009)** ont étudié 288 échantillons marins collectés dans différentes localités du golfe du Bengale, allant du lac Pulicat à Kanyakumari. Parmi les 208 isolats d'actinomycètes testés pour l'étude des activités enzymatiques, 116 ont montré une activité gélatinase.

Les pectinases sont des enzymes lytiques actives dans le processus de compostage, agissant dans la dégradation de la matière organique et contribuant également au cycle naturel du carbone (**PEDROLI *et al.*, 2009 ; WEI *et al.*, 2000**). Des recherches sur les pectinases produites par les actinobactéries ont été documentées dans le monde entier. En 2013, 10 souches de *Streptomyces* isolées d'Inde ont été considérées comme productrices de pectinases (**Arijit *et al.*, 2013**). Sur un total de 95 isolats actinobactériens analysés en Éthiopie, 33 souches ont montré une activité pectinolytique (**KUMAR *et al.*, 2012; OUMER et ABATE, 2018**).

Les pectinases produites par les actinobactéries présentent une bonne résistance aux températures élevées et aux pH extrêmes **BORAH et THAKUR .(2020)** ; avec une production de pectinase chez seulement 21,73 % d'un total de 46 souches actinobactériennes endophytes isolées d'une région d'Inde. De même, une étude menée en Amazonie a montré qu'une seule souche actinobactérienne produisait l'enzyme pectinase (**OLIVEIRA *et al.*, 2017**).

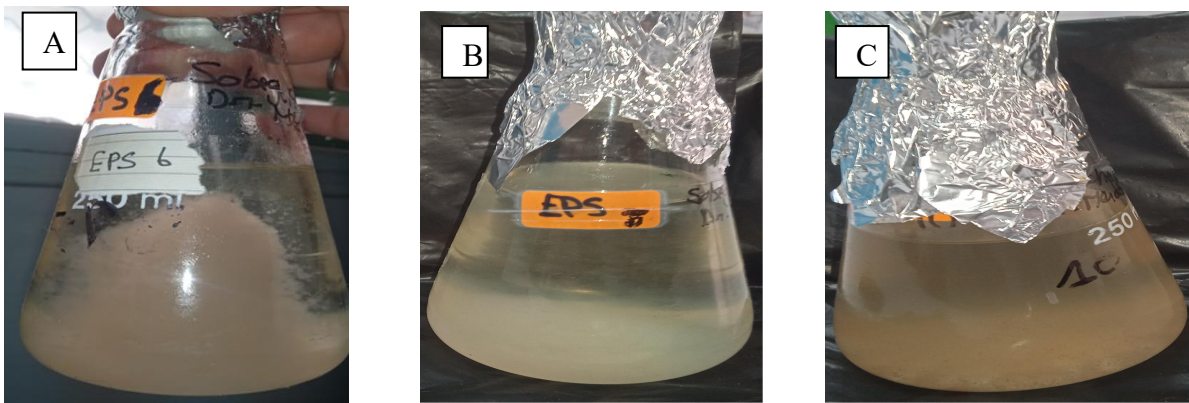
### 3. La production des EPS

Nous avons évalué la production des EPS des cinq isolats d'actinobactéries (AB6, AB7, AB8, AB9 et AB10) après fermentation. Les résultats montrent une variation dans la production d'EPS entre les différentes souches (**tableau 9**). L'isolat **AB6** a produit la plus grande quantité d'EPS (3,25 g), indiquant un fort potentiel de biosynthèse, tandis que l'isolat **AB7** a montré une production minimale (0,73 g). **La figure 12** illustre visuellement les EPS obtenus après fermentation. On y observe une production et une sédimentation variable des EPS au fond des erlenmeyers selon l'isolat testé.

**Tableau 09 :** Quantités en gramme produites et Indices d'émulsification des EPS produits par les cinq isolats d'actinobactérie après la fermentation.

Les EPS	AB6	AB7	AB8	AB9	AB10
Quantité produite(*)	3,25	0,073	0,73	0,11	0,10
Indices d'émulsification	92,85%	50%	73,33%	71,42%	66,66%

(\*) dans 50 ml de milieu de culture après centrifugation



**Figure 12:** Photographies montrant les EPS obtenus après fermentation des isolats (A): AB6, (B): AB8, (C): AB10.

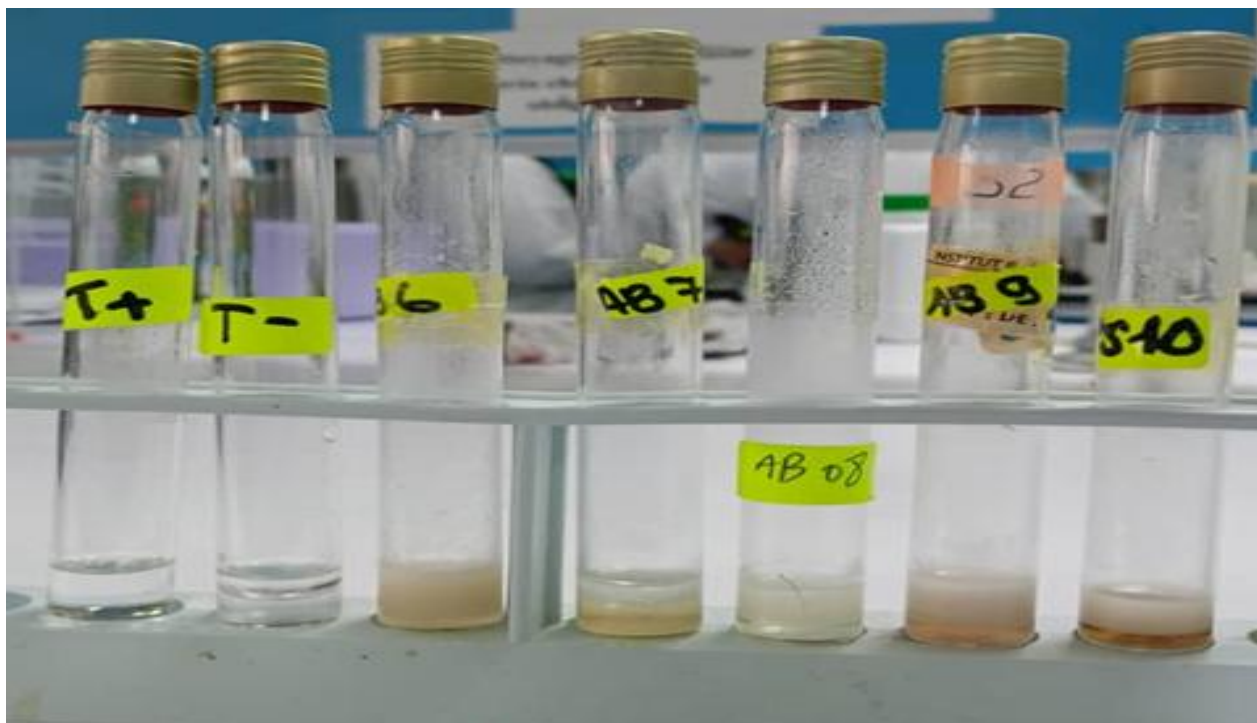
Ces résultats concordent avec les observations rapportées par d'autres chercheurs dans leurs études. Vingt souches d'actinobactéries ont été isolées de la région de Nabq ; parmi elles, quatre ont la capacité de produire des polysaccharides. Les exopolysaccharides produits après quatre jours sont A ; (6,23 g/l), B (7,54 g/l), C (7,45 g/l) et D (7,96 g/l) par les isolats 1, 2, 3 et 4 respectivement. Le rendement en exopolysaccharides dépendait de l'espèce de *Streptomyces* (GOHAR *et al.*, 2006; He *et al.*, 2008).

WANG *et al.* (2003) ont rapporté que les exopolysaccharides produits par *Streptomyces sp.* présentent des activités immunostimulantes, antitumorales, anti-polyarthrite rhumatoïde et antioxydantes. MANIVASAGAN *et al.* (2013) ont extrait des polysaccharides extracellulaires montrant une activité antioxydante à partir d'une souche marine d'actinobactérie *Streptomyces violaceus* MM72.

### 3.1 Propriétés biosurfactantes et émulsifiantes des EPS

L'ensemble des cinq isolats d'actinobactéries évalués pour leur capacité à produire des biosurfactants ont montré une activité positive lors du test (Figure 13). Les cinq isolats d'actinobactéries étudiés ont été soumis au test de biosurfactants, et tous se sont révélés positifs (**figure 13**).

Les tensioactifs ou biosurfactants microbiens sont des molécules aux structures chimiques variées, incluant glycolipides, lipopeptides, lipoprotéines, acides gras, phospholipides et polymères. Ils se distinguent par leur faible toxicité, leur biodégradabilité élevée, leur stabilité aux extrêmes de température, de pH et de salinité, ainsi que par leur compatibilité environnementale. Leurs propriétés uniques, telles que l'abaissement de la tension superficielle, la stabilisation des émulsions et l'activité antimicrobienne, leur confèrent de nombreuses applications dans l'agriculture, l'agroalimentaire, les cosmétiques, la pharmacie et la récupération assistée du pétrole ( **POREMBA *et al.*, 1991; SUREKHA *et al.*, 2010**). L'évaluation de leur activité repose notamment sur la mesure de la tension superficielle à l'aide d'un tensiomètre. Par ailleurs, leur capacité à favoriser la biodégradation des hydrocarbures en fait des agents prometteurs pour la dépollution des sols et des milieux marins contaminés par des polluants hydrophobes (**ZHANG *et al.*, 2023**).



**Figure 13:** Photographies montrant les émulsions formées sous l'effets des EPS des 05 isolats d'actinobactéries AB6, 7, 8, 9 et 10.

Neuf isolats d'actinobactéries ont été isolés à partir de sédiments contaminés par du fioul dans la région de Ras Garib, sur le golfe de Suez en Égypte, et ont été criblés pour la production de biosurfactants. La production extracellulaire de biosurfactants a été initialement évaluée pour tous ces isolats en utilisant un milieu de Kim contenant 3 % d'huile d'olive comme seule source de carbone. Parmi les neuf isolats, seuls deux, RG3 et RG8, ont montré des résultats positifs. Au cours du processus de criblage, la production de biosurfactants a été augmentée en utilisant de l'huile d'olive comme source de carbone par les actinobactéries (ZAMBRY *et al.*, 2017). L'une des méthodes de sélection des producteurs potentiels de biosurfactants est basée sur l'activité émulsifiante (CHAKRABORTY *et al.*, 2015). Les isolats marins d'actinobactéries RG3 et RG8 ont présenté les indices d'émulsification les plus élevés, respectivement  $60 \pm 2,5$  % et  $53 \pm 2,2$  % (KORAYEM *et al.*, 2015). Après le criblage initial effectué par ZAMBRY *et al.* (2017) le test de l'indice d'émulsification a donné des résultats positifs pour tous les isolats d'actinobactéries, les résultats variant entre 84,11 % et 95,80 %.

**Tableau10** : Synthèse de l'ensemble des propriétés évaluées des 5 isolats d'actinobactérie.

Les isolats	Activité antibactérienne				Activité antifongique		Activité enzymatiques						La production des EPS	
	<i>B.subtilis</i>	<i>S.aureus</i>	<i>E.coli</i>	<i>P.aeruginosa</i>	<i>A.niger</i>		Amylase	Cellulase	Protéase	Pécétinase	Gélatinase	Xylanase	Poids (g)	L'Indice d'emulsions (%)
					Disques	cyindre								
<b>AB6</b>	++	++	-	-	-	+	+++	++	+	++	-	-	3,25	92,85
<b>AB7</b>	+	+	-	-	-	-	++	-	-	++	-	-	0,073	50
<b>AB8</b>	+++	++	-	-	-	-	++	+++	+	-	-	-	0,73	73,33
<b>AB9</b>	++	++	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	0,11	71,42
<b>AB10</b>	+	++	-	-	-	+	++	-	+	-	+++	+	0,10	66,66

# **CONCLUSION GENERALE**

## Conclusion générale

---

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer le potentiel biotechnologique des isolats d'actinobactéries provenant des sols semi-arides de la wilaya de Khenchela, à travers l'étude de leurs activités antimicrobiennes (bactériennes et fongiques), enzymatiques, ainsi que leur capacité à produire des EPS et des biosurfactants, en vue d'une valorisation dans les domaines pharmaceutique, agricoles, industriels et environnementaux.

Concernant l'activité antibactérienne, les isolats AB6, AB8 et AB9 ont montré une efficacité notable contre *Bacillus subtilis* et *Staphylococcus aureus*, avec une activité particulièrement élevée observée chez l'isolat AB8. En revanche, aucun des isolats n'a présenté d'effet significatif contre *Escherichia coli* ou *Pseudomonas aeruginosa*. Pour ce qui est de l'activité antifongique, seule l'espèce *Aspergillus niger* a été testée. Parmi les souches évaluées, l'isolat AB10 a exercé une inhibition marquée du développement fongique, tandis qu'AB6 a montré une inhibition modérée selon la méthode des cylindres. Les isolats AB7, AB8 et AB9, quant à eux, n'ont révélé aucune activité antifongique. En ce qui concerne les activités enzymatiques, une diversité fonctionnelle importante a été observée selon les isolats. L'isolat AB8 se distingue par une richesse enzymatique élevée, avec une forte activité cellulolytique, une bonne activité amylasique et une activité protéolytique modérée. L'isolat AB10 se caractérise par une activité notable en gélatinase. L'isolat AB6, pour sa part, présente une forte activité amylasique, associée à des activités modérées en cellulase et en pectinase. AB9 manifeste des activités modérées en cellulase, amylase et pectinase. Enfin, AB7 apparaît comme le moins actif sur le plan enzymatique, avec des activités globalement faibles dans l'ensemble des tests.

Concernant la production des EPS, tous les isolats se sont avérés positifs, mais avec des quantités variables. L'isolat AB6 produisant la plus grande quantité d'EPS, accompagnée d'un indice d'émulsification élevé, ce qui traduit un fort potentiel en tant que biosurfactant. AB7 présente la plus faible production et un indice d'émulsification plus modeste. De plus, les isolats AB8, AB9 et AB10 produisent des quantités et des indices d'émulsification intermédiaires d'EPS.

Les isolats d'actinobactéries présentant à la fois de fortes activités enzymatiques hydrolytiques et la capacité de produire simultanément des EPS émulsifiants ainsi que des biosurfactants constituent une ressource microbienne prometteuse à fort potentiel biotechnologique. Ces caractéristiques fonctionnelles ouvrent des perspectives intéressantes pour

## **Conclusion générale**

---

leur valorisation dans divers secteurs industriels, notamment dans les domaines de la bioremédiation, de l'agroalimentaire, des cosmétiques ou encore de l'industrie pharmaceutique.

# **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## A

- Adesina, F. C., & Onilude, A. A. (2013). Isolation, identification and screening of xylanase and glucanase producing microfungi from degrading wood in Nigeria. *African Journal of Agricultural Research*, 8(34), 4414–4421.
- Aguiar, M. S., Maldonado, R. R., Carvalho, A. L., & Oliveira, E. A. (2022). Methods in actinobacteriology. In *Methods in actinobacteriology* (pp. 74–101). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1728-1\\_74](https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1728-1_74)
- Al-Agamy, M. H., Alhuzani, M. R., Kelany, M. S., & Hamed, M. M. (2021). Production and partial characterization of  $\alpha$ -amylase enzyme from marine actinomycetes. *Biology and Medicine Research International*, 2021, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2021/5289848>
- Alves, D. A. S., Silva, V. M. A., Garcia, F. A. C., Martins, S. C. S. M., & Martins, C. M. (2016). Production of cellulase and amylase by actinobacteria from Brazilian semiarid. *Enciclopédia Biosfera*, 13(24), 1303–1315.
- Alwali, A. Y., & Parkinson, E. I. (2023). Small molecule inducers of actinobacteria natural product biosynthesis. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 50(1), kuad019. <https://doi.org/10.1093/jimb/kuad019>
- Anandan, R., Dharumadurai, D., & Manogaran, G. P. (2016). An introduction to actinobacteria. In D. Dhanasekaran & Y. Jiang (Eds.), *Actinobacteria* (pp. 1–36). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/62561>
- Arar, H. (2019). *Caractérisation phénotypique et étude préliminaire des activités enzymatiques et inhibitrices des actinomycètes du sol de Touggourt et Biskra*. Mémoire de master, Université Mohammed Kheidre de Biskra, 8–9.
- Arijit, D., Sourav, B., Naimisha, R., & Rajan, S. (2013). Improved production and purification of pectinase from *Streptomyces* sp. GHBA10 isolated from Valapattanam mangrove habitat, Kerala, India. *International Research Journal of Biological Sciences*, 2(3), 16–22.

Ayari, A., Morakchi, H., & Gacemi, K. D. (2012). Identification and antifungal activity of *Streptomyces* sp. S72 isolated from Lake Oubeira sediments in North-East of Algeria. *African Journal of Biotechnology*, 11(2), 305–311.

Ayuningrum, D., Sabdaningsih, A., & Jati, O. E. (2021). Screening of actinobacteria-producing amylolytic enzyme in sediment from *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) ponds in Rembang District, Central Java, Indonesia. *Biodiversitas*, 22(4), 1819–1828. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d220427>

## B

Badji, B., Mostefaoui, A., Sabaou, N., Lebrihi, A., Mathieu, F., Seguin, E., & Tillequin, F. (2007). Isolation and partial characterization of antimicrobial compounds from a new strain *Nonomuraea* sp. NM94. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 34(5), 403–412. <https://doi.org/10.1007/s10295-007-0245-7>

Barka, E. A., Vatsa, P., Sanchez, L., Gaveau-Vaillant, N., Jacquard, C., Meier-Kolthoff, J. P., Klenk, H. P., Clément, C., Ouhdouch, Y., & van Wezel, G. P. (2015). Taxonomy, physiology, and natural products of actinobacteria. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 80(1), 1–43. <https://doi.org/10.1128/MMBR.00019-15>

Barka, E. A. (2016). Taxonomy, physiology, and natural products of actinobacteria. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 80(1), 3–4.

Basilio, A., Gonzales, I., Vicente, M. F., Gorrochategui, J., Cabello, A., Gonzales, A., & Genilloud, O. (2003). Patterns of antimicrobial activities from soil actinomycetes isolated under different conditions of pH and salinity. *Journal of Applied Microbiology*, 95(4), 814–823.

Belyagoubi, L. (2014). *Antibiotiques produits par des bactéries (actinomycètes et bactéries lactiques) issus de différents écosystèmes naturels algériens*. Thèse de doctorat, Université Aboubakr Belkaïd-Tlemcen, 7, 16.

Berdy, J. (2005). Bioactive microbial metabolites. *Journal of Antibiotics*, 58(1), 1–26. <https://doi.org/10.1038/ja.2005.1>

Borah, A., & Thakur, D. (2020). Phylogenetic and functional characterization of culturable endophytic actinobacteria associated with *Camellia* spp. for growth promotion in commercial tea cultivars. *Frontiers in Microbiology*, *11*, 318. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00318>

Bouaziz, S. (2018). *Recherche de souches bactériennes locales productrices de substances antimicrobiennes : Isolement, sélection, identification des souches actives et caractérisation partielle des substances bioactives*. Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah–Ouargla.

Boucheffa, K. (2011). *Criblage de souches d'actinomycètes productrices d'antifongiques non-polygéniques : Identification des souches productrices et essai de caractérisation des antifongiques produits*. Mémoire de Magister, Université Abderrahmane Mira–Bejaia, 12–14.

Boudjelal-Bencheikh, F. (2012). *Taxonomie et antagonisme des actinomycètes halophiles d'origine saharienne et caractérisation des composés bioactifs sécrétés par Actinoalloteichus sp. AH97*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure Agronomique, 5–35.

Boukahili, A. B., Chachoua, H., & Mamames, M. (2020). *Caractéristiques des actinomycètes et de certains de leurs métabolites bioactifs (antibiotiques et enzymes)*. Mémoire de master, Université Larbi Ben M'hidi, Oum El-Bouaghi, 55.

Boulali, A., Grini, I., & Hafsa, S. (2018). *Étude de potentiel antioxydant des substances bioactives produites par les actinomycètes extrêmophiles* (Mémoire de master, Université Mohammed Seddik Benyahia – Jijel).

Bouras, N., Mathieu, F., Coppel, Y., & Lebrihi, A. (2005). Aurasperone F—a new member of the naphtha gamma-pyrone class isolated from a cultured microfungus *Aspergillus niger* C-433. *Natural Product Research*, *19*(7), 653–659.

Bouziani, S., & Abdelhafidi, M. (2019). *Étude de l'activité antibactérienne des souches d'actinomycètes isolées à partir du sol de Laghouat*. Mémoire de master, Université Amar Telidji Laghouat, 2.

## C

Cavala, M., & Eberlin, T. (1994). Isolement des Streptomycetes du sol. *L'Operon*, *19*, 13–17.

Chakraborty, S., Ghosh, M., Chakraborti, S., Jana, S., Sen, K. K., & Kokare, C. (2015). Biosurfactant produced from *Actinomycetes nocardioopsis* A17: Characterization and its

biological evaluation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 79, 405–412. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.04.056>

Chelghoum, I., & Ghedier, A. (2020). Étude rétrospective sur les activités biologiques de quelques souches d'actinobactéries isolées du sol saharien de la région de Ouargla .Mémoire de master. Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie, 7 p.

Colombié, V. (2005). *Description de la production de spiramycine par Streptomyces ambofaciens: Modélisation métabolique, simulation et capteur logiciel* .Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.

## D

Das, P., Solanki, R., & Khanna, M. (2014). Isolation and screening of cellulolytic actinomycetes from diverse habitats. *International Journal of Advanced Biotechnology Research*, 5(3), 438–451.

Davinha, F. N. M., Gravina-Oliveira, M. P., Franco, M. N., Macrae, A., Da Silva Bon, E. P., Nascimento, R. P., & others. (2011). Cellulase production by *Streptomyces viridobrunneus* SCPE-09 using lignocellulosic biomass as inducer substrate. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 164(3), 256–267. <https://doi.org/10.1007/s12010-011-9152-5>

Derouiche, K., Ferkhi, H., & Rouina, R. (2011). Les substances bioactives produites par les actinomycètes des milieux extrêmes (Mémoire de master recherche). Université de Jijel, Algérie, 6–43 p.

## F

Fernandes de Souza, H., Ribeiro, B. D., Freitas, S. P., & Coelho, M. A. Z. (2022). Recent advances in the application of xylanases in the food industry and production by actinobacteria: A review. *Food Research International*, 162(Pt B), 112103. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112103>

Fitri, L., Bessania, M. A., Septi, N., & Suhartono, S. (2021). Isolation and characterization of soil actinobacteria as cellulolytic enzyme producer from Aceh Besar, Indonesia. *Biodiversitas*, 22(11), 5169–5180. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d221155>

## G

Gebreyohannes, G. (2015). Isolation and optimization of amylase producing bacteria and actinomycetes from soil samples of Maraki and Tewedros campus, University of Gondar, North West Ethiopia. *African Journal of Microbiology Research*, 9(31), 1877–1882. <https://doi.org/10.5897/AJMR2014.7027>

Ghosh, A., & Dutta, D. (2020). Actinobacteria in special and extreme habitats: Diversity, functional roles and environmental adaptations. In *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*. Elsevier.

Gohar, Y., Beshay, U., Daba, A., & Hafez, E. (2006). Antimicrobial activity of some actinomycetes isolated from Egyptian soil. *Polish Journal of Microbiology*, 55, 179–187.

Gobalakrishnan, R., & Sivakumar, K. (2017). Systematic characterization of potential cellulolytic marine actinobacteria *Actinoalloteichus* sp. MHA15. *Biotechnology Reports*, 13, 30–36. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2016.12.003>

Grigorova, R., & Norris, J. R. (1990). *Methods in microbiology: Volume 22 – Actinomycetes*. Academic Press.

Gupta, P., Imchen, M., & Kumavath, R. (2022). Exploration and characterization of melanin pigment produced by actinomycetes. In D. Dharumadurai (Ed.), *Methods in Actinobacteriology* (Springer Protocols Handbooks). Humana. [https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1728-1\\_35](https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1728-1_35)

## H

Haritha, R., Kumar, K. S., Jagan Mohan, Y. S. Y. V., & Ramana, T. (2010). Amylolytic and proteolytic actinobacteria isolated from marine sediments of Bay of Bengal. *International Journal of Microbiological Research*, 1(2), 37–44. <https://doi.org/10.5829/idosi.ijmr.2010.1.2.1102>

He, F., Yang, Y., Yang, G., & Yu, L. (2008). Isolation and characterization of antifungal substances from marine actinomycetes. *Zeitschrift für Naturforschung C*, 63(3–4), 181–188. <https://doi.org/10.1515/znc-2008-3-404>

## I

Ibrahimi, M. (2020). *Extraction et caractérisation de nouveaux antibactériens produits par les actinobactéries prédatrices d'origine marine*. Thèse de doctorat, Université de Poitiers. Université de Poitiers. pp. 32–39.

## J

Jain, S., Gupta, I., Walia, P., & Swami, S. (2022). *Application des actinobactéries à l'agriculture, aux nanotechnologies et à la bioremédiation*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.104385>

Janaki, T. (2017). Enzymes from actinomycetes—Review. *International Journal of ChemTech Research*, 10(1), 176–182.

Javed, Z., Tripathi, G. D., Mishra, M., & Dashora, K. (2021). Actinomycetes – The microbial machinery for the organic-cycling, plant growth, and sustainable soil health. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 31, 101893. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101893>

Joseph, J. G., Ganapathy, D., Kannan, K., Sundarrajan, S., Pitchiah, S., & Ramakrishna, S. (2022). Marine archaeal extracellular polymeric substances from *Halococcus* AMS12: Their characterization and biological properties. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(12), 1788. <https://doi.org/10.3390/jmse10121788>

## K

Kaari, M., Manikkam, R., Annamalai, K. K., & Joseph, J. (2023). Actinobacteria as a source of biofertilizer/biocontrol agents for bio-organic agriculture. *Journal of Applied Microbiology*, 134(2), 1xac047. <https://doi.org/10.1093/jambio/1xac047>

Kaur, J., Chadha, B. S., & Kumar, B. A. (2019). *Exopolysaccharides from Actinobacteria: Production, Characterization and Applications*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 35(3), 40.

Kämpfer, P. (2012). The Family *Streptomycetaceae*, Part I: *Streptomyces*. In: Rosenberg, E., DeLong, E. F., Lory, S., Stackebrandt, E., & Thompson, F. (Eds.), *The Prokaryotes: Actinobacteria* (pp. 889–1010). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-30138-4\\_90](https://doi.org/10.1007/978-3-642-30138-4_90)

Kafilzadeh, F., & Dehdari, F. (2015). Amylase activity of aquatic actinomycetes isolated from the sediments of mangrove forests in south of Iran. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 41, 197–201. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2015.04.003>

Kannan, K., Sureka, C., & Dhandapani, R. (2022). Production et caractérisation d'un exopolysaccharide par *Bacillus amyloliquefaciens* : Applications biotechnologiques. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(7), 3792.

Korayem, A., Abdelhafez, A., Zaki, M., & Saleh, E. (2015). Optimization of biosurfactant production by *Streptomyces* isolated from Egyptian arid soil using Plackett–Burman design. *Annals of Agricultural Sciences*, 60, 209–217.

Kumar, P. S., Raj, J. P. P., Durairandiyar, V., & Ignacimuthu, S. (2012). Antibacterial activity of some actinomycetes from Tamil Nadu, India. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 2(12), 936–943.

## L

Lamari, L. (2006). *Production de nouveaux antibiotiques du groupe des pyrrothines par une nouvelle espèce d'actinomycète, Saccharothrix algeriensis*. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.

Lechevallier, M. P., & Lechevallier, H. A. (1970). Chemical composition as a criterion in the classification of actinomycetes. *Bacteriological Reviews*, 34(4), 474–492.

Leulmi, N. (2019). *Identification polyphasique des souches d'actinobactéries isolées d'échantillons de sols salins-alcalins. Caractérisation structurale des antibiotiques produits*. Thèse de doctorat, Université de Constantine 1 – Frères Mentouri.

Lopes, J. B. A. C., Silva, V. M. A., Cavalcante, F. G., Martins, S. C. S., & Martins, C. M. (2018). Production of extracellular hydrolytic enzymes by actinobacteria from soil and litter of semiarid region. *Enciclopédia Biosfera*, 15(27), 35–50.

## M

Mandal, S., & Bhatt, P. (Eds.). (2020). *Recent advancements in microbial diversity*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-04546-3>

Manivasagan, P., Gnanam, S., Sivakumar, K., Thangaradjou, T., Vijayalakshmi, S., & Balasubramanian, T. (2010). Isolation, identification and characterization of multiple enzyme producing actinobacteria from sediment samples of Kodiyakarai coast, the Bay of Bengal. *African Journal of Microbiology Research*, 4(14), 1550–1559. <http://www.academicjournals.org/ajmr>

Manivasagan, P., Sivasankar, P., Venkatesan, J., Senthilkumar, K., Sivakumar, K., & Kim, S. (2013). Production of extracellular polysaccharides from *Streptomyces* sp. and its antioxidant activity. *International Journal of Biological Macromolecules*, 59, 29–38. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2013.04.042>

Mast, Y., & Stegmann, E. (2019). Actinomycetes: The antibiotics producers. *Antibiotics*, 8(3), 105. <https://doi.org/10.3390/antibiotics8030105>

McKittrick, J., Chen, P. Y., Bodde, S. G., Yang, W., Novitskaya, E. E., & Meyers, M. A. (2012). La structure, les fonctions et les propriétés mécaniques de la kératine. *JOM*, 64(4), 449–468. <https://doi.org/10.1007/s11837-012-0035-0>

Mebrat, A. (2024). Actinobacteria: A promising source of secondary metabolites for pharmaceutical and agricultural applications. *Journal of Microbial Biotechnology*, 12(2), 145–160. <https://doi.org/10.1234/jmb.2024.012345>

Meziani, A., & Mahcene, H. (2017). *Activités hydrolases des souches fongiques : Production par fermentation de cellulase et d'α-amylase par Penicillium sp. sur substrat solide* (Mémoire de Master, Université de Mentouri Constantine).

Moreira, L. R. S., & Filho, E. X. F. (2016). Insights into the mechanism of enzymatic hydrolysis of xylan. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100(12), 5205–5214. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7555-0>

## N

Nagendran, S., Agrawal, S. S., & Patwardhan, A. G. (2021). Eco-friendly association of plants and actinomycetes. In N. Shrivastava, S. Mahajan, & A. Varma (Eds.), *Symbiotic soil microorganisms* (pp. 99–116). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-51916-2\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-51916-2_6)

Nazari, M. T., Machado, B. S., Marchezi, G., Crestani, L., Ferrari, V., Colla, L. M., & Piccin, J. S. (2022). Use of soil actinomycetes for pharmaceutical, food, agricultural, and environmental purposes. *3 Biotech*, *12*(9), 232. <https://doi.org/10.1007/s13205-022-03307-y>

Newman, D. J., & Cragg, G. M. (2020). Natural products as sources of new drugs over the nearly four decades from 01/1981 to 09/2019. *Journal of Natural Products*, *83*(3), 770–803. <https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.9b01285>

## O

Oliveira, A. P. G., Sabino, S. M., Gandine, S. M., Moulin, T., & Amaral, A. A. (2017). Importance of actinobacterias in ecological, industrial, and economic processes. *Enciclopédia Biosfera*, *10*(18), 3938–3952.

Omura, S., & Crump, A. (2004). The life and times of ivermectin: a success story. *Nature Reviews Microbiology*, *2*(12), 984–989. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1048>

Ouchari, L. (2019). *Actinobactéries du sable aride de Merzouga : diversité taxonomique et activité antimicrobienne*. Thèse de doctorat, Université Cadi Ayyad, Marrakech.

Oumer, O. J., & Abate, D. (2018). Comparative studies of pectinase production by *Bacillus subtilis* strain Btk 27 in submerged and solid-state fermentations. *BioMed Research International*, *2018*, Article ID 2820758. <https://doi.org/10.1155/2018/2820758>

## P

Pedrolli, D. B., Monteiro, A. C., Gomes, E., & Carmona, E. C. (2009). Pectin and pectinases: Production, characterization and industrial application of microbial pectinolytic enzymes. *The Open Biotechnology Journal*, *3*, 9–18. <https://doi.org/10.2174/1874070700903010009>

Poremba, K., Gunkel, W., Lang, S., & Wagner, F. (1991). Toxicity testing of synthetic and biogenic surfactants on marine microorganisms. *Environmental Toxicology and Water Quality*, *6*(2), 157–163. <https://doi.org/10.1002/tox.2530060207>

Prabakaran, P., & Raja, A. (2011). Preliminary screening of antimycobacterial effect of psychrophilic *Actinomycetes* isolated from Manali ice point, Himachal Pradesh. *Journal of Microbiology and Antimicrobials*, 3(2), 41–46.

Prakash, D., Nawani, N., Prakash, M., Bodas, M., Mandal, A., Khetmalas, M., & Kapadnis, B. (2013). Actinomycetes: A repertory of green catalysts with a potential revenue resource. *BioMed Research International*, Article ID 264020, 8 pages. <https://doi.org/10.1155/2013/264020>

Prescott, L. M., Harley, J. P., Klein, D. A., Wiley, J. M., Sherwood, L. M., & Woolverton, C. J. (2010). *Microbiologie* (7e éd.). De Boeck.

Prihanto, A. A., & Nursyam, H. (2018). Screening and molecular identification of gelatinase-producing bacteria isolated from Indonesian mangrove ecosystem. *Asian Journal of Agriculture and Biology*, 6(3), 316–320.

## R

Rachmaia, M. K., Ningsih, F., Setyaningsih, P. P., Syafitri, W. A., Fitria Sari, D. C. A., Yabe, S., Yokota, A., Oetari, A., & Sjamsuridzal, W. (2020). Xylan-degrading ability of thermophilic Actinobacteria isolated from soil in a geothermal area. *Biodiversitas*, 21(1), 144–154.

Rachniyom, H., Matsumoto, A., Inahashi, Y., Take, A., Takahashi, Y., & Thamchaipenet, A. (2018). *Actinomadura barringtoniae* sp. nov., an endophytic actinomycete isolated from the roots of *Barringtonia acutangula* (L.) Gaertn. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 68, 1584–1590. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.002724>

Ramesh, S., & Mathivanan, N. (2009). Screening of marine actinomycetes isolated from the Bay of Bengal, India for antimicrobial activity and industrial enzymes. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 25(12), 2103–2111.

Ranjani, A., Dhanasekaran, D., & Gopinath, P. M. (2016). Une introduction aux actinobactéries. InTech. <https://doi.org/10.5772/62976>

Rifat, H., Khan, M. A., Ahmad, M., Ahmad, M. M., Abdin, M. Z., Musarrat, J., & Javed, S. (2013). Chitinase: An update. *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*, 5(1), 21–29. <https://doi.org/10.4103/0975-7406.106561>

## S

Saini, A., Aggarwal, N. K., Sharma, A., & Yadav, A. (2015). Actinomycetes: A source of lignocellulolytic enzymes. *Enzyme Research*, 2015, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2015/279381>

Salwan, R., & Sharma, V. (2020). Physiology of extremophiles. In R. Salwan & V. Sharma (Éds.), *Physiological and Biotechnological Aspects of Extremophiles* (pp. 13–22). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818322-9.00002-2>

Santos, F. D. dos, Sousa, J. B. de, Silva, V. M. A., Bandeira, L. L., Silva, V. B. da, Fernandes Júnior, P. I., Martins, S. C. S., & Martins, C. M. (2023). Enzymatic profile of actinobacteria across a desertification gradient in the Brazilian semiarid region. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 18(1). <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n1-041>

Satpute, S. K., Banat, I. M., Dhakephalkar, P. K., Banpurkar, A. G., & Chopade, B. A. (2010). Biosurfactants, bioemulsifiers and exopolysaccharides from marine microorganisms. *Biotechnology Advances*, 28(4), 436–450. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.02.006>

Saxena, R. K., Dutt, K., Agarwal, L., & Nayyar, P. (2007). A highly thermostable and alkaline amylase from a *Bacillus* sp. isolate SWB-10: Production, purification, and characterization. *Process Biochemistry*, 42(4), 512–518. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2006.10.007>

Saxton, R. A., & Sabatini, D. M. (2017). mTOR signaling in growth, metabolism, and disease. *Cell*, 168(6), 960–976. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2017.02.004>

Selim, M. S., Mohamed, S. S., Asker, M. M., Salama, A. A. A., Abdallah, H. M. I., & Yassen, N. N. (2018). Production and characterization of exopolysaccharide from marine *Bacillus* sp.

- MSHN2016 with studying its effect on isoniazid/rifampicin-induced hepatic and renal toxicities in rats. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 8(8), 1–11.
- Seyedkazemi, M. H., & Najafpour, G. D. (2019). Production of amylase by actinobacteria: A review on recent advances and applications. *Journal of Applied Microbiology*, 127(2), 289–302. <https://doi.org/10.1111/jam.14324>
- Silva, V. M. A., Lima, J. V. L., Gondim, P. M., Martins, C. M., & Martins, S. C. M. (2015). Effect of irrigation and type of cultivation on richness and diversity of chromogenic actinobacteria of soil from Ceará semiarid region. *Enciclopédia Biosfera*, 11, 2965–2979.
- Silva, V. M. A., Martins, C. M., Cavalcante, F. G., Ramos, K. A., Silva, L. L., Menezes, F. G. R., Martins, R. P., & Martins, S. C. S. (2019). Cross-feeding among soil bacterial populations: Selection and characterization of potential bio-inoculants. *Journal of Agricultural Science*, 11(5), 1–12.
- Singh, A. R., & Gupta, R. D. (2015). Différentes applications industrielles des enzymes chitinolytiques. In H. Kuhn (Éd.), *Chitinases from Bacteria to Human: Properties, Applications, and Future Perspectives* (8 p.).
- Smati, M., Bramki, A., Makhlof, F. Z., Djebaili, R., Farda, B., Abdelhadi, F. Z., Abdelli, N., Kitouni, M., & Pellegrini, M. (2025). Isolation of actinobacteria from date palm rhizosphere with enzymatic, antimicrobial, antioxidant, and protein denaturation inhibitory activities. *Biomolecules*, 15(1), 65.
- Somya, K. L., & Ramalingappa, B. (2022). Biochemical characterization of actinomycetes isolated from different soil samples. *International Journal of Research in Academics World*, 1, 11–17.
- Sousa, J. B., Lira, I. C., Martins, S. C. S., & Martins, C. M. (2018). Efeito da antropização sobre a produção da enzima xilanase em actinobactérias. *Enciclopédia Biosfera*, 15(28), 1033–1042.
- Sridevi, B., & Charya, M. A. S. (2013). Isolation, identification and screening of potential cellulase-free xylanase producing fungi. *African Journal of Biotechnology*, 10(22), 4624–4630.

Surekha, K. S., Banat, I. M., Dhakephalkar, P. K., Banpurkar, A. G., & Chopade, B. A. (2010). Biosurfactants, bioemulsifiers and exopolysaccharides from marine microorganisms. *Biotechnology Advances*, 28(4), 436–450.

Suthindhiran, K., Jayasri, M. A., Dipali, D., & Prasar, A. (2013). Screening and characterization of protease producing actinomycetes from marine saltern. *Journal of Basic Microbiology*, 53(1), 1–12. <https://doi.org/10.1002/jobm.201300563>

## T

Theilleux, J., Leveau, J. Y., & Bouix, M. (1993). The actinomycetes. In *Industrial Microbiology: Microorganisms of Industrial Interest* (pp. 468–488). Tec & Doc Lavoisier.

Tотора, A. M., Cabrini, E., & Viviani, M. A. (1979). Sensibilité *in vitro* des levures à cinq antibiotiques. Comparaison de deux méthodes: C.M.I. en gélose et méthode des disques. *Bulletin de la Société Française de Mycologie Médicale*, 8, 69–74.

Topatan, Z. S., & Kati, H. (2022). Screening of actinomycetes from *Cystoseira barbata* (Stackhouse) C. Agardh compost for their enzyme and antibacterial activities. *Trakya University Journal of Natural Science*, 23(1), 113–124. <https://doi.org/10.16989/trkjnat.1053977>

## U

Ullah, I., Masood, A., Chuadhry, I. J. M., Noureen, U., & Jadoon, W. A. (2012). Actinomycetes screening for bioactive potential isolated from the moist forest soils of Pakistan. *Records of the Zoological Survey of Pakistan*, 21, 10–13.

## V

Venkata, E., Raju, N., & Divakar, G. (2013). Production of pectinase by using *Bacillus circulans* isolated from dump yards of vegetable wastes. *International Journal of Pharmaceutical Science and Research*, 4(7), 2615–2622.

Verma, S., & Kuila, A. (2019). Bioremediation of heavy metals by microbial process. *Environmental Technology & Innovation*, 14, 100369.

Vijayabharathi, R., Sathya, A., Gopalakrishnan, S., & Sharma, H. C. (2016). A Renaissance in Plant Growth-Promoting and Biocontrol Agents: Endophytic Actinobacteria. In *Biocontrol Agents and Secondary Metabolites* (pp. 1–17). Springer.

## W

Walia, A., Guleria, S., Mehta, P., Chauhan, A., & Parkash. (2017). Microbial xylanases and their industrial application in pulp and paper biobleaching: A review. *3 Biotech*, 7(1), 11.

<https://doi.org/10.1007/s13205-016-0584-6>

Wang, L., Li, S., & Li, Y. (2003). Antitumor and immunostimulating activities of polysaccharides from *Streptomyces* sp. *FEMS Microbiology Letters*, 220(1), 21–27.

[https://doi.org/10.1016/S0378-1097\(03\)00894-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1097(03)00894-3)

Wei, Y. S., Fan, Y. B., Wang, M. J., & Wang, J. S. (2000). Composting and compost application in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 30(4), 277–300.

[https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(00\)00072-9](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(00)00072-9)

Williams, S. T., Goodfellow, M., Alderson, G., Wellington, E. M., Sneath, P. H. A., & Sackin, M. J. (1983). Numerical classification of *Streptomyces* and related genera. *Journal of General Microbiology*, 129(6), 1743–1813

## Y

Yilmaz, E. I., Yavuz, M., & Kizil, M. (2008). Molecular characterization of rhizospheric soil *Streptomyces* isolated from indigenous Turkish plants and their antimicrobial activity.

*World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 24, 1461–1470.

<https://doi.org/10.1007/s11274-007-9610-8>

## Z

Les références:

---

- Zaika, L. L. (1988). Spices and herbs: Their antimicrobial activity and its determination. *Journal of Food Safety*, 9(2), 97–117. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4565.1988.tb00511.x>
- Zambry, N. S., Ayoib, A., Noh, N. A. M., & Yahya, A. R. M. (2017). Production and partial characterization of biosurfactant produced by *Streptomyces* sp. R1. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 40(7), 1007–1016. <https://doi.org/10.1007/s00449-017-1757-6>
- Zanane, C. (2019). *Isolement et caractérisation biochimique, physiologique et moléculaire des actinomycètes des sols salés de Béni Amir (Béni Mellal–Maroc)* (Thèse de doctorat). Université Sultan Moulay Slimane.
- Zhang, Y., Wang, L., & Liu, J. (2023). *Rhamnolipid Biosurfactants Enhance Microbial Oil Biodegradation in Marine Environments*. *ACS ES&T Water*, 3(4), 1234–1242.

# **Annexes**

**Annexes 1:**

**1) Les milieux de culture**

**A) YMEA**

Extrait de levure	4g
Extrait de malt	10g
Glucose	4g
Agar	20g
Eau distillée	1L
pH	7-7,5

**B) PDA**

Glucose	20g
Pommes de terre	200g
Agar	20g
pH	7-7,5
Eau distillée	1L

**2) milieux d'évaluation enzymatique**

**A) Amylase**

Amidon soluble	2g
Peptone	5g
Extrait de levure	1g
Agar	20 g
Eau distillée	1L
pH	7-7.5

**B) M9**

CMC	2g
NaCO <sub>3</sub>	2g
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	1g
MgSO <sub>4</sub>	0.5g
KCL	0.5g

Peptone	0.2g
Agar	18g
Eau distillée	1L

**C) Vincent**

Pectine	10g
NaNO <sub>3</sub>	2g
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	1g
MgSO <sub>4</sub>	0.5g
KCL	0.5g
Peptone	0.5g
Agar	20g
Eau distillée	1L
pH	7 -7.5

**D) Gélose au lait**

Lait écrémée	500ml
Extrait de levure	0.5g
Agar	10g
PH	7 -7.5
Eau distillée	1L

**E) Xylanase**

Xylan	5g
MgSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O	0.05 g
NaCl	0.05g
CaCl <sub>2</sub>	0.01g
Extrait de levure	2g
Peptone	0.5 g
Agar	20g

PH	7 -7.5	Extrait de levure	1g
Eau distillée	1L	Peptone	4g
<b>F) Gelatinase</b>		Agar	18g
Gelatine	12g	PH	7 -7.5

### 3) Milieu de production des EPS

Glucose	30g	CaCO3	1g
NaNO3	3g	PH 7, 28 °C et 150 tr/min sur agitateur rotatif	
Extrait de levure	5g	Eau distillée	1L
Na Cl	4g		
MgSO4	0,5g		
K2HPO4	1g		

### Annexe 02: Les solutions

#### A) Eau physiologique

Chlorure de sodium....09g
Eau distillée .....1000ml
Solution de Mac Farland
Solution de BaCl2. 2H2O,
1% .....0.6ml
Solution de H2SO4, 1 %.....99.4ml

#### B) Solution de Lugol

Iodure de potassium (KI)	2g
Diiodure (I2)	1g
Eau distillée	100ml
KH2PO4	0.24 g

#### C) Solution de rouge Congo : 0.4%

0.4 g de rouge Congo en poudre.  
Dissoudre le rouge Congo dans 100 mL d'eau distillée.

#### D) Solution d'NaCl

NaCl (chlorure de sodium) : 5.85g  
Eau distillée : jusqu'à 100 ml

#### E) Solution de PBS

Nacl	0.8g
Kcl	0.02g
Na2 HPO4	0.142g

# **RESUMES**

**Résumé :**

Les actinobactéries, des bactéries filamenteuses principalement présentes dans les sols, sont reconnues pour leur capacité à produire une large gamme de molécules bioactives, en particulier des antibiotiques. Nous avons travaillé sur cinq isolats d'actinobactéries préalablement obtenus à partir de sols semi-arides de la wilaya de Khenchela. L'activité antibactérienne a été évaluée par la méthode des disques, tandis que l'activité antifongique a été examinée par la méthode des disques et des cylindres. Par la suite, une étude sur la production des exopolysaccharides (EPS) a été réalisée par fermentation, suivie de leur extraction. Enfin, un test de biosurfactant a été effectué pour évaluer leur activité tensioactive.

Les résultats de cette étude révèlent une variabilité marquée des activités antimicrobiennes, enzymatiques ainsi que de la capacité de production des EPS chez les cinq isolats d'actinobactéries (de AB6 à AB10). L'isolat AB6 se distingue par son activité antibactérienne contre *Bacillus subtilis* et *Staphylococcus aureus*, ainsi que par une activité antifongique positive contre *Aspergillus niger* selon la méthode des disques. L'isolat AB8 montre une forte activité enzymatique, notamment la cellulase, en plus d'une bonne activité antibactérienne contre *B. subtilis*. Ainsi L'isolat AB10 se caractérise par une activité gélatinolytique élevée et une activité antifongique contre *Aspergillus niger*. Par ailleurs, l'ensemble des isolats ont démontré leur capacité à produire des exopolysaccharides (EPS) et ont également présenté une activité biosurfactante.

Les résultats obtenus démontrent le potentiel biotechnologique considérable des actinobactéries isolées des sols semi-arides de Khenchela. Leur diversité fonctionnelle en termes d'activités antimicrobiennes, enzymatiques et de production de composés bioactifs tels que les EPS ouvre des perspectives intéressantes pour leur exploitation dans les domaines pharmaceutiques, agricoles, industriels et environnementaux.

**Les mots clés :** Sol , Actinobactéries, molécules bioactives , hydrolases, EPS, biosurfactants

**Abstract :**

Actinobacteria, filamentous bacteria predominantly found in soils, are well known for their ability to produce a wide range of bioactive compounds, particularly antibiotics. In this study, we worked on five actinobacterial isolates previously obtained from semi-arid soils in the Khenchela region. Antibacterial activity was assessed using the disk diffusion method, while antifungal activity was evaluated using both the disk and cylinder methods. Subsequently, a study on the production of exopolysaccharides (EPS) was conducted through fermentation, followed by their extraction and testing for biosurfactant activity.

The results of this study reveal significant variability in the antimicrobial and enzymatic activities, as well as in the EPS production capacity of the five actinobacterial isolates (AB6 to AB10). Isolate AB6 stood out for its antibacterial activity against *Bacillus subtilis* and *Staphylococcus aureus*, along with a positive antifungal activity against *Aspergillus niger* using the disk method. Isolate AB8 exhibited strong enzymatic activity, particularly cellulase, and showed good antibacterial activity against *B. subtilis*. Meanwhile, isolate AB10 was characterized by high gelatinolytic activity and antifungal activity against *A. niger*. Furthermore, all isolates tested positive for EPS production and demonstrated biosurfactant activity.

The results obtained highlight the significant biotechnological potential of actinobacteria isolated from the semi-arid soils of Khenchela. Their functional diversity in terms of antimicrobial and enzymatic activities, as well as their ability to produce bioactive compounds such as EPS, offers promising prospects for applications in pharmaceutical, agricultural, industrial, and environmental fields.

**Keywords:** Soil, Actinobacteria, Bioactive molecules, Hydrolases, EPS (Exopolysaccharides), Biosurfactants

## الملخص:

تُعدّ الأكتينوبكتيريا، بكتيريا خيطية توجد أساساً في التربة، معروفة بقدرتها على إنتاج مجموعة واسعة من الجزيئات النشطة بيولوجياً، وخاصة المضادات الحيوية. لقد عملنا على خمس عزلات من الأكتينوبكتيريا تم الحصول عليها مسبقاً من تربة شبه قاحلة في ولاية خنشلة. تم تقييم النشاط المضاد للبكتيريا باستخدام طريقة الأقراص، بينما تم فحص النشاط المضاد للفطريات باستخدام طريقتي الأقراص والأسطوانات. بعد ذلك، أُجريت دراسة حول إنتاج البوليسكاريدات خارج الخلية (EPS) عبر التخمر، تلتها عملية استخلاصها. وأخيراً، تم إجراء اختبار للمستحلبات الحيوية من أجل تقييم نشاطها السطحي الخافض للتوتر السطحي.

تكشف نتائج هذه الدراسة عن تباين واضح في الأنشطة المضادة للميكروبات والأنشطة الإنزيمية، وكذلك في القدرة على إنتاج البوليسكاريدات خارج الخلية لدى العزلات الخمس من الأكتينوبكتيريا (AB6- AB10). تميزت العزلة AB6 بنشاطها المضاد للبكتيريا ضد *Bacillus subtilis* و *Staphylococcus aureus*، فضلاً عن نشاطها الإيجابي المضاد للفطريات ضد *Aspergillus niger* وفقاً لطريقة الأقراص. كما أظهرت العزلة AB8 نشاطاً إنزيمياً قوياً، خصوصاً في إنتاج السليولاز، إلى جانب نشاط مضاد للبكتيريا ضد *B. subtilis* أما العزلة AB10 فقد تميزت بنشاط مرتفع لتحليل الجيلاتين ونشاط مضاد للفطريات ضد *Aspergillus niger* من جهة أخرى أظهرت جميع العزلات نتائج إيجابية في إنتاج البوليسكاريدات خارج الخلية وأظهرت نشاطاً كمستحلبات حيوية.

تُظهر النتائج المحصلة الإمكانيات البيوتكنولوجية الكبيرة للأكتينوبكتيريا المعزولة من تربة خنشلة شبه القاحلة. وتفتح تنوعاتها الوظيفية من حيث الأنشطة المضادة للميكروبات، والأنشطة الإنزيمية، وإنتاج المركبات النشطة بيولوجياً مثل البوليسكاريدات خارج الخلية، آفاقاً واعدة لاستغلالها في المجالات الصيدلانية، والزراعية، والصناعية، والبيئية.

**الكلمات المفتاحية :** التربة، الأكتينوبكتيريا، الجزيئات النشطة بيولوجياً، الهيدرولازات، البوليسكاريدات خارج الخلية (EPS)، العوامل الخافضة للتوتر السطحي الحيوية