



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique



Université Constantine 1 Frères Mentouri
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

جامعة قسنطينة 1 الإخوة منتوري
كلية علوم الطبيعة والحياة

Département: Microbiologie

المكروبيولوجيا: قسم

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

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Écologie et Environnement

Spécialité : Ecologie microbienne

: N° d'ordre

: N° de série

: Intitulé

: La communauté des actinobactéries dans les eaux thermales
« Un aperçu théorique »

Présenté par : Berkane hadjer

Le : .../06/2024

Boukabache hibat allah

Handaoui rayene

Jury d'évaluation :

Président : BOUDEMAGH Allaouddine (Pr - U Constantine 1 Frères Mentouri).

Encadrant : MEDJEMADJ Meissa (MAB- U Constantine 1 Frères Mentouri).

Examineur: BOUFERCHA Oumeima (MAB- U Constantine 1 Frères Mentouri).

Année universitaire
2024 - 2023

Remerciements

Qu'Allah soit loué et remercié pour l'aboutissement de ce modeste travail réalisé au sein de l'équipe de l'écologie microbienne de l'université des Frères Mentouri Constantine 1.

Je tiens à exprimer mes remerciements à Madame Medjemadj, on vous remercie pour l'honneur que vous m'avez fait encadrer pour réaliser cette mémoire. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mes plus sincères remerciements et de mon profond respect.

Je tiens également à exprimer toute ma reconnaissance à l'ensemble des membres du jury pour le temps consacré à l'évaluation de ce manuscrit.

Je remercie tous les enseignants de cette filière Pour ses efforts puissants, leurs conseils précieux et leur patience avec nous pendant ces années d'études.

Je tiens à élargir ces remerciements à l'ensemble de l'équipe de la branche écologie microbienne de Constantine.

Dédicaces

*Je Dédie Ce Travail A La Source De Tendresse Que Sont Mes Très Chers
Parents*

Amor Et Aziza

*Qui M'ont Fourni Au Quotidien Un Soutien Et Une Confiance Sans Faille.
Tout En Etant Convaincue Que Mon Succès Est Une Récompense Pour Tous
Leurs*

Sacrifices, Qu'ils Trouvent Ici L'expression De Ma Plus Profonde Gratitude

A Ma Chère Et Unique Soeur :Fatima Zohra

A Mon Très Cher Frère: Atman

*A Mon Grand Frère Ayoub Et Sa Femme Ma Soeur Fatima Et Sa Fille Alaa,
Sidra Et Mohammed*

A Mes Chers Amis Qui Ont Etaients Toujours Avec Moi:

Amani, Meriem ,Romaissa, Chaima

Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du

Moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur

Aux Bonnes Et Mauvaises Circonstances Qui M'ont Rendu

Meilleure.

A Ceux Que J'aime, Et Ceux Qui M'aiment ... Je Dédie Ce Travail.

Hadjer

Dédicaces

Je dédie ce travail

à moi-même et la remercie pour tout le soutien et les efforts qu'elle m'a apportés pour atteindre notre objectif, et je suis fier d'elle.

ma famille qui m'a toujours soutenu, mes amis Rayene et Hadjer qui ont participé à ce travail, et tous mes professeurs qui ont contribué à mon éducation, et j'espère remporter d'autres succès.

Hiba

Dédicaces

Je dédie ce mémoire

A ma petite famille,

Je dédie cette thèse à mes parents. Je vous remercie pour votre grand soutien et vos conseils précieux. Vous m'avez aidée à me surpasser tout au long de mes études. J'espère que vous êtes fiers de mon parcours.

A mes sœurs, Mina, Khaoula et Soumiya, Je suis fière de vous avoir à mes côtés. Merci pour votre soutien constant et si réconfortant.

A mes chères Hiba et Hadjer, Vous êtes des gens merveilleux et Je suis très chanceux de vous rencontrer.

A mes amis de promotion de l'écologie microbienne Constantine 2024, avec qui j'ai passé d'excellents moments inoubliables.

A tous mes amis de l'université des Frères Mentouri Constantine 1.

Rayene

Table des Matières

Remerciement

Dédicace

Table des Matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Résume

Introduction.....1

Chapitre 1 : Les actinobactéries

1- Généralité sur les actinobactéries	5
1-1- Caractéristiques générales des actinobactéries	5
1-2- Caractéristiques morphologique des actinobactéries	6
1-2-1- Mycélium et spores	6
1-3- Caractéristiques Physiologique des actinobactéries	8
1-3-1- La température	8
1-3-2- Le PH	9
1-3-3- L'oxygène	9
1-3-4- L'humidité	9
2- Taxonomie des actinobactéries	9
3- Habitat des actinobactéries	12
3-1- Environnement terrestre	12
3-2- Environnement aquatique	12

3-2-1- Les eaux douces	13
3-2-2- Environnement marin	13
4- Diversité des actinobacteries	14
4-1- Actinobactéries thermophiles	14
4-2- Actinobactéries acidophiles	14
4-3- Actinobactéries halophiles	14
4-4- Actinobactéries endophytes	15
4-5- Actinobactéries symbiotiques	15
4-6- Actinobactéries endosymbiontiques	15
4-7- Actinobactéries de l'intestin	15
5- Rôle d'actinobacteries	18

Chapitre 2: Les Actinobactéries thermophiles

1- Les actinobactéries thermophiles	21
1-1- Physiologie des actinobactéries thermophiles	21
1-2- Adaptation des actinobactéries thermophiles	23
1-3- Systématique, taxonomie et phylogénie	23
1-4- Applications potentielles des actinobactéries thermophiles	26
1-4-1- Synthèse des nanoparticules d'or	26
1-4-2- Bioremédiation des sites contaminés par les hydrocarbures	27
1-4-3- Bioremédiation des sites contaminés par des radionucléides contaminés	27
1-4-4- Agent de biocontrôle	28
1-4-5- Production de composés bioactifs	28
1-4-6- Synthèse de composés pharmaceutiques précieux	28
1-4-7- Enzymes importantes sur le plan industriel	29

Chapitre 3 : L'écosystème extrême : Les eaux thermales

1- Les sources thermales	33
2- Classification des eaux thermales	33
3- Les stations thermales en Algérie	34

Chapitre 4 : Isolement des actinobactéries thermophiles à partir des eaux thermales

1- Isolement des actinobactéries thermophiles à partir des eaux thermales	37
2- Diversité des actinobactéries dans les Eaux Thermales	39
Discussion générale	41
Conclusion et perspectives.....	43
Les références bibliographiques.....	45
Les annexes	

LISTE DE FIGURE

- Figure 1:** Colonie d'actinobactérie poussant sur gélose (morphologie commune des actinomycètes, coupe transversale d'une colonie d'actinobactéries montrant le mycélium du substrat et le mycélium aérien avec des chaînes de conidiospores) (Qinyuan *et al.*, 2016).....6
- Figure 2:** Forme générale des spores: (A) globuleuses, (B) ovoïdes, (C) doliformes, (D) en forme de bâtonnet, (E) allantoïdes, (F) réniformes 8
- Figure 3 :** Classification phylogénétique (séquençage de l'ARNr16S des *Actinobacteria*) (Zhi, 2009) 11
- Figure 4:** Application biotechnologiques des actinobactéries (Anandan *et al.*, 2016)... 19
- Figure 5:** Phylogramme indiquant l'emplacement et la parenté de certaines souches(Shivlata et Satyanarayana, 2015). 25
- Figure 6:** Applications industrielles potentielles des actinobactéries thermophiles (Shivlata et Satyanarayana, 2015).....26

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Classes, ordres et familles du phylum Actinobacteria (Goodfellow <i>et al.</i> , 2012).....	10
Tableau 2: Types d'actinobactéries et fonctions correspondantes (Saloni <i>et al.</i> , 2022)....	16
Tableau 3: Quelques espèces d'actinobactéries thermophiles et thermotolérantes (Shivlata et Satyanarayana, 2015).24
Tableau 4: Enzymes commerciales produites par des actinobactéries thermophiles (Shivlata et Satyanarayana, 2015)	31
Tableau 5 : les classes des sources thermales à partir de leur Température en Algérie	25
Tableau 6: les stations thermales existent en Algérie (OUAL, 2008).....	34

LISTE DES ABREVIATIONS

GC%: Pourcentage de la guanine et la cytosine.

ARNr 16S : Acide Ribonucléique codant pour la sous unité ribosomique 16S.

CO₂ : dioxyde de carbone.

H₂ : Hydrogène.

DAP : Acide-diaminopimélique.

IVYWREL : I : Isoleucine (Leu), V : Valine (Val) , Y : tyrosine (Tyr), W : Tryptophan (Trp), R : Arginine (Arg) , E : Acide glutamique (Glu) , L : (Leucine) .

PCL: poly(ϵ -caprolactone).

PES : poly(éthylène succinate).

PHB: poly(d-3-hydroxybutyrate).

VD3 : Vitamine D3.

ADN: Acide désoxyribonucléique.

AldO : Alditol oxydase thermostable.

AIA: Agar isolation of Actinobacteria.

SCA: Starch Casein Agar.

Résumé

Les actinobactéries sont des bactéries filamenteuses à coloration de Gram positif, qui partagent les caractéristiques des bactéries et des champignons. Elles peuvent s'adapter à divers écosystèmes et sont omniprésentes dans les sols, les eaux douces et les milieux marins. De nombreux domaines ont mis en évidence le rôle important joué par les actinobactéries tels que les domaines industriel, médical et vétérinaire, ainsi que dans le domaine de l'agriculture et l'agro-alimentaire. Les actinobactéries se distinguent par leurs divers types, qui leur permettent de survivre dans des environnements hostiles. Parmi ces types on trouve les actinobactéries thermophiles, elles peuvent se développer à des températures comprises entre 40 et 80 C°, qui sont généralement des températures élevées pour la croissance et la survie des microorganismes. Elles prouvent leur capacité à s'adapter à des conditions extrêmes, en produisant des spores thermiques qui restent stables à des températures élevées pendant plusieurs jours. Ces bactéries ont été isolées exceptionnellement à partir des sources thermales, ce sont des réservoirs naturels d'eau thermale riche en minéraux et faible en matière organique, sa température peut varier de 20 à 100 C°, qui peuvent être classés en fonction de deux aspects principaux leur origine géologique et leur composition chimique, ainsi que leur température. Afin d'étudier les propriétés et les caractéristiques de ces bactéries, il est nécessaire de les isoler de l'eau thermale, ce qui passe par plusieurs étapes importantes, notamment l'échantillonnage, l'enrichissement, l'isolement et la purification.

Les mots clés : *Actinobacteria*, actinobactérie thermophile, métabolites thermorésistantes, eau thermale.

الملخص

البكتيريا الشعاعية هي بكتيريا خيطية موجبة الغرام تشترك في خصائص كل من البكتيريا والفطريات. ويمكنها التكيف مع مجموعة متنوعة من النظم البيئية وهي منتشرة في كل مكان في التربة والمياه العذبة والبيئات البحرية. وقد سلطت العديد من المجالات الضوء على الدور الهام الذي تلعبه البكتيريا الشعاعية في العديد من المجالات، بما في ذلك الصناعة والطب والطب البيطري، وكذلك الزراعة والأغذية الزراعية. تتميز الفطريات الشعاعية بأنواعها المختلفة التي تمكنها من البقاء على قيد الحياة في بيئات معادية. من بين هذه الأنواع البكتيريا الشعاعية المحبة للحرارة، والتي يمكن أن تتطور في درجات حرارة تتراوح بين 40 و80 درجة مئوية، وهي درجات حرارة عالية بشكل عام لنمو وبقاء الكائنات الحية الدقيقة. وقد أثبتت هذه البكتيريا قدرتها على التكيف مع الظروف القاسية وإنتاج جراثيم حرارية تبقى مستقرة في درجات الحرارة العالية لعدة أيام. وقد تم عزل هذه البكتيريا بشكل استثنائي من الينابيع الحرارية، وهي مستودعات طبيعية للمياه الحرارية الغنية بالمعادن والمنخفضة في المواد العضوية، والتي يمكن أن تتراوح درجة حرارتها من 20 إلى 100 درجة مئوية، والتي يمكن تصنيفها وفقاً لجانبين رئيسيين: أصلها الجيولوجي وتركيبها الكيميائي، بالإضافة إلى درجة حرارتها. من أجل دراسة خصائص وخصائص هذه البكتيريا، من الضروري عزلها من المياه الحرارية، الأمر الذي ينطوي على عدة مراحل مهمة، بما في ذلك أخذ العينات والتخصيب والعزل والتنقية.

الكلمات المفتاحية: البكتيريا الأكتينوبكتيرية، البكتيريا الأكتينوبكتيرية المحبة للحرارة، المستقلبات المقاومة للحرارة، الماء الحراري

Abstract

Actinobacteria are Gram-positive, filamentous bacteria that share characteristics with both bacteria and fungi. They can adapt to a variety of ecosystems, and are ubiquitous in soils, fresh waters and marine environments. The important role played by actinobacteria in industrial, medical and veterinary applications, as well as in agriculture and agri-food, has been highlighted in many fields. Actinomycetes are distinguished by their diverse types, which enable them to survive in hostile environments. Among these are thermophilic actinobacteria, which can thrive at temperatures between 40 and 80°C, which are generally high enough for microorganisms to grow and survive. They prove their ability to adapt to extreme conditions, producing thermal spores that remain stable at high temperatures for several days. These bacteria have been isolated exceptionally from thermal springs, natural reservoirs of thermal water rich in minerals and low in organic matter, whose temperature can vary from 20 to 100 C°, which can be classified according to two main aspects their geological origin and chemical composition, as well as their temperature. In order to study the properties and characteristics of these bacteria, it is necessary to isolate them from the thermal water, which involves several important steps, including sampling, enrichment, isolation and purification.

Key words: *Actinobacteria*, thermophilic actinobacteria, thermoresistant metabolites, thermal water

Introduction

Introduction

Les actinobactéries autrefois appelés actinomycètes sont des bactéries filamenteuses à coloration de Gram positif, aérobie anaérobie facultatif, possédant une teneur élevée en G + C (55 à 75%) dans leur ADN et présentant un cycle de développement très différencié et subissent des différenciations morphologiques durant leur cycle de vie (Prescott et Harley , 2003). Elles peuvent s'adaptés à divers milieux écologiques. Ainsi, elles peuvent être présentes dans les sols, les eaux douces ou salines et dans l'air. L'importance des actinobactéries a été soulignée dans divers domaines: industriel, médical et vétérinaire, mais également dans le domaine de l'agriculture et l'agro-alimentaire (George *et al.*, 2012; Solecka *et al.*, 2012). Ces bactéries, jouent un rôle important dans la décomposition des matières organiques, telles que la cellulose et la chitine, jouant ainsi un rôle essentiel dans le renouvellement des matières organiques et le cycle du carbone.

Généralement, sont capables de métaboliser plusieurs et différents composés y compris les polysaccharides, les alcools, les acides aminés et les composés aromatiques par la production des enzymes extracellulaire (Kitouni, 2003). En réponse à des conditions défavorables, telle que le déficit en nutriments et l'eau, ou des températures basses et élevée. Les actinobactéries sont des bactéries possédant plusieurs capacités métaboliques, qui leurs permettent de vivre dans des environnements défavorables ou favorables.

Un certain nombre d'études ont été menées par les chercheurs sur les sources chaudes, afin d'investiguer et d'identifier les microorganismes capables de survivre dans cet écosystème hostile. Ils a été trouvé que les actinobactéries thermophile possèdent des mécanismes d'adaptation à ces conditions extrêmes, la capacité de se développer à des températures élevées qui varie entre 40 et 80 °C (Tortora *et al.*, 2007 ; Jiang *et al.*, 2012). Ce sont des bactéries aérobies strictes, chimio-organotrophes, vivants dans la nature et se nourrissent de la matière organique en décomposition. Elles Présentent des modes de nutrition spécifiques tels que la chimioautotrophie obligatoire. Parmi les caractéristiques générales des actinobactéries thermophiles, il a été trouvé qu'elles sont halotolérantes, capables de produire une large gamme d'antibiotiques et d'enzymes.

Les actinobactéries thermophiles démontrent leur capacité d'adaptation à des conditions extrêmes produisent des spores thermorésistantes qui peuvent résister à des températures élevées pendant plusieurs jours (Shivlata et Satyanarayana, 2015). Elles ont développé des mécanismes d'adaptation par plusieurs stratégies d'homéostasie, notamment une teneur en GC supérieure dans leur génome, la substitution d'acides aminés dans les

protéines et la présence de composants spécifiques dans la paroi cellulaire (Shivlata et Satyanarayana, 2015).

Les actinobactéries jouent un rôle essentiel dans plusieurs utilisations en biotechnologie, telles que la fabrication de nanoparticules d'or, la bioremédiation, et en tant qu'agent de biocontrôle (Chen *et al.*, 2015). Préalablement, ces bactéries sont bien connus d'être une source importante de composés pharmaceutiques (antibiotiques, agents anti-tumoraux, composés anti-inflammatoires et inhibiteurs d'enzymes), elles sont aptes à produire également un certain nombre d'enzymes comme les amylases, les protéases, les lipases, les cellulases, les xylanases, etc ayant plusieurs application industrielles (Shivlata et Satyanarayana, 2015).

L'isolement des actinobactéries vise à étudier la communauté bactérienne dans un environnement donné et à identifier des espèces spécifiques. Les milieux d'isolement doivent être favorables à la croissance des actinobactéries tout en inhibant les autres microbes. Jusqu'à présent, d'innombrables actinobactéries ont été isolés et identifiés dans divers habitats du monde entier. Ainsi, l'isolement des actinobactéries inconnus est très délicat mais représente un défi pour les chercheurs.

Les chercheurs doivent posséder une connaissance approfondie de la physiologie et de la taxonomie des actinobactéries et d'autres microbes, ainsi que de comprendre le rôle de chaque facteur d'isolement, tels que la composition et la concentration du milieu de culture, le pH, les inhibiteurs, la température de culture, etc.

Les méthodes d'isolement doivent être sans cesse renouvelées et améliorées. Tout en explorant de nouveaux écosystèmes inhabituels tels que les écosystèmes extrêmes. Les actinobactéries peuvent être isolées de l'eau thermale en suivant plusieurs étapes, notamment une étape d'échantillonnage, d'enrichissement, d'isolement et enfin une étape de purification (Medjemadj *et al.*, 2020).

Notre manuscrit s'articule sur 4 chapitres principaux :

- Dans le premier chapitre nous avons évoqué un aperçu général sur les actinobactéries (généralités, caractéristiques, taxonomie,...).
- Le deuxième chapitre nous l'avons consacré pour démontrer la physiologie et les stratégies d'adaptation des actinobactéries thermophile et leur importance surtout dans les domaines industrielle.

Introduction

- Le troisième chapitre nous avons évoqué l'écosystème extrême « eau thermale.
- En dernier, la méthode Conventiennelle pour isoler les actinobactéries thermophile à partir d'eaux thermales a été abordée.

Chapitre 1
« Les actinobactéries »

1- Généralité sur les actinobactéries

Étymologiquement, le terme "actinomycètes" est emprunté du grec "Actys" (rayon) et "mykes" (champignon), et désigne les membres de l'ordre des *Actinomycetales* (Barka *et al.*, 2016). Les actinobactéries constituent un groupe d'eubactéries à Gram positif, aérobie ou anaérobie facultative, sporulées (Mokhtar, 2011). Elles présentent des structures filamenteuses sous forme de bâtonnets ou de mycélium, similaires aux champignons, souvent ramifiées en hyphes, mais elles sont biochimiquement plus proches des bactéries, contenant un pourcentage élevé en guanine plus cytosine (GC) dans leur génome linéaire (Anandan *et al.*, 2016). Les actinobactéries peuvent être mobiles ou immobiles. La plupart sont chimiohétérotrophes et utilisent un large éventail de nutriments, y compris divers polysaccharides complexes.

La majorité des actinobactéries sont des organismes vivant librement et largement répandus dans les écosystèmes terrestres et aquatiques, se trouvent dans plusieurs types de sol, d'eau douce et de mer. La majorité des espèces sont saprophytes ou commensales ; quelques-unes peuvent être pathogènes chez des individus à résistance affaiblie (Oskay *et al.*, 2005).

Elles jouent un rôle important dans la décomposition des matières organiques, telles que la cellulose et la chitine, jouant ainsi un rôle essentiel dans le renouvellement des matières organiques et le cycle du carbone, reconstituant les réserves de nutriments dans le sol et jouant un rôle important dans la formation de l'humus. Les colonies d'actinobactéries ont une consistance poudreuse et adhèrent fermement à la surface de la gélose (Oskay *et al.*, 2005).

Il s'agit d'un groupe hétérogène, comprenant des bactéries ayant des habitats, des exigences de croissance, des rôles écologiques, une morphologie et des applications distincts. En fait, elles comptent parmi les bactéries les plus importantes et les plus largement utilisées dans les domaines de la médecine, de l'agriculture, de l'environnement, de la biotechnologie et de la recherche (Sapkota *et al.*, 2020).

1-1 Caractéristiques générales des actinobactéries

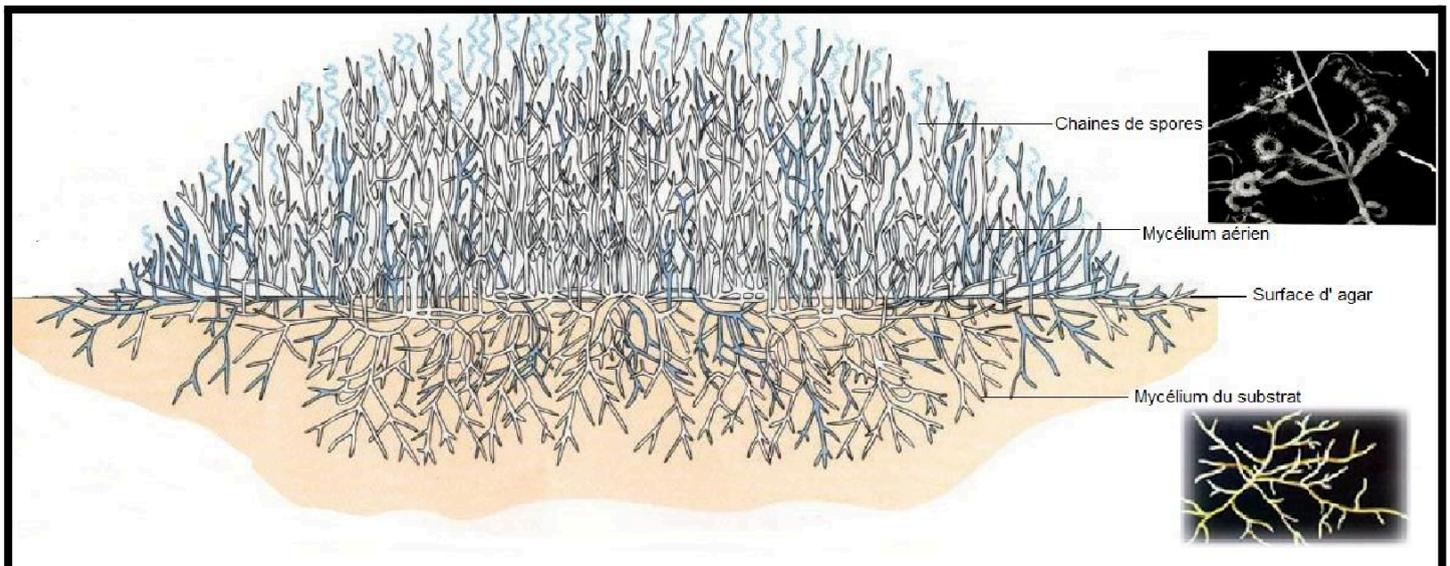
Les actinobactéries sont un groupe de bactérie à gram positif, qui possède des filaments ramifiées ou en forme de bâtonnets, et la plupart ne sont pas capsulées. Elles se caractérisent par la capacité à former des mycéliums aériens semblables à un champignon et un mycélium de substrat. Elles sont connues pour la production des pigmentations dans la

plupart des cas et contient une teneur élevée en G + C dans l'ADN (55 - 75 %). Le plus souvent, associées à des environnements terrestres, mais également trouvées dans l'eau douce et marine (Sapkota *et al.*.,2020).

L'acide mucolique et l'acide muramique sont présents dans leurs parois cellulaires ainsi que les filaments. Les actinobactéries se reproduisent généralement par sporulation et fragmentation possédant une chaîne de spores sexuelles appelées conidies qui est produite sur leurs hyphes (Sapkota *et al.*.,2020).

1-2 Caractéristiques morphologique des actinobacteries

Les actinobactéries classiques ont un mycélium radial bien développé, selon les différences de morphologie et de fonction, le mycélium peut être divisé en mycélium de substrat et mycélium aérien (**Figure 01**), indiquant une morphologie commune des



actinobactéries (Li *et al.*, 2016).

Figure 01: Colonie d'actinobactérie poussant sur gélose (morphologie commune des actinomycètes, coupe transversale d'une colonie d'actinobactéries montrant le mycélium du substrat et le mycélium aérien avec des chaînes de conidiospores) (Qinyuan *et al.*, 2016).

1-2-1 Mycélium et spores

Les actinobactéries possèdent une structure de procaryotes, mais un cycle biologique semblable à certains champignons (Floyd *et al.*, 1987; Sanglier et Trujillo, 1997).

Le mycélium du substrat ou mycélium primaire (ou encore végétatif) se développe à partir du tube de germination des spores, l'ensemble de la colonie se développe de

manière radial. Le mycélium ramifié forme des parois transversales. (**Figure 01**) (Kitouni, 2007).

La fonction principale du mycélium du substrat est l'absorption des nutriments pour la croissance des actinobactéries. Le mycélium du substrat est mince, transparent, sombre et plus ramifié que l'hyphe aérien.

Le mycélium du substrat peut être blanc, jaune, orange, rouge, vert, bleu, violet, marron, noir ou autres couleurs. Certains hyphes peuvent produire des pigments hydrosolubles ou liposolubles. Le pigment soluble dans l'eau peut s'infiltrer dans le milieu de culture, ce qui donne au milieu la couleur correspondante. Le pigment non soluble dans l'eau (ou liposoluble) donne à la colonie avec la couleur correspondante. La couleur du mycélium du substrat et la présence de pigments solubles constituent des références importantes dans la détermination de nouvelles espèces (Medjemadj, 2021).

Le mycélium aérien est généralement plus épais que le mycélium du substrat (Anandan *et al.*, 2016) (**Figure 01**). Les hyphes aériens sont grossiers, réfractifs et brillants, sont souvent pigmentés et sont enfermés dans une enveloppe extrême hydrophobe. Le mycélium aérien couvre les colonies de surface en leur donnant un aspect poudreux, compact, poilu ou en chou-fleur (**Figure 01**).

La production de mycélium aérien est influencée par plusieurs facteurs, notamment :

- La composition du milieu de croissance.
- La température d'incubation et la présence de composés stimulant spécifiquement le mycélium aérien (Pine, 1970).

Le prochain événement est le développement de structures sporulées. La division d'une hyphe et la production d'une spore commencent par la formation d'une paroi transversale. Les spores produites individuellement ou en chaînes courtes sont généralement plus épaisses que les hyphes, tandis que celles qui sont développées en longues chaînes ont généralement le même diamètre que les hyphes. Les spores ont une épaisseur d'environ 1 à 2 μm et varient en termes de forme et de caractéristiques de surface (Kitouni, 2007).

Elles sont globuleuses, ovoïdes, en forme de bâtonnet, doliformes, allantoides et réniformes (**Figure 2**).

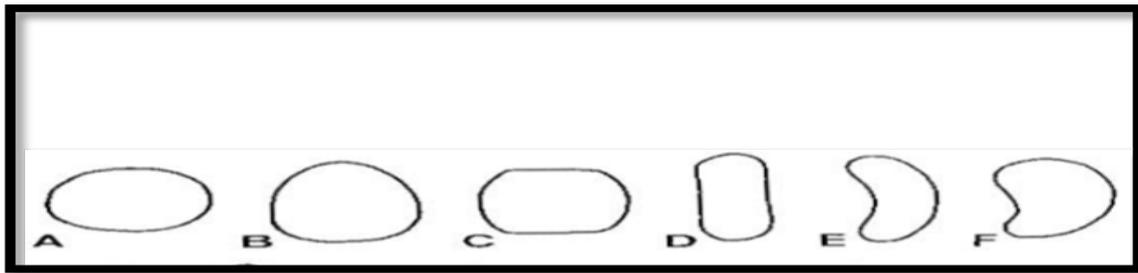


Figure 2 : Forme générale des spores: (A) globuleuses, (B) ovoïdes, (C) doliformes, (D) en forme de bâtonnet, (E) allantoïdes, (F) réniformes.

Les actinobactéries sont capables de produire des spores mobiles équipées de flagelles qui assurent un mouvement actif. Ou les spores non mobiles pour certaines espèces les spores sont soit des endospores ou des exospores.

Les endospores produites par les actinobactéries thermophiles, sont semblables aux spores de *Bacillus* avec une paroi externe épaisse, multicouche, très résistante, enveloppant le cortex, la membrane cytoplasmique, le système membranaire intracytoplasmique, les ribosomes et le nucléoïde. Ces spores contiennent de l'acide dipicolinique (Hirsch *et al.*, 1985).

Les exospores, sont généralement formés par les actinobactéries. Ils peuvent avoir des formes très variables. Leur développement s'effectue par séparation des extrémités du filament, habituellement en réponse à une privation en éléments nutritifs. Tandis que les exospores sont plus fréquentes et conservent certains éléments du mycélium primaire, et sont souvent caractérisées par la présence de pigments. Le tréhalose, particulièrement abondant, pourrait avoir un rôle dans la dormance et résistance de ces spores (Bride, 1986).

1-3 Caractéristiques Physiologique des actinobactéries

1-3-1 La température

Les actinobactéries sont mésophiles, avec une température optimale de croissance entre 25 et 30°C, mais certains sont capables de se développer à des températures élevées avoisinant les 50°C ou 65°C dans les milieux thermophiles et peuvent aller plus (Goodfellow et Williams, 1983). Dans des conditions de températures extrêmes, ils peuvent produire des enzymes actives. (Holt *et al.*, 1994).

1-3-2 Le PH

Pour les actinobactéries le pH doit être neutre ou peu alcalin (Omura, 1992). La croissance optimale se situe entre 7 et 8, mais il est possible de remarquer une croissance à des valeurs de pH inférieurs à 4 (McKinney, 2004).

1-3-3 L'oxygène

Les actinobactéries peuvent être classés en deux groupes en fonction de leur type respiratoire:

- 1 - Les formes oxydatives aérobies qui se trouvent essentiellement dans le sol telles que les *Streptomyces*
- 2- les formes fermentatives anaérobies strictes ou facultatives représentées par le genre des *Actinomyces* qui sont commensales obligatoires vivent dans les cavités naturelles de l'homme et des animaux (Silini, 2012).

1-3-4 L'humidité

En général, les actinobactéries se développent dans des sols contenant des taux d'humidité faibles à modérés. Ce qui évoquer qu'ils ne sont pas beaucoup influencés par les conditions semi-arides (Oskay *et al.*, 2004; Prescott *et al.*, 2007).

2- Taxonomie des actinobactéries

La taxonomie des actinobactéries a évolué de manière significative au fil du temps avec l'accumulation de connaissances depuis plusieurs années, selon lechevalier (1965), la classification des espèces dans cet ordre devait être effectuée en se basant sur des critères morphologiques et chimiques malgré l'efficacité de ce type de classification, l'adoption des critères génétiques est devenue essentielle vu le nombre d'espèces découvertes ces dernières années (Barka, 2015) .

Les genres de ce phylum présentent une énorme diversité en termes de morphologie, de physiologie et de capacités métaboliques.

Les actinobactéries représentent l'une des plus grandes unités taxonomiques parmi les 18 principales lignées reconnues dans le domaine des bactéries, dont 5 sous-classes, 6 ordres et 14 sous-ordres (Ludwig *et al.*, 2012). L'ordre *Actinomycetales*, établi par Buchanan en 1917, appartient à ce groupe d'organismes procaryotes (**Figure 3**) (Buchanan., 1917).

Le phylum *Actinobacteria* est délimité sur la base de sa position de ramification dans les arbres génétiques de l'ARNr 16S. Une taxonomie mise à jour des phylum *Actinobacteria*

qui est basée sur des arbres d'ARNr 16S a été rapportée (Ludwig *et al.*, 2012). Cette mise à jour a éliminé les rangs taxonomiques des sous-classes et sous-ordres, élevant les anciennes sous-classes et sous-ordres aux rangs des classes et des ordres, respectivement (Gao et Gupta., 2012) Le phylum est donc divisé en six classes : *Actinobacteria*, *Acidimicrobiia*, *Coriobacteriia*, *Nitriliruptoria*, *Rubrobacteria* et *Thermoleophilia* (**Figure 3**) (Barka, 2015).

L'ordre des *Actinomycétales* est maintenant limité aux membres de la famille des *Actinomycétacées*, et les autres sous-ordres qui en faisaient auparavant partie sont classés dans un ordre distinct (Gao et Gupta, 2012). En conséquence, 43 des 53 familles du phylum *Actinobacteria* appartiennent à une seule famille d'*Actinomycetaceae*, tandis que les cinq autres familles ne contiennent ensemble que 10 familles (Barka, 2015).

Cette taxonomie est l'un des phylums majeurs dans le domaine des bactéries comprenant 6 classes, 22 ordres, 54 familles, 250 genres et 3000 espèces (**Tableau 1**).

Tableau 1: Classes, ordres et familles du phylum *Actinobacteria* (Goodfellow *et al.*, 2012).

Domaine	Bacteria
Phylum	<i>Actinobacteria</i>
Classe	<i>Nitriliruptoria</i> <i>Acidimicrobiia</i> <i>Actinobacteria</i> <i>Rubrobacteria</i> <i>Coriobacteria</i> <i>Thermoleophilia</i>
Ordre	<i>Actinomycetales</i> , <i>Streptomycetales</i> , <i>Actinopolysporales</i> , <i>Bifidobacteriales</i> , <i>Catenulisporales</i> , <i>Corynebacteriales</i> , <i>Frankiales</i> , <i>Glycomycétales</i> , <i>Jianeasporiales</i> , <i>Kineosporiales</i> , <i>Micrococcales</i> , <i>Micromonosporales</i> , <i>Propionibacteriales</i> , <i>Pseudonocardiales</i> , <i>Streptosporangiales</i> , <i>Acidimicrobiales</i> , <i>Nitriliruptorales</i> , <i>Euzebyales</i> , <i>Rubrobacterales</i> <i>Thermophilales</i> , <i>Solirubrabacterales</i>

Famille	<p><i>Actinomycetaceae</i> , <i>Streptomycetaceae</i> , <i>Actinopulysporaceae</i> , <i>Bifidobacteriaceae</i> , <i>Catenulisporaceae</i>, <i>Actinospicaceae</i> <i>Corynebacteriaceae</i>, <i>Dietziaceae</i>, <i>Mycobacteriaceae</i>, <i>Nocardiaceae</i>, <i>Segniliparaceae</i>, <i>Tsukamerullaceae</i>, <i>Frankiaceae</i>, <i>Acidothermaceae</i>, <i>cryptosporandiaceae</i>, <i>Geodermatophilaceae</i>, <i>Nokamurellaceae</i> , <i>Micrococcaceae</i>, <i>Beutenbergiaceae</i>, <i>Bogoriellaceae</i>, <i>Brevibacteriaceae</i>, <i>Cellulomonadaceae</i>, <i>Dermatophilaceae</i>, <i>Intrasporangiaceae</i>, <i>Jonesiaceae</i>, <i>Micobacteriaceae</i>, <i>promicomonosporaceae</i>, <i>Rarobacteriaceae</i>, <i>Ruaniaceae</i> <i>Glycomycetaceae</i> <i>Jiangellaceae</i>, <i>Kineosporaceae</i>, <i>Micromonosporaceae</i>, <i>Propionibacteriaceae</i>, <i>Nocardidoidaceae</i> <i>Pseudonocardiaceae</i> , <i>Streptomycetaceae</i>, <i>Streptosporangiaceae</i>, <i>Nacardiopceae</i>, <i>Thermomonosporaceae</i>, <i>Actinomicrobiaceae</i>, <i>Nitriliruptoraceae</i>, <i>Euzebyacea</i> , <i>Rubrobacteraceae</i> <i>Thermophilaceae</i>, <i>Solirubrobacteraces</i>, <i>Conexibacteraceae</i>, <i>Patulibacteraceae</i></p>
Genre	<p><i>Trueprella</i> , <i>Varibaculum</i> , <i>Actinobaculum</i>, <i>Kitasatospora</i> <i>Streptoverticillium</i>.</p>

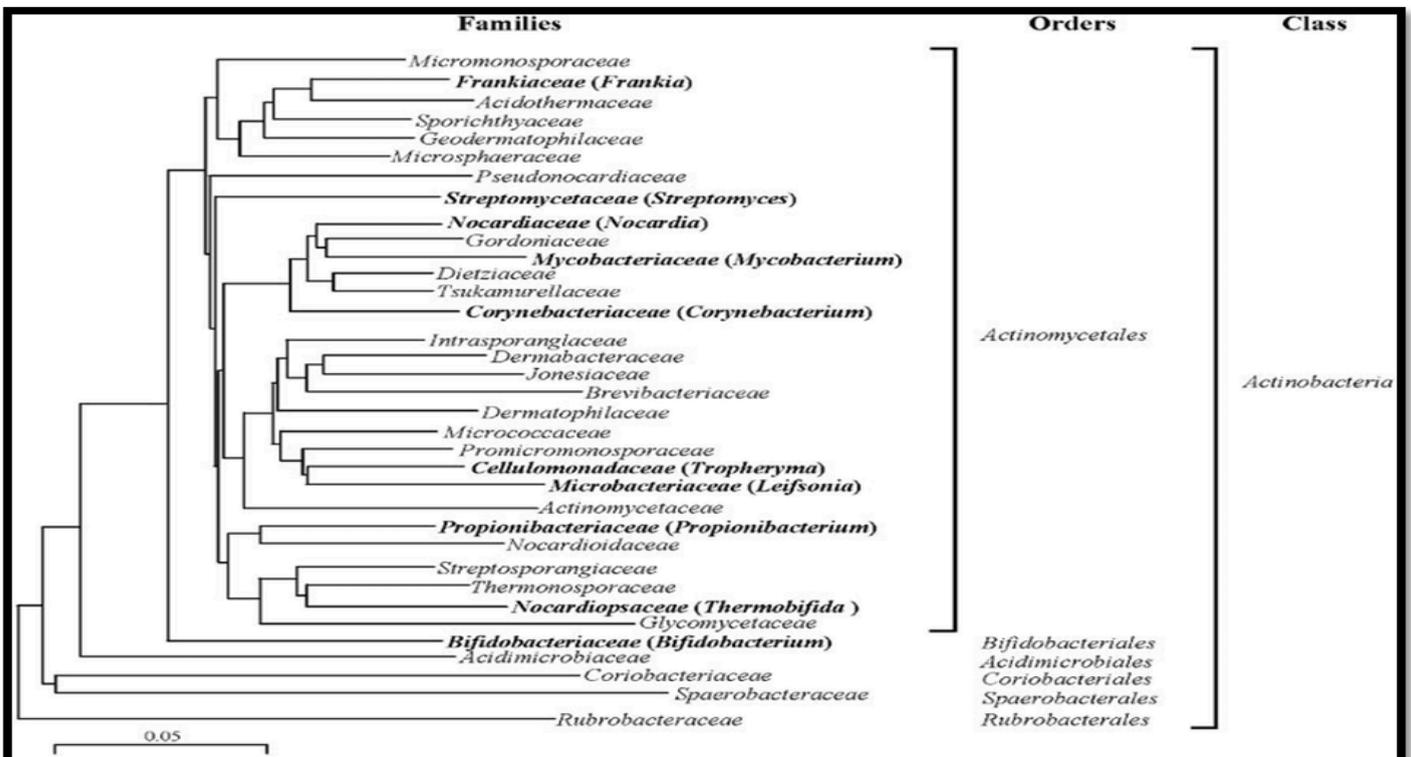


Figure 3 : Classification phylogénétique (séquençage de l'ARNr16S des *Actinobacteria*) (Zhi, 2009).

3- Habitat des actinobactéries

3-1 Environnement terrestre

Les actinobactéries constituent une composante importante de la population microbienne dans la plupart des sols et des numérations de plus d'un million par gramme sont couramment obtenues, ainsi que la source la plus prolifique des isolats. Le sol reste l'habitat le plus important pour les actinobactéries, les *streptomycètes* constituant une composante majeure de sa population. Les actinobactéries terrestres présentent divers potentiels antimicrobiens intéressants, nombre d'entre elles produisant des antibiotiques et d'autres métabolites utiles. Il s'agit donc de l'habitat le plus étudié, mais malgré cela, il existe encore de nombreuses lacunes dans notre connaissance des rôles joués par les *actinomycètes* dans les processus du sol. De nombreuses études se sont principalement intéressées au dénombrement et à l'identification des isolats. Plus de 20 genres ont été isolés, les *streptomycètes* étant omniprésents et les plus nombreux. Plusieurs rapports montrent la distribution des actinobactéries dans divers endroits, tels que le sol sablonneux (Cario, Égypte ; Falmouth, MA), le sol alcalin noir (Karnataka, Inde), le sol limoneux sablonneux (Keffi Metropolis, Nigeria ; Presque Isle, PA), le sol alcalin de dessert (Wadi El Natrun, Égypte ; WadiAraba, Égypte) et le sol subtropical de dessert (Thar, Rajasthan), où les *Streptomyces sp* (Goodfellow et Williams, 1983)..

Les actinobactéries jouent un rôle majeur dans la communauté microbienne de la rhizosphère dans le renouvellement de la matière organique végétale récalcitrante, et la région de la rhizosphère est donc considérée comme l'un des meilleurs habitats pour l'isolement de ces micro-organismes (Goodfellow et Williams, 1983).

3-2 Environnement aquatique

Les actinobactéries sont largement répandues dans les habitats aquatiques, mais cela ne prouve pas qu'ils fassent partie de la microflore indigène, car il faut toujours tenir compte de la possibilité d'un lessivage à partir des habitats terrestres environnants. L'accent a été mis sur la détermination du nombre et des types d'actinobactéries présents dans l'écosystème aquatique, et non sur leur croissance et leurs activités dans cet écosystème. À la lumière d'informations sur des organismes tels que *Thermoactinomyces* et *Rhodococcus coprophilus*, qui sont connus pour être de bons indicateurs de la composante terrestre des propagules actinobactériennes dans l'eau et les sédiments, il a été démontré que les actinobactéries sont largement répandues dans les habitats aquatiques, mais cela ne prouve pas qu'ils font partie de la microflore indigène. Les endospores résistantes de *Thermoactinomyces* sont produites dans

les composts auto-chauffants, les fourrages surchauffés et les sols de surface, mais elles peuvent être entraînées dans les habitats aquatiques où elles se déposent dans les boues et les sédiments. On suppose que ces thermophiles sont incapables de se développer à des températures ambiantes dans la plupart des habitats aquatiques (Goodfellow et Williams, 1983)

3-2-1 Les eaux douces

Dans les travaux de Cross, il a été démontré que les actinobactéries peuvent être facilement isolées à partir des eaux douces. Les principaux types d'actinobactéries vivant dans les eaux douces appartiennent aux genres *Actinoplanes*, *Micromonospora*, *Rhodococcus*, *Streptomyces* et *Thermoactinomyces* formant des endospores. Les *Actinoplanes* sont couramment présents dans les sols, les rivières et les lacs, et leurs vésicules de spores sont capables de résister à la dessiccation prolongée. Elles libèrent leurs spores mobiles pour la dissémination lorsqu'elles sont réhydratées (Makkar et Cross., 1982). Les *Micromonospora* sont également fréquemment trouvées dans les eaux douces, où elles dégradent des substances telles que la cellulose, la chitine et la lignine. Les *streptomycètes*, bien que présents, semblent moins prédominants que les *Micromonospora* dans certains habitats aquatiques. Des études ont montré des corrélations entre les *Micromonospora* et les *thermoactinomycètes* dans certains environnements aquatiques, ainsi qu'une corrélation entre les *streptomycètes* et d'autres bactéries comme les *streptocoques* fécaux et les *rhodocoques*. Bien que les spores de *Streptomyces* soient également transportées dans les habitats d'eau douce et marins, il y a peu de preuves de leur activité dans ces environnements (Anandan *et al.*, 2016)

3-2-2 Environnement marin

Le milieu marin est une source inexploitée de diversité d'actinobactéries et donc de nouveaux métabolites. Les actinobactéries marines vivant dans un environnement extrêmement différent produisent différents types de composés bioactifs par rapport aux actinobactéries terrestres.

Les actinobactéries marines ont dû s'adapter à des conditions anaérobies et à des pressions extrêmement élevées à des températures légèrement inférieures à 0-8 °C au fond des mers profondes, et à des conditions très acides à des températures supérieures à 8-100 °C à proximité des cheminées hydrothermales des dorsales médio-océaniques. *Rhodococcus marinonascens*, la première espèce d'actinomycète marin à être caractérisée, confirme l'existence des actinobactéries marines. Des membres des genres *Dietzia*, *Rhodococcus*,

Streptomyces, *Salinispora*, *Marinophilus*, *Solwaraspora*, *Salinibacterium*, *Aeromicrobium marinum*, *Williamsia maris* et *Verrucosispora* ont été désignées comme des actinobactéries marines indigènes (Grossart *et al.*, 2004). Ont montré que les actinobactéries représentent environ 10 % des bactéries colonisant les agrégats organiques marins.

Des bactéries colonisant les agrégats organiques marins et que leur activité antagoniste pourrait être très importante pour maintenir leur présence, ce qui affecte la dégradation et la minéralisation de la matière organique (Anandan *et al.*, 2016).

4- Diversité des actinobactéries

Les actinobactéries sont des bactéries dont les différents types leur permettent de vivre dans des environnements divers et de s'adapter à toutes les conditions climatiques. Qu'elles soient défavorable ou favorables, ces types sont les suivants :

4-1 Actinobactéries thermophiles

Les Actinobactéries mésophiles peuvent se développer à une température optimale de 20°C à 42°C, parmi lesquelles il existe des espèces thermotolérantes, qui peuvent survivre à 50°C. Les actinobactéries modérément thermophiles se développent de manière optimale entre 45 et 55 °C (Jensen *et al* 2005). Tandis que les actinobactéries strictement thermophiles se développent entre 37°C et 65 °C, avec une température optimale de 55 à 60 °C (Jiang *et al.*, 1993).

4-2 Actinobactéries acidophiles

Les actinobactéries acidophiles, qui sont présentes dans les habitats terrestres tels que les forêts acides et les sols de drainage minier, se développent dans une plage de pH allant d'environ 3,5 à 6,5, avec des taux optimaux entre 4,5 et 5,5 (Khan *et al.*, 1975) (Hagedorn *et al.*, 1976).

4-3 Actinobactéries halophiles

Les actinobactéries halophiles sont classées en différents types en fonction de leur croissance dans des milieux qui contiennent différentes concentrations de sel. Les halophiles extrêmes se développent mieux dans des milieux contenant 2,5 à 5,2 M de sel, tandis que les halophiles limites extrêmes se développent mieux dans des milieux contenant 1,5 à 4,0 M de sel, les halophiles modérés se développent mieux dans des milieux contenant 0,5 à 2,5 M de sel, et enfin les halotolérants qui ne montrent pas un besoin absolu de sel pour leur croissance

mais se développent bien jusqu'à des concentrations de sel souvent très élevées et tolèrent au moins 100 g/l de sel (équivalent à 1,7 M de NaCl). L'eau de mer, les sols salins, les lacs salés, les saumures et les habitats salins alcalins sont considérés comme les meilleurs habitats pour isoler les actinobactéries halophiles (Maldonado *et al.*,2005).

4-4 Actinobactéries endophytes

Les actinobactéries endophytes sont définies comme celles qui habitent la partie interne des plantes, ne causant apparemment aucun changement visible à leurs hôtes. Ces actinobactéries jouent des rôles spécifiques, par exemple en protégeant les plantes hôtes contre les insectes et les maladies. Les actinobactéries endophytes constituent une grande partie de la rhizosphère et se trouvent également à l'intérieur des plantes (Benson *et al.*, 1993).

4-5 Actinobactéries symbiotiques

Environ 15 % de l'azote mondial, est fixé naturellement par les relations symbiotiques entre diverses espèces de *Frankia*, appartenant à la famille des actinobactéries. Les plantes qui forment des relations symbiotiques avec les *Frankia* sont appelées “plantes actinorhizien” (Thajuddin *et al.*, 2015).

4-6 Actinobactéries endosymbiotiques

Un endosymbionte est un organisme qui vit dans le corps ou les cellules d'un autre organisme. Le processus d'endosymbiose est parfois obligatoire (Anandan *et al.*,2016).

4-7 Actinobactéries de l'intestin

Bien que les actinobactéries se trouvent dans divers habitats, certaines sont également connues pour former des associations intimes avec des invertébrés et des vertébrés. Les interactions symbiotiques sont essentielles pour la survie et la reproduction, car elles jouent un rôle crucial dans la nutrition, la détoxification de certains composés, la croissance et la protection contre les bactéries pathogènes (Tan *et al.*,2009).

Voici quelque exemple des types d'actinobactéries et leur importance écologique dans (**Tableau 2**) avec les genres important de chaque type.

Tableau 2 : Types d'actinobactéries et fonctions correspondantes (Saloni *et al.*, 2022)

Les divers types d'actinobactéries	importance écologies	reference	Les genres important
Thermophile	<p>Utilisé pour le compostage, comme agent antimicrobien, pour favoriser la croissance des plantes et pour la production d'enzymes d'hydrolyse du polyester.</p> <p>Cause de graves maladies respiratoires telles que le poumon de fermier et la bagasse.</p>	<p>(Shivlata <i>et al.</i>, 2015) (Sharma <i>et al.</i>, 2014)</p>	<p><i>Amycolatopsis</i>, <i>Cellulosimicrobium</i>, <i>Micrococcus</i>, <i>Micromonospora</i>, <i>Planomonospora</i>, <i>Saccharopolyspora</i>, <i>Streptomyces</i>, <i>Thermobifida</i> et <i>Thermomonospora</i>.</p> <p><i>Saccharopolyspora rectivirgula</i>, <i>S. viridis</i>, <i>Thermoactinomyces viridis</i> et <i>T. vulgaris</i>.</p>
Acidophile	<p>Ils possèdent un fort effet antagoniste sur de nombreux champignons pathogènes des racines (par exemple, ils inhibent les champignons pathogènes du riz <i>Fusarium moniliforme</i> et <i>Rhizoctonia solani</i>), une activité de solubilisation du phosphate et produisent des sidérophores.</p>	<p>(Poomthongdee <i>et al.</i>, 2015)</p>	<p><i>Actinospica</i>, <i>Catenulispora</i> et <i>Streptomyces acidiphilus</i>.</p>
Halophile	<p>Production de métabolites et d'enzymes essentiels (amylase, cellulase, lipase et protéase) dans le mécanisme de réponse au stress.</p>	<p>(Abdelshafy <i>et al.</i>, 2011)</p>	<p><i>Actinomycete</i>, <i>Actinokineospora</i>, <i>Actinopolyspora</i>, <i>Dactylosporangium</i>, <i>Halothermothrix orenii</i>, <i>Marinophilus</i>, <i>Microbacterium</i>, <i>Micrococcus</i>, <i>Microtetrasporea</i>, <i>Mycobacterium</i>, <i>Nocardiopsis</i>, <i>Rhodococcus</i>, <i>Saccharopolyspora</i>, <i>Salinispora</i>, <i>Streptomyces</i> et <i>Streptoverticillium</i>.</p>
Endophyte	<p>Ils protègent les plantes hôtes contre les insectes et les maladies.</p> <p>Elles produisent des métabolites secondaires tels que des alcaloïdes, des polykétides, des terpènes, des benzopyrènes, des quinones, des peptides et des dérivés d'acides gras, qui sont d'une grande importance thérapeutique.</p>	<p>(Ranjani <i>et al.</i>, 2016) (Singh <i>et al.</i>, 2018)</p>	<p><i>Actinomadura</i>, <i>Actinopolyspora</i>, <i>Brevibacterium</i>, <i>Kibdelosporangium</i>, <i>Nocardioides</i> et <i>Streptomyces</i>.</p> <p><i>Aeromicrobium</i>, <i>Kitasatospora</i>, <i>Microbispora</i>, <i>Micromonospora</i>, <i>Nocardia caishijiensis</i> et <i>Pseudonocardia</i>,</p>

			<i>carboxydivorans, Streptomyces et Verrucosispora maris.</i>
Symbiotique	<p>former des vésicules réductrices d'azote (NIR) dans les plantes actinorhiziennes, favoriser la fixation de l'azote et faciliter la colonisation initiale des plantes au cours de la succession primaire.</p> <p>Inhibent les plantes supérieures et entraînent des maladies telles que la gale de la pomme de terre et sont responsables du rabougrissement de la canne à sucre. Infectent le xylème et sont responsables du flétrissement des plantes dans la luzerne, le maïs, la tomate et la pomme de terre. Provoque le syndrome de la galle des feuilles chez les plantes herbacées dicotylédones.</p>	(Ranjani <i>et al.</i> , 2016) (Lewin <i>et al.</i> , 2016)	<p><i>Streptomyces gale</i></p> <p><i>Leifsonia xyli.</i></p> <p><i>Clavibacter michiganensis.</i></p> <p><i>Rhodococcus fascians.</i></p>
Endosymbiotique	<p>Produire des composés bioactifs ou des régulateurs de croissance des plantes (PGR) et protéger les cultures contre les infections fongiques.</p> <p>S'associer à des éponges marines et fournir une source prometteuse de nouveaux antibiotiques.</p>	(Ranjani <i>et al.</i> , 2016) (Goudjal <i>et al.</i> , 2015) (Gandhimathi <i>et al.</i> , 2008)	<p><i>Streptomyces griseoviridis.</i></p> <p><i>Arthrobacter, Brachybacterium, Brevibacterium, Corynebacterium, Dietzia, Microbacterium, Micrococcus, Micromonospora, Mycobacterium, Nocardiosis, Rhodococcus, Rubrobacter, Salinispora, and Streptomyces.</i></p>
Les intestins	Détoxifier certains composés, fournir des nutriments et des vitamines, améliorer les capacités de croissance, digérer des sources alimentaires complexes et assurer une protection contre les agents pathogènes.	(Ranjani <i>et al.</i> , 2016) (Lewin <i>et al.</i> , 2016)	<p><i>Rhodococcus rhodnii, Coriobacteriaceae, Bifidobacterium, Streptomyces, et Micromonospora.</i></p>

5- Rôle d'actinobactéries

Les actinobactéries sont reconnues pour posséder des métabolismes et des capacités physiques exceptionnels qui se révèlent bénéfiques dans de nombreux domaines écologiques (Shivlata et Satyanarayana, 2015).

Principalement pour le biocontrôle et la suppression des maladies des plantes et dans certains cas, pour l'amélioration de la qualité de l'eau, dans la promotion de la croissance des plantes (Ganapathy et Natesh, 2013).

Elles jouent aussi un rôle important dans la décomposition des matières organiques, telles que la cellulose et la chitine, jouant ainsi un rôle essentiel dans le renouvellement des matières organiques et le cycle du carbone, reconstituant les réserves de nutriments dans le sol et jouant un rôle important dans la formation de l'humus. (Oskay *et al.*, 2005).

Les actinobactéries en tant que rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) tel que rôle de biofertilisant, fixation l'azote et le nitrogen, solubilisation de phosphate et potassium, et aussi production des phytohormones comme sederophore, et production d'antibiotique et développement du compostage (Shivlata et Satyanarayana, 2015).

Les actinobactéries ayant un role importants dans tout les domaine de la biotechnologie (**Figure 4**) et en particulier dans la biotechnologie végétale car les souches ayant une activité antibacterienne contre les agents pathogènes des plantes sont utiles dans la lutte biologique.

Dans la biotechnologie verte car sont des producteurs des enzymes telles que l'amylase, la lipase, le xylanase, le pectinase, la protéase, le chitinase et le cellulase.

Dans la biotechnologie jaune et blanche jouent un rôle important dans l'industrie alimentaire, la fermentation, l'industrie du textile et du papier (Nawani *et al.*, 2013).

Et dans biotechnologie rouge les actinobactéries sont des producteurs de composés bioactifs. Ces composés biologiquement actifs sont utilisé comme agents thérapeutiques et pour la protection des cultures (Saranya *et al.*, 2022).

Ces microorganismes produisent aussi des antioxydants cytotoxiques afin d'aider l'organisme a lutté contre le stress oxydant (déséquilibre radicalaire et absence les capacités

de défense antioxydant) qui peut favoriser la survenue de pathologies (cancer, maladies cardiovasculaire...) (Amandine, 2016).

Il existe aussi des agents anti tumoraux, immunosuppresseurs pour inhiber ou prévenir l'activité du système immunitaire (Dharmaraj, 2010).

Les actinobactéries dans les sources thermales, jouent un rôle important dans les cycles biogéochimiques et le développement des sols en fabriquant diverses substances bioactives. Cependant, la distribution des espèces et la biogéographie du phylum *Actinobacteria* dans les .(sources chaudes sont peu décrites (Kumari, 2016

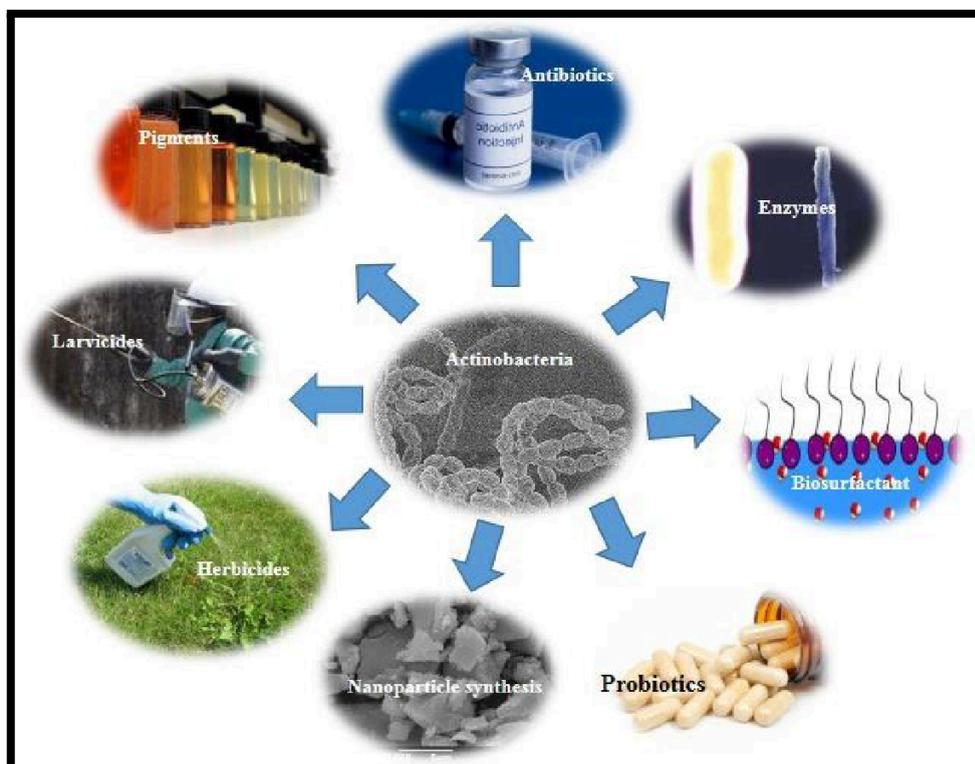


Figure 4 : Application biotechnologiques des actinobactéries (Anandan *et al.*, 2016).

Chapitre 2
*« Les Actinobactéries
thermophiles »*

1- Les actinobactéries thermophiles :

Les actinobactéries sont présentes dans des écosystèmes variés, y compris les eaux thermales. (Jani *et al.*, 2012; Duan *et al.*, 2014; Chaudhary and Prabhu 2016; Jiang *et al.*, 2016 ;Medjemadj *et al.*, 2020). Elles sont également présentes dans le foin moisi (Corbaz *et al.*, 1963), les résidus végétaux auto-chauffants, les céréales, la bagasse de canne à sucre (Suihko *et al.*, 2006), les matières végétales en décomposition et les tas de compost (Henssen et Schnepf, 1967).

Les actinobactéries thermophiles sont des aérobies strictes et des chimio-organotrophes obligatoirement vivants dans la nature et se nourrissent de la matière organique en décomposition (matières animales et végétales mortes) (Shivlata et Satyanarayana, 2015). Subsistent à des températures généralement élevées variant entre 40 et 80 °C (Tortora *et al.*, 2007 ; Jiang *et al.*, 2012). Alors que, les actinobactéries thermotolérantes peuvent atteindre des températures de 50 °C (Lengeler *et al.*, 1999).

Les actinobactéries thermophiles, sont de deux types :

1 - **Les actinobactéries strictement thermophiles** : possèdent la capacité de se développer à des températures entre 37 et 65°C, mais la multiplication idéale a généralement lieu à des températures entre 55 et 60°C.

2 - **Les actinobactéries modérément thermophiles**: se développent à 28-60°C et ont besoin d'une température entre 45-55°C pour une prolifération optimum (Jiang et Xu, 1993)

3-Un autre groupe appelé **actinobactéries thermotolérantes** peut subsister à des températures jusqu'à 50°C (Lengeler *et al.*, 1999).

Les actinobactéries thermophiles ont une importance industrielle majeure car elles fournissent plusieurs enzymes importantes sur le plan biotechnologique, telles que les ADN polymérases, les amylases, les xylanases, les lipases et les protéases (Mahajan et Balachandran, 2016).

1-1 Physiologie des actinobactéries thermophiles

Certaines actinobactéries thermophiles comme, *Streptomyces thermoautotrophicus* (Gadkari *et al.*, 1990) et *Acidithiomicrobium* sp. ont des modes de nutrition spécifiques tels que la chimioautotrophie obligatoire croissant uniquement à partir de CO₂ + H₂ et de soufre

(Norris *et al.*, 2011). D'autres actinobactéries ont des modes de nutrition tels que chimioautotrophie facultative chez (*Streptomyces* souche G26) (Bell *et al.*, 1988) et chez (*Amycolatopsis methanolica*) la méthylotrophie facultative (Boer *et al.*, 1990).

La diversité de la physiologie métabolique des actinobactéries thermophiles, permet à ces bactéries de coloniser des zones topographiques hétérogènes. La prédominance des actinobactéries thermophiles a été constatée dans des sites allant de la zone désertique steppique de Mongolie (Kurapova *et al.*, 2012) à l'Argentine subtropicale (Carrillo *et al.*, 2009) et même dans les événements hydrothermaux et les systèmes de chauffage résidentiels (Fink *et al.*, 1971).

Ces actinobactéries se cultivent rapidement et produisent des spores thermoduriques qui sont stables à des températures élevées pendant plusieurs jours. Les actinobactéries thermophiles démontrent leur capacité d'adaptation à des conditions extrêmes (Shivlata et Satyanarayana, 2015).

Les spores produites sont de type thermodurique et sont stables à des températures plus élevées pendant plus longtemps, non acides, non mobiles et aérobies, à l'exception du genre *Amycolatopsis* qui comprend à la fois des aérobies et des anaérobies facultatifs (Shivlata et Satyanarayana, 2015).

Toutes sont Gram-positives à l'exception de *Thermoleophilum* sp, *Ferrithrix* sp et d'une espèce (*S. viridis*) du genre *Saccharomonospora* (Shivlata et Satyanarayana, 2015).

La composition de la paroi cellulaire (peptidoglycane) est l'une des principales caractéristiques de la classification spécifique au genre. Sur la base des teneurs en acides aminés et en sucres, la paroi cellulaire des actinobactéries est regroupée en quatre grands types :

1. type-I [LL-DAP (acide diaminopimélique)].
2. type-II [acides aminés (méso-DAP et glycine) et sucres (arabinose et xylose)].
3. type-III (méso-DAP avec ou sans madurose).
4. type-IV (méso-DAP, arabinose et galactose (Lechevalier *et al.*, 1966).

Il existe également d'autres types de parois cellulaires. La plupart des actinobactéries thermophiles ont une paroi cellulaire de type III, alors que quelques genres (*Saccharomonospora*, *Saccharopolyspora*, et *Amycolatopsis*) sont réputés pour avoir une

paroi cellulaire de type IV. Seule une espèce du genre *Streptomyces* possède une paroi cellulaire de type I. Les autres composants cellulaires pris en compte pour la classification chimiotaxonomique concernent les phospholipides, les acides gras, l'acide mycolique, le type de ménaquinones et la teneur en GC (% mol). Les principaux types de ménaquinones respiratoires des actinobactéries thermophiles et thermotolérantes sont des variantes de MK-9. La présence d'autres ménaquinones MK-8 (*Rubrobacter*) et MK-10 (*Thermobifida*) a également été rapportée (Goodfellow *et al.*, 2012).

1-2 Adaptation des actinobactéries thermophiles

Les actinobactéries thermotolérantes/thermophiles ont développé des mécanismes d'adaptation tels que, la stratégies d'homéostasie, notamment une teneur en GC supérieure dans leur génome, la substitution d'acides aminés dans les protéines et la présence de composants spécifiques dans la paroi cellulaire (Shivlata et Satyanarayana, 2015).

Les protéines des thermophiles contiennent également une quantité plus élevée d'acides aminés chargés (Asp, Glu, Arg et Lys) par rapport aux acides aminés polaires (Asn, Gln, Ser et Thr) (Suhre et Claverie, 2003). Le même phénomène tendance à l'augmentation de la teneur en acides aminés chargés, à l'exception de la lysine, a été observée dans les protéines de *Thermobifidafusca* (Lykidis *et al.*, 2007).

Le genre *Corynebacterium* est regroupé principalement d'actinobactéries mésophiles, à l'exception de *C. efficiens* qui peut tolérer des températures jusqu'à 45°C (Fudou *et al.*, 2002). *Acidothermus cellulolyticus* est une espèce de la famille des *Acidothermaceae* et de l'ordre des *Frankiales*, capable de se développer à une température optimale de 55°C et à un pH de 5,5. Il se rapproche du genre *Frankia* sur l'arbre phylogénétique construit sur la base des séquences nucléotidiques 16S ARNr (Normand *et al.*, 1996), et possède une teneur en GC plus élevée que les espèces du genre *Frankia*. La différence de préférence pour les nucléotides G et A aux positions du premier et du troisième codon a également été observée. Par ailleurs, les protéines d' *A.cellulolyticus* contiennent une partie répétitive d'acides aminés (IVYWREL), qui pourrait conférer une thermostabilité aux protéines d' *Acidothermus cellulolyticus* par rapport outre protéines des espèces de *Frankia* (Barabote *et al.*, 2009).

1-3 Systématique, taxonomie et phylogénie

Les genres *Thermopolyspora*, *Thermomonospora*, *Thermotunica*, *Thermocatellispora*, *Thermobispora*, *Acidothermus*, *Acidimicrobium* et *Thermoleophilum* qui incluent uniquement des espèces thermophiles qui se trouvent dans différents genres et phylum des *Actinobacteria* (Shivlata et Satyanarayana, 2015) (Tableau 3).

Parmi les autres genres, on retrouve à la des espèces thermophiles et mésophiles. Tous ces genres appartiennent à quatre classes telles que (*Actinobacteria*, *Acidimicrobiia*, *Rubrobacteria* et *Thermoleophilia* du phylum *Actinobacteria*) (Shivlata et Satyanarayana, 2015) (Figure 5).

Voici quelque exemple d'espèces des actinobactéries thermophiles et leur lieu d'isolement dans résumés dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Quelques espèces d'actinobactéries thermophiles et thermotolérantes (Shivlata et Satyanarayana, 2015).

Actinobactéries	Conditions de croissance Température (°C) et pH	Lieu d'isolement	Références
<i>Marinactinospora thermotolerans</i> SCSIO 00652 ^T	10-55 °C 6-9	Sédiments marins, nord de la Chine du Sud	(Tian <i>et al.</i> , 2009)
<i>Thermomonospora curvata</i> B9T	40–65°C 7.5–11	Fumier stable composté	(Chertkov <i>et al.</i> , 2011)
<i>Saccharomonospora viridis</i> SJ-21	35-60°C 7-10	Source d'eau chaude india	(Jani <i>et al.</i> , 2012)
<i>Thermobifida fusca</i> (anciennement <i>Thermomonospora fusca</i>)	35–53°C 10–11	/	(McCarthy et Cross, 1984)
<i>Thermotunica guangxiensis</i>	37-65°C 6-9	Compost de résidus de champignons	(Wu <i>et al.</i> , 2014b)
<i>Thermopolyspora flexuosa</i> DSM 41386T	40-60°C 6-9	Sol des montagnes	(Krasilnikov et Agre, 1964)

<i>Thermoleophilum album</i> ATCC 35263	45–70°C 6.5–7.5	Échantillons de boue	(Zarilla et Perry, 1984)
<i>Thermobispora bispora</i> R51T	50–65°C	Fumier en décomposition	(Henssen, 1957)
<i>Saccharopolyspora thermophila</i> 216T	45–55°C	Échantillon de sol	(Lu <i>et al.</i> , 2001)

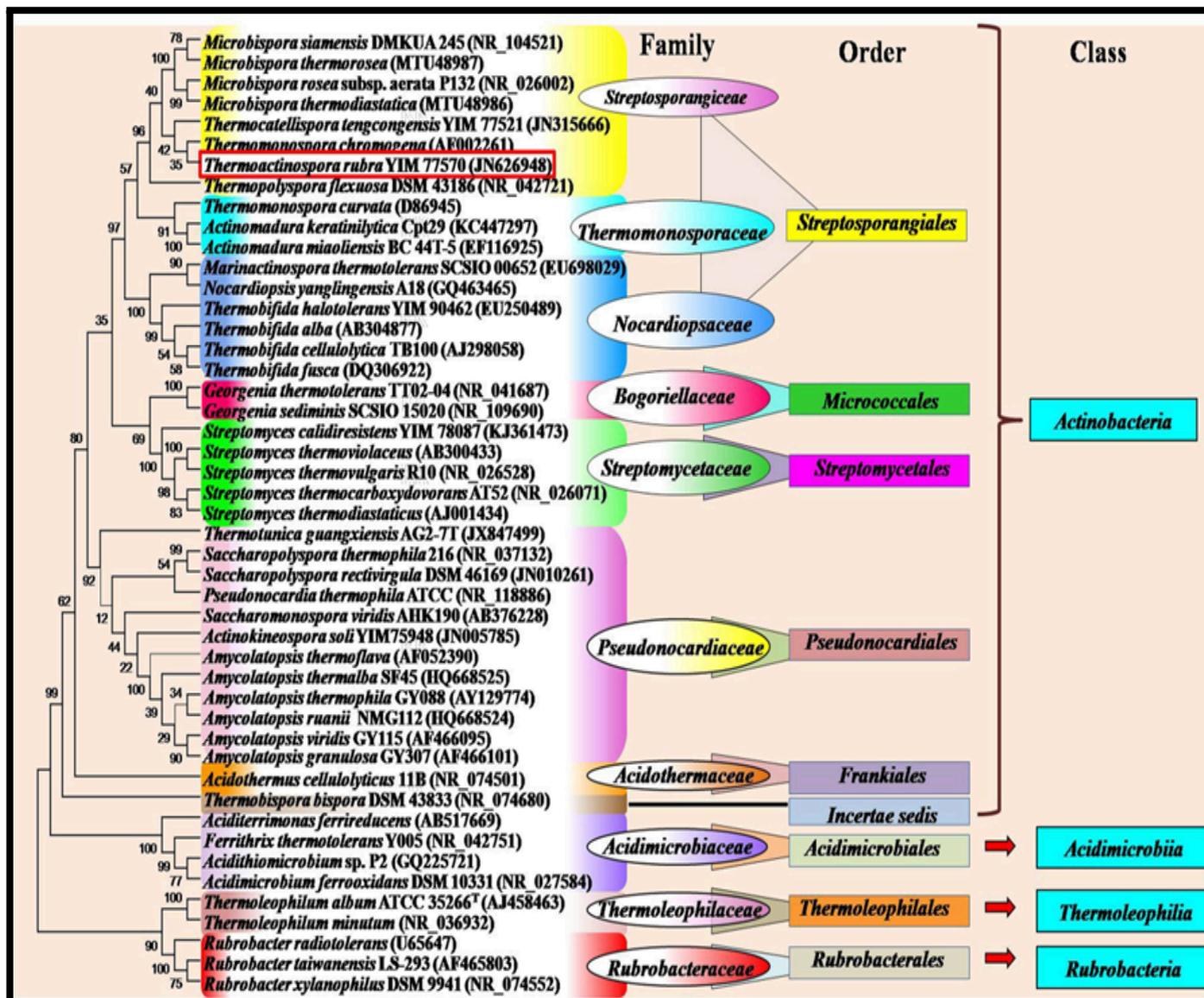


Figure 5: Phylogramme indiquant l'emplacement et la parenté de certaines souches des actinobactéries thermophiles et thermotolérantes appartenant à quatre classes (*Actinobacteria*, *Acidimicrobiia*, *Rubrobacteria* et *Thermoleophilia*) du phylum *Actinobacteria* (Shivlata et Satyanarayana, 2015).



1-4 Applications potentielles des actinobactéries thermophiles

Les actinobactéries thermophiles peuvent intervenir dans plusieurs utilisations en bioremédiation, en synthèse de nanoparticules d'or, en biofertilisants et en biopesticides (figure 6).

Figure 6 : Applications industrielles potentielles des actinobactéries thermophiles Industrielles (Shivlata et Satyanarayana, 2015).

1-4-1 Synthèse des nanoparticules d'or :

Les actinobactéries sont explorés pour la fabrication de nanoparticules d'or , ils synthétisés sont soit par voie intracellulaire, soit par voie extracellulaire. La synthèse de nanoparticules par les actinobactéries présente un avantage supplémentaire de la propriété de dispersion du polymère qui empêche l'auto-agrégation des nanoparticules. La synthèse de

nanoparticules d'or par *Thermomonospora sp* et *Rhodococcus sp* (Ahmad *et al.*, 2003b). Les particules d'or trouvent diverses applications à des fins diagnostiques, thérapeutiques et catalytiques .

1-4-2 Bioremédiation des sites contaminés par les hydrocarbures :

Les actinobactéries possèdent de nombreuses propriétés qui en font de bons candidats pour la biorestauration des sols contaminés par des polluants organiques. Dans certains sites contaminés, les actinobactéries représentent le groupe dominant parmi les dégradeurs.

Elle jouent un rôle essentiel dans le recyclage des éléments nutritifs du sol, ce qui contribue à augmenter sa productivité. Leur capacité à biodégrader des substrats complexes nécessite la mise en place de systèmes de contrôle de la qualité pour produire une gamme d'hydrolytes extracellulaires. Leur rapidité à coloniser et à sécréter des enzymes en fait d'excellents candidats pour le processus d'assainissement du biosécurité. De nombreuses souches d'actinobactéries ont la capacité de métaboliser une grande variété de polymères récalcitrants, tels que les hydrocarbures, les xénobiotiques, les plastiques et le caoutchouc. Par exemple, elles dégradent divers polyesters biodégradables comme le poly (éthylène succinate) (PES), le poly (ϵ -caprolactone) (PCL), le poly (d-3-hydroxybutyrate) (PHB), et bien d'autres encore. Certains de ces microorganismes agissent également sur des polymères comme le caoutchouc, produisant des substances chimiques précieuses telles que l'acide chlorhydrique, les aldéhydes, les cétones et d'autres composés organiques toxiques. Cette capacité à dégrader des substrats complexes et à produire des substances utiles en fait des acteurs clés dans les cycles biogéochimiques et les processus de dépollution environnementale (Shivlata et Satyanarayana, 2015).

1-4-3 Bioremédiation des sites contaminés par des radionucléides contaminés

Les actinobactéries possèdent une efficacité élevée et la capacité d'empêcher la propagation des déchets radioactifs sur une zone plus large et utilisées pour extraire ces polluants dangereux. Qui contaminent les terres et les ressources en eau, par exemple les lacs et les rivières par des radionucléides contiennent également d'autres composés toxiques tels que des métaux lourds (par exemple, le mercure) et des hydrocarbures toxiques (Shivlata et Satyanarayana, 2015).

1-4-4 Agent de biocontrôle

Les actinobactéries produisent de nombreuses enzymes extracellulaires qui interviennent dans plusieurs processus cellulaires tels que :

- Amélioration de la qualité du compost et l'augmentation de sa teneur en nutriments.
- Diminution de l'odeur du compost, car elles sont capables de le digérer complètement (Ohta et Ikeda, 1978).
- Capacité de dégrader complètement les débris de levure (Tanaka *et al.*, 1995).
- Implication dans la lyse cellulaire des champignons pathogènes.
- Certaines actinobactéries possèdent une capacité antagoniste pour les agents pathogènes des plantes (Iijima et Ryusuke, 1996).

1-4-5 Production de composés bioactifs

Les actinobactéries sont une source importante de composés bioactifs important dans le domaine clinique en particulier: antitumoral, antimicrobiens et immunosuppresseurs (Pritchard, 2005).

Les actinobactéries thermophiles produisent l'alternative la plus viable par rapport aux bactéries actuellement disponibles. Environ 55 % des antibiotiques connus (Raja et Prabrabel, 2005).

1-4-6 Synthèse de composés pharmaceutiques précieux :

Les Antioxydants, les composés anti-inflammatoires et les enzymes d'importance clinique sont composés pharmaceutiques synthétisent une large gamme par les actinobactéries.

Les antioxydants produits par les actinobactéries thermophiles sont la mélanine, l'acide férulique et la canthaxanthine.

Ces antioxydants ont de multiples usages dans le domaine médical, qui ont été utilisés dans le traitement du cancer, des maladies cardiaques et récemment dans des troubles

neurodégénératifs tels que les maladies d'Alzheimer et de Parkinson (Shivlata et Satyanarayana, 2015)

Une autre enzyme cliniquement importante, la vitamine D3 hydroxylase convertit le cholécalciférol (VD3) est une forme inactive, synthétisée à partir du 7-déhydrocholestérol dans la couche épidermique de la peau par réaction électro cyclique sur l'irradiation des ultraviolets.

Deux espèces d'actinobactéries thermophiles, *Thermomonospora alba* (Suzuki *et al.*, 2001) et *Thermobifida alba* (Suzuki *et al.*, 1998), produisent des composés tels que respectivement, la topo statine et l'isoaurostatine. Ces deux composés agissent comme des inhibiteurs de l'ADN topo isomérase et interfèrent avec les processus cellulaires tels que la réplication, la transcription et la traduction des virus, et pourraient donc fonctionner comme des composés agents antidiabétiques antiviraux potentiels. D'autres composés produits par les actinobactéries thermophiles (Suzuki *et al.*, 2001).

1-4-7 Enzymes importantes sur le plan industriel

Les actinobactéries thermophiles produisent également un certain nombre d'enzymes comme les amylases, les protéases, les lipases, les cellulases, les xylanases, les inulinases, les dextranases et les kératinases, Nitrile Hydratase, Laccase, Alginate Lyase Alditol oxydase, Cutinase et Monoxyde de carbone déshydrogénase ayant plusieurs applications industrielles décrites dans le Tableau 4.

Les **amylases** sont utilisés dans le traitement d'hydrolyse de l'amidon qui permet d'obtenir des oligosaccharides et d'autres sucres plus simples (glucose, maltose et maltotriose) qui sont utilisés dans les applications alimentaires ou dans l'industrie du sirop (Vieille et Zeikus, 2001).

Les **protéases** sont l'une des classes les plus importantes d'enzymes hydrolytiques, qui constituent plus de 65 % de l'ensemble des applications industrielles. Un nombre important d'espèces actinobactériennes (y compris les espèces alcalitolerantes et alcaliphiles) produisent des protéases alcalinisables et des kératinases d'intérêt commercial (Ellaiah *et al.*, 2002).

La **cellulase** et la **xylanase** sont deux enzymes importantes sur le plan industriel, qui nous permettent d'utiliser les résidus agricoles, et dans la production de biocarburant. Les conditions de cette technologie, exigent des enzymes hautement thermostables. Les actinobactéries thermophiles (Mohagheghi *et al.*, 1986) ont révolutionner de manière très

importante l'industrie des biocarburants ainsi que plusieurs autres industries alimentaire, textile, papier.

Une autre enzyme connue sous le nom de **nitrile hydratase** a été identifiée chez un grand nombre d'actinobactéries thermophiles et intervient dans la biotransformation des nitriles en composés utiles tels que les amines, les amides, les amidines, les acides carboxyliques, les esters, les aldéhydes et les cétones (Banerjee *et al.*, 2002).

La **laccase** intervient dans la catalyse et l'oxydation des substances phénoliques (2,6-diméthylphénylalanine et p-aminophénol) et produit des couleurs, c'est pourquoi elle est utilisée comme agent de coloration des cheveux. Les actinobactéries sont connues pour produire une laccase thermoalcalinisable (par exemple, *Thermobifida fusca* BCRC 19214 ; Chen *et al.*, 2013).

L' **alditol oxydase** impliquée dans l'oxydation des alcools primaires et secondaires donne des produits oxydants qui sont utilisés pour fabriquer d'autres composés utiles. Pour résoudre ce problème, la recherche se concentre sur l'isolement et la caractérisation de la flavoprotéine thermostable alditol oxydase (AldO) à partir de sources microbiennes pour des applications industrielles (Winter *et al.*, 2012). Le gène de l'AldO d'une actinobactérie thermophile (*Acidothermus cellulolyticus*) a été identifié lors de la recherche des homologues de l'AldO bien caractérisée de *Streptomyces coelicolor* dans la base de données du génome (Winter *et al.*, 2012).

Le **monoxyde de carbone déshydrogénase** est une enzyme oxydoréductase qui catalyse l'interconversion entre le monoxyde de carbone et le dioxyde de carbone. Il est fabriqué par les micro-organismes anaérobies et aérobies dans le cadre d'un mode de nutrition autotrophe *Streptomyces sp.* G26 (Bell *et al.*, 1988) et *Streptomyces thermoautotrophicus* (Gadkari *et al.*, 1990)

La **cutinase** est une enzyme qui possède une large spécificité de substrat, comme la cutine végétale et les esters solubles/insolubles, et les hydrolyse en acides gras hydroxyle et hydroxy-époxy comme produits finaux. Elle est aussi capable de métaboliser les polyesters synthétiques et d'autres polluants organiques (Kleeberg *et al.*, 2005).

Tableau 4: Enzymes commerciales produites par des actinobactéries thermophiles (Shivlata et Satyanarayana, 2015)

Enzymes	Applications industrielles
Amylase	Détergente Levain Papier et pâte Industrie textile
Protéase	Détergents Pharmaceutique Cuir Brassage
Kératinase	Industrie du cuir Utilisations pharmaceutiques
Xylanase	Papier et pâte Levain L'alimentation animale
Acetylxylan estérase	Papier et pâte
Dextranase	Moulins à sucre
Nitrile hydratase	Production d'acrylamide
Laccase	Traitement des déchets Traitement des peintures textiles

Carbon monoxide dehydrogenase	Génération de bioénergie Biofiltres
-------------------------------------	-------------------------------------

Chapitre 3
L'écosystème
extrême :
« L'eau thermale »

1- Les sources thermales

Les sources thermales sont des réservoirs naturels d'eau thermale riche en minéraux. Ils sont régulièrement accompagnés de phénomènes magmatiques et de la présence d'un système volcanique. La minéralisation des eaux est déterminée surtout par la nature chimique et minéralogique des sédiments qu'elles traversent. Leur disponibilité peut aussi simplement être associée à un dégradé géothermique plus élevé que la moyenne. Ce terme est habituellement utilisé pour désigner toute source naturelle où l'eau est plus chaude que l'environnement. La température peut varier de 20 à 100°C. La source de chaleur, quant à elle, est complètement naturelle et provient de l'énergie géothermique. En principe, la température des roches de la croûte terrestre croît avec la profondeur. C'est le cas dans les régions en dehors des volcans où le contact entre l'eau et les roches chaudes fait augmenter la température (Gillard, 2022).

Les sources chaudes sont faibles en matière organique, mais fortes en cations (comme le sodium et le calcium) et d'anions (par exemple chlorures, bicarbonates et sulfates). Cette composition chimique, associée à la température supérieure de ces eaux, confère aux micro-organismes un écosystème des plus extrêmes et des plus exceptionnels. (medjemadj *et al* 2020).

2- Classification des eaux thermales

La classification des eaux thermales prend en compte trois principaux aspects : leur origine géologique et Composition chimique et leur température. L'origine géologique influencée par les caractéristiques du substratum géologique et les processus géologiques.

Les compositions chimiques des eaux thermales sont classées en fonction de leur composition minérale, déterminée par leur teneur en anions et cations. On identifie généralement trois principales familles d'eaux thermales : les eaux thermales bicarbonatées, les eaux thermales chlorurées et les eaux thermales sulfatées.

Les températures des eaux thermales sont classées en fonction de leur température également (**Tableau 6**).

Tableau 6 : les classes des sources thermales à partir de leur Température en Algérie.

Source	Température	Exemple		
		Hamмам	Température	Références
hyperthermales	supérieur à 50 °C et inférieur à 100 °C.	Hamмам Debagh	98 °C	(Oual,2008)
		Hamмам Ksenna	62°C	(Guigue, 1952)
mésothermales	entre 25 et 34 °C.	Hamмам sidi M'Cid	30°C	(medjemadj, 2021)
hypothermales	Inférieur à 25 °C.	Hamмам Beni Haroune	19°C	(OUAL, 2008)

3- Les stations thermales en Algérie

Il existe sur le territoire algérien plus de 200 sources thermales, et selon les études réalisées à ce sujet, ce nombre augmente régulièrement à mesure que l'on se déplace vers l'est. Les températures mesurées à l'émergence varient de 19°C à Ben Haroune à 98°C à Hamмам Meskoutine. Parmi les nombreuses stations thermales qui existent en Algérie (**Tableau 7**).

Tableau 7: les stations thermales existent en Algérie (OUAL, 2008).

Région	Stations thermales	wilaya	température	
Région Algéroise	Hamмам Righa	Ain Defla	54 °C	(Ouali <i>et al.</i> , 2007)
	Hamмам Tellat	Alger	32°C	(Medjemadj,2021)
	Hamмам Ibainem	Alger	50 et 58°C,	(Medjemadj,2021)
	Hamмам Ksenna	Alger	62°C	(Guigue, 1952),
	Hamмам Sillal	Alger	46 °C et 48 °C,	(Pouget et Chouchak 1967).
	Hamмам Berrouaghia	Alger	44°C	(Nedjai, 1987).
	Hamмам Melouane	Blida	30°C	(Medjemadj,2021)
Région Est-Algérien	Hamмам sokhna	Sétif	25 °C et 43	(Boudoukha et Athamna, 2012),
	Hamмам Mansourah	Bordj Bou Arréridj	29 °C	(Medjemadj,2021)

	Hamam Latrèche	Cheffia	37°C	(Hacene et Christian, 2007).
	Hamam Meskhoutine Debagh	Guelma	90 à 98 °C	(Boudoukha et Athamna, 2012),
	Hamam Belhachani	Guelma	63 à 72 °C	(Bekkouche, 2016).
	Hamam Guerfa	Guelma	60 et 68°C.	(Bekkouche, 2016)
	Hamam N'Bails	Guelma	45 °C.	(Medjemadj,2021)
	Hamam sidi M'Cid	Constantine	30°C	(Nedjai, 1987)
	Hamam et Biban	Constantine	90°C	(Nedjai, 1987).
	Hamam Guergour	Sétif	44°C	(Ouali <i>et al.</i> , 2007
	Hamam Sidi Trad	Tarfet	60 °C	(Hacene et Christian, 2007).
	Hamam Beni Salah	Tarfet	45°C	(Hacene et Christian, 2007).
	Hamam Galaya « W »	Tarfet	68°C	(Hacene et Christian, 2007).
	Hamam Galaya « E »	Tarfet	69°C	(Hacene et Christian, 2007).
	Hamam Essalhine	Khenchela	70°C	(Ouali <i>et al.</i> , 2007).
	Hamam El Keria	Béjaya	44°C	(Nedjai, 1987).
	Hamam Oued Hmimine	Skikda	42°C et 47°C	(Bekkouche, 2013).
Région Ouest-Algérien				
	Hamam Bouhadjar	AïnTémouchent	70°C	(Boudoukha et Athamna, 2012).
	Hamam Rabbi:	Saida – Oran,	40°C	(Ouali <i>et al.</i> , 2007
	Hamam Boughrara	Maghnia	45°C	(Ouali <i>et al.</i> , 2007
	Bain de la Reine	Oran	55°C	(Medjemadj,2021)
	Hamam Bouhanifia:	Mascara	70°C	(Boudoukha et Athamna, 2012).
Région Sud-Algérienne				
	Hamam Salhin	Biskra	45°C	(Ouali <i>et al.</i> , 2007).
	Hamam Belaribi	M'Sila	31°C	(Medjemadj,2021)
	Hamam Delaa	M'Sila	41°C	(Medjemadj,2021)
	Hamam Serguine	Ain Ouassera.	38°C	(Medjemadj,2021)
	Hamam Zelfana	Ghardaïa	46°C	(Ouali <i>et al.</i> , 2007).

Chapitre 4
« Isolement
des actinobactéries
thermophiles à partir
des eaux thermales »

1- Isolement des actinobactéries thermophiles à partir des eaux thermales

En général, l'isolement des actinobactéries vise trois objectifs.

La première est l'étude de la communauté des actinobactériale dans un environnement particulier. Dans ces conditions, tous les actinobactéries ainsi que les cultures pures doivent être isolés et identifiés. Afin d'atteindre cet objectif, les milieux d'isolement utilisés doivent être propices à la croissance éventuelle d'un plus grand nombre d'actinobactéries, en même temps les autres microbes seront inhiber. Afin de rendre les milieux sélectifs et spécifiques, trois à cinq milieux de culture avec des composants différents clés doivent être utilisés. Des inhibiteurs contre les bactéries Gram-négatives et les champignons doivent être ajoutés comme nystatine est un antifongique .

Deuxièmement, l'isolement des actinobactéries spéciaux, par exemple une espèce ou un genre connu, ou un certain type d'actinobactéries présentant des caractéristiques physiologiques particulières, notamment la résistance aux antibiotiques, aux produits chimiques, aux alcalins, aux acides, aux sels et aux températures élevées et basses. Le milieu d'isolement doit répondre aux exigences des actinobactéries cibles et inhiber en même temps la croissance des microbes indésirables. Par exemple, afin d'isoler les actinobactéries halophyles et alcalophyles, la concentration en sel du milieu d'isolement doit être élevée comprise entre 15 % et 25 % et le pH du milieu doit être ajusté entre 10 et 12.

Troisièmement, l'isolement d'actinobactéries rares ou inconnus. Jusqu'à présent, d'innombrables actinobactéries ont été isolés et identifiés dans divers habitats du monde entier. Ainsi, l'isolement des actinobactéries inconnus est très délicat mais essentiel. Cela nécessite d'inhiber la croissance non seulement des bactéries à Gram négatif, de certaines bactéries à Gram positif et des champignons, mais également de la plupart des actinobactéries courants.

Afin d'isoler un maximum d'actinobactéries inconnus, les chercheurs doivent connaître toutes les connaissances sur la physiologie et les taxonomies des actinobactéries et autres microbes ainsi que le rôle de chaque facteur d'isolement (y compris les composants et la concentration du milieu, le pH, l'inhibiteur, la température de culture , etc.), et ils doivent avoir une riche expérience. Les procédures d'isolement doivent être sans cesse renouvelées et améliorées. Tout en explorant de nouveaux écosystèmes inhabituels tels que les écosystèmes extrêmes.

Chapitre 4: Isolement des actinobactéries thermophiles à partir des eaux thermales

L'isolement des actinobactéries à partir d'eaux thermales implique plusieurs étapes (Medjemadj *et al*, 2020 ; Lefaida *et al*, 2023) :

- 1- Échantillonnage : Des échantillons d'eau thermale ou de sédiments, voire même les sols avoisinant la source thermale, sont collectés dans divers endroits. Le prélèvement peut être effectué à partir des sources chaudes, des sources géothermiques ou des lacs thermaux.
- 2- prétraitement : Les échantillons sont incubés à des températures allant de 55 à 65°C pour éliminer et tuer tous les micro-organismes non thermophiles et favorise la croissance des actinobactéries thermophiles.
- 3- Isolement : Les échantillons enrichis sont ensuiteensemencés sur des milieux sélectifs, tels que le milieu AIA (Agar isolation of Actinobacteria) (annexe 1) ou le milieu SCA (Starch Casein Agar) (annexe 1), pour favoriser l'isolement des colonies individuelles.
- 4- Purification : Les colonies isolées sont purifiées par des sous-cultures répétées pour obtenir des cultures pures des isolats actinobactériens.

D'après plusieurs études, les caractéristiques des Actinobactéries thermophiles ou encore thermotolérants, isolés à partir des eaux thermales, sont en général les suivantes:

- 5- La thermophilie: De nombreuses actinobactéries des eaux thermales sont thermophiles, capables de croître à des températures supérieures à 55°C. Cette adaptation leur permet de prospérer dans des environnements où la plupart des autres micro-organismes ne peuvent pas survivre.
- 6- L'halotolérance : Certaines actinobactéries des eaux thermales sont halotolérantes, capables de croître en présence de concentrations élevées de sel. Cela est particulièrement important dans les eaux thermales, où les concentrations de sel peuvent être élevées en raison de processus géologiques.
- 7- La production d'antibiotiques : Les actinobactéries sont connues pour leur capacité à produire des antibiotiques et d'autres métabolites secondaires. Celles isolées des eaux thermales peuvent produire des composés novateurs aux propriétés uniques.
- 8- La production d'enzymes : Les actinobactéries des eaux thermales peuvent produire des enzymes avec une grande stabilité thermique, les rendant utiles pour des applications industrielles telles que la production de biocarburants ou la bioremédiation.

- 9- La diversité : La diversité des actinobactéries dans les eaux thermales est élevée, de nombreuses espèces et genres nouveaux étant découverts dans ces environnements.

2- Diversité des actinobactéries dans les Eaux Thermales

Les genres et espèces des actinobactéries isolés des sources thermales montrent une grande diversité et une adaptation à des conditions extrêmes de température et de salinité. Ils sont intéressants pour leur potentiel biotechnologique, notamment pour la production d'enzymes et de composés bioactifs.

Les genres d'actinobactéries isolés des sources thermales étudiées dans le monde sont variés et comprennent notamment :

- **Le genre *Streptomyces*** : Ce genre est l'un des plus abondants et des plus étudiés, avec des espèces telles que *Streptomyces ruber*, *Streptomyces pactum*, *Streptomyces thermoviolaceus*, *Streptomyces erumpens*, et *Streptomyces lydicu*.
- **Le genre *Thermobifida*** : Ce genre comprend des espèces thermophiles telles que *Thermobifida fusca* capable de dégrader la cellulose à haute température et *Thermobifida halotolerans*.
- **Le genre *Thermomonospora*** : Ce genre comprend des espèces thermophiles telles que *Thermomonospora sp.*, qui produit des antibiotiques et d'autres métabolites secondaires.
- **Le genre *Actinomadura*** : Ce genre comprend des espèces telles que *Actinomadura keratinilytica* et *Actinomadura*.
- **Le genre *Nocardiopsis*** : Ce genre comprend des espèces telles que *Nocardiopsis alba* et *Nocardiopsis prasina*.
- **Le genre *Actinopolyspora*** : Ce genre comprend des espèces halophiles telles que *Actinopolyspora halophila*.

Discussion générale

Discussion générale

Les actinobactéries thermophiles isolées des sources chaudes sont un sujet fascinant de recherche en microbiologie. Ces organismes sont adaptés à des environnements extrêmes caractérisés par des températures élevées, souvent au-delà de 50°C, et des conditions chimiques particulières. Les sources chaudes, telles que les geysers, les sources thermales et les volcans, offrent des habitats uniques où se développent ces micro-organismes thermophiles (Damiano, 2022).

Les actinobactéries thermophiles sont particulièrement intéressantes en raison de leurs adaptations évolutives pour survivre dans de telles conditions extrêmes. Leur métabolisme, leur structure cellulaire et leurs mécanismes de régulation génétique sont souvent différents de ceux des bactéries mésophiles, adaptées à des températures plus modérées.

Sur le plan biotechnologique, les actinobactéries thermophiles présentent un grand intérêt en raison de leur capacité à produire des enzymes thermostables. Ces enzymes sont utilisées dans divers processus industriels, tels que la production de biocarburants, la dégradation des déchets organiques et la synthèse de produits chimiques. Leur stabilité à des températures élevées permet d'optimiser les réactions enzymatiques et de réduire les coûts de production (Shivlata et Satyanarayana, 2015).

En outre, les actinobactéries thermophiles sont également étudiées pour leur potentiel en tant que sources de nouveaux antibiotiques et de composés bioactifs. Leur capacité à survivre dans des environnements hostiles les rend souvent résistantes à divers stress, y compris les agents pathogènes. Par conséquent, leur exploration pourrait conduire à la découverte de nouvelles molécules thérapeutiques contre les maladies infectieuses et d'autres troubles de santé (Shivlata et Satyanarayana, 2015).

Cependant, malgré leur importance potentielle, les actinobactéries thermophiles des sources chaudes restent largement méconnues. Leur diversité génétique et leur écologie dans ces habitats extrêmes sont encore largement à explorer. Des études approfondies sur leur diversité, leur physiologie et leur écologie sont nécessaires pour comprendre pleinement leur rôle dans les écosystèmes thermophiles et pour exploiter leur potentiel biotechnologique de manière efficace et durable (Shivlata et Satyanarayana, 2015).

Conclusion et Perspectives

Conclusion et perspectives

L'isolement des actinobactéries à partir de sources chaudes représente un domaine de recherche dynamique et prometteur qui offre un potentiel considérable pour de nombreuses applications. Les progrès réalisés dans ce domaine ont permis de découvrir une diversité remarquable d'organismes et de métabolites, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives dans divers domaines scientifiques et industriels.

Cependant, malgré les avancées significatives, de nombreux défis persistent. Par exemple, la culture et l'isolement sélectifs des actinobactéries à partir d'environnements extrêmes exigent toujours des améliorations en termes de techniques et de méthodologies. De plus, la caractérisation approfondie des métabolites produits par ces microorganismes nécessite des approches analytiques sophistiquées et une compréhension approfondie de leur physiologie.

Dans les années à venir, il est probable que les recherches sur l'isolement des actinobactéries à partir de sources chaudes se concentreront sur plusieurs axes principaux. Tout d'abord, il sera crucial de mieux comprendre la diversité génétique et métabolique de ces microorganismes, en utilisant des approches métagénomiques et métabolomiques avancées. Ensuite, il sera nécessaire de développer des techniques de culture plus efficaces et des stratégies de criblage haut débit pour identifier de nouveaux métabolites d'intérêt biotechnologique et pharmaceutique. Enfin, il sera essentiel d'explorer davantage les interactions entre les actinobactéries et leur environnement, notamment leur rôle dans les cycles biogéochimiques et leur potentiel pour la bioremédiation.

En récapitulant, l'isolement des actinobactéries à partir de sources chaudes offre un champ d'investigation riche en découvertes potentielles et en applications pratiques. En combinant des approches multidisciplinaires et en exploitant les technologies émergentes, il est possible de tirer pleinement partie du potentiel biotechnologique et environnemental de ces microorganismes fascinants.

Références

A

- Abdelshafy Mohamad OA., Li L., Ma J.B., Hatab S., Rasulov B.A., Musa Z.(2018). Halophilic Actinobacteria biological activity and potential applications. In: Egamberdieva D., Birkeland N-K., Panosyan H., Li W.J. Extremophiles in Eurasian Ecosystems: Ecology, Diversity, and Applications. Singapore: Springer Singapore.p: 333-364.
- Ahmad A., Senapati S., Khan M. I., Kumar R., Sastry M. (2003b).Intracellular synthesis of gold nanoparticles by a novel alkalotolerant *actinomycete Rhodococcus* species. *Nanotechnology* ,14, p: 824–828.
- Al-Zarban S.S., Al-Musallam A.A., Abbas I., Stackebrandt E., Kioppenstedt R.M. (2002). *Saccharomonospora halophila* sp. nov., a novel halophilic actinomycete isolated from marsh soil in Kuwait. *Int J Sys Env Microbiol*, 52,p: 555-558
- Amandine, G. (2016). Plantes médicinales et antioxydants. Thèse de Doctorat : Science pharmaceutiques. France (Toulouse) : Université Toulouse 3 Paul Sabatier, 102pp
- Amrita K. P., Satpal S. B., Mahendra R., Surajit D. M., Nachimuthu S K. (2018). Chapter 10 - Biotechnological Potential of Thermophilic *Actinobacteria* Associated With Hot Springs. Dans : Bhim P. S., Vijai K. G., Ajit K. P., New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering, *Elsevier*, P: 155-164
- Anandan R., Dharumadurai D. And Gopinath PM. (2016). Actinobacteria-Basics and biotechnological Applications: An Introduction to Actinobacteria. India: Dharumadurai, Dhanasekaran., Yi, Jiang. 400p
- Anandan R., Dharumadurai D., Manogaran G.P(2016). An introduction to Actinobacteria. In: Dhanasekaran D., Jiang Y. Actinobacteria. Rijeka: intechopen

B

- Banerjee A., Sharma R., Banerjee U. C. (2002). The nitrile-degrading enzymes: current status and future prospects. *Appl. Microbiol. Biotechnol*, 60,p:33–44
- Baniya A., Singh S., Singh M., Nepal P., Adhikari M., Aryal S., & Adhikari A. (2019). Isolation and Screening of Antibiotics Producing Streptomyces spp from the

- Soil Collected around the Root of *Alnus nepalensis* from Godawari. *Nepal Journal of Biotechnology*, 6(1), P: 46–56
- Barabote R. D., Xie G., Leu D. H., Normand P., Necsulea A., Daubin V., et al. (2009). Complete genome of the cellulolytic thermophile *Acidothermus cellulolyticus* 11B provides insights into its ecophysiological and evolutionary adaptations. *Genome Res*, 19, p:1033–1043.
 - 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. *Microbiol Mol Biol Rev*, 80(1), P:1-43
 - Bekkouche M. (2016). Caractéristiques hydrochimiques des sources thermales de l'extrême Nord-Est Algerien. Thèse de Doctorat : Univ. Badji Mokhtar-Annaba., 178 p
 - Bell, J.M., Colby, J., and Williams, E. (1988). CO oxidoreductase from *Streptomyces* strain G26 is a molybdenum hydroxylase. *Biochem. j.*, 250, p: 605–612
 - 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., 209 p.
 - Benson D.R., Silvester W.B. (1993). Biology of Frankia strains, actinomycete symbionts of actinorhizal plants. *Microbiol Rev.* 1993; 57(2):293
 - Boer, L.D., Dijkhuizen, L., Grobben, G., Goodfellow, M., Stackebrandt, E., Parlett, J.H., et al. (1990). *Amycolatopsis methanolica* sp. nov. a facultatively methylotrophic actinomycete. *Int. J. Syst. Bacteriol.*, 40, p:194–204
 - Boudoukha A., Athemna M. (2012). Caractérisation des eaux thermals de l'ensemble Sud Sétifien. Est Algérien. *Revue des sciences de l'eau.*, 25 ,p: 103-119
 - Boughachiche F., Reghioua S., Oulmi L., Zerizer H., Kitouni M., Boudemagh A., Boulahrouf A. (2005). Isolement d'actinomycétales productrices de substances antimicrobiennes à partir de la Sebkhha de Ain Mlila. *Sciences & Technologie C*, 23 ,p:5–10
 - Bride M. J., (1986). The effect of trehalose content on *Streptomyces griseus* spore. in: Biological, Biochemical, and Biomedical aspect of actinomycetes. Akademiai kiado. Budapest. p:847-849.

- Buchanan R.E. (1917). Studies in the nomenclature and classification of the bacteria. II. The primary subdivisions of the Schizomycetes. *J. Bacteriol*, 2, p:155–164.

C

- Carrillo L., Benítez Ahrendts M. R., and Maldonado M. J. (2009). Alkalithermophilic actinomycetes in a subtropical area of Jujuy, *Argentina*. *Rev. Argent. Microbiol*, 41, p: 112–116
- Chen C. Y., Huang Y. C., Wei C. M., Meng M., Liu W. H., Yang C. H. (2013). Properties of the newly isolated extracellular thermo-alkali-stable laccase from thermophilic actinomycetes, *Thermobifida fusca* and its application in dye intermediates oxidation. *AMB Express*,3,p: 1–9
- Chertkov O., Sikorski J., Nolan M., Lapidus A., Lucas S., Rio T. G. D.,Tijana ., Tice H., Cheng.J.F., Goodwin L., Pitluck S., Liolios K.,Ivanova N.,Mavromatis K., Mikhailova N., Ovchinnikova G., Pati A., Chen A., Palaniappan k., Olivier D., Djao N., Land M., Hauser L., Chang Y.J., Cynthia D., Thomas J.,Brettin., Han C., John C., Detter ., Rohde M., Göker M, Woyke T.,Bristow J., Jonathan A., Eisen., Markowitz V.,Hugenholtz p., Klenk H.P., and Nikos C.,Kyrpides.(2011). Complete genome sequence of *Thermomonospora curvata* type strain (B9^T). *Stand. Genomic Sci*,4,p:13–22.
- Corbaz R., Gregory P. H., Lacey M. E. (1963). Thermophilic and mesophilic actinomycetes in mouldy hay. *J. Gen. Microbiol*, 32, p: 449–455.
- Cross T. (1981). Aquatic actinomycetes: a critical survey of the occurrence, growth and role of actinomycetes in aquatic habitats. *J Appl Bacteriol*, 50(3),P:397-42
- Chaudhary N., Prabhu S. (2016). Thermophilic Actinomycetes from Hot Water Spring Capable of Producing Enzymes of Industrial Importance. *Int J. Res. Stud. Biosci*, 4, p: 29–35

D

- Dharmaraj S. (2010). Marine Streptomyces as a novel source of bioactive substances. *World journal of microbiology and biotechnology*, 26(12), p: 2123-2139
- Dommergues Y.,Mangenot F. (1970). Écologie Microbienne Du Sol. Paris : Masson et Cie. 803p

Référence

- Duan Y. Y., Ming, H., Dong, L., Yin, Y. R., Zhang, Y., Zhou, E. M., et al. (2014). *Streptomyces calidiresistens* sp. nov., isolated from a hot spring sediment. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 106,p: 189–196.

E

- Ellaiah P., Srinivasulu B., Adinarayana K. (2002). A review on microbial alkaline proteases. *J. Sci. Ind. Res*, 61,p:690–704

F

- Fink J. N., Resnick A. J., and Salvaggio J. (1971). Presence of thermophilic actinomycetes in residential heating systems. *Appl. Microbiol*, 22, p: 730–731
- Floyd M. H., Pieper R. L. and Mertz F. P. , (1987) . Sporulation of *Streptomyces roseosporus* in submerged culture . *J. Ind . Microbiol*, 2 , p: 235-241
- Fudou R., Jojima Y., Iizuka T., and Yamanaka S. (2002). *Haliangium ochraceum* gen. nov., sp. nov. and *Haliangium tepidum* sp. nov.: Novel moderately halophilic myxobacteria isolated from coastal saline environments. *The Journal of General and Applied Microbiology*, 48(2), p:109–115.

G

- Gadkari D., Schricker K., Acker G., Kroppenstedt R. M., and Meyer, O. (1990). *Streptomyces thermoautotrophicus* sp.nov., a thermophilic CO₂- and H₂-oxidizing obligate chemolithoautotroph. *Appl. Environ. Microbiol*, 56, p:3727–3734
- Gandhimathi R., Arunkumar M., Selvin J., Thangavelu T., Sivaramakrishnan S., Kiran G.S. (2008). Antimicrobial potential of sponge associated marine actinomycetes. *Journal of Medical Mycology*, 18(1), p:16-22
- Gao B., Gupta R.S. (2012). Phylogenetic framework and molecular signatures for the main clades of the phylum *Actinobacteria*. *Microbio. Mol. Biol. Rev*, 76, p:66–112.
- Ghanem N.B., Sabry S.A., El-Sherif Z.M., Abu El-Elal G.A. (2000). Isolation and enumeration of marine actinomycetes from seawater and sediments in Alexandria. *JGen Appl Microbiol*, 46(3),p: 105–111

- Goodfellow M., Kämpfer P., Busse H.J., Trujillo M.E., Suzuki K., Ludwig W., Whitman W.B. (2012). *Bergey's manual of systematic bacteriology*, 2nd Edn., vol 5. The *Actinobacteria*, part A and B. Springer, New York, NY; Dordrecht; Heidelberg; London: Springer
- Goodfellow M. and Williams ST. (1983). Ecology of actinomycetes. *Annual Review of Microbiology*, 37,p: 189-216
- Goudjal Y., Zamoum M., Meklat A., Sabaou N., Mathieu F., Zitouni A. (2015). Plant-growth-promoting potential of endosymbiotic actinobacteria isolated from sand truffles (*Terfezia leonis* Tul.) of the Algerian Sahara. *Annales de Microbiologie*,66(1),p:91-100
- Grossart, H.P., Schlingloff, A., Bernhard, M., Simon, M., Brinkhoff, T. (2004). Antagonistic activity of bacteria isolated from organic aggregates of the German Wadden Sea. *FEMS. Microbila. Ecol*, 47(3), p:387 396
- Guigue S. (1952). Diagrammes logarithmiques de quelques sources thermominérales d'Algérie,P : 80-96

H

- Hacene., Alayat., Christian., Lamouroux. (2007). Caractérisation physico-chimique des eaux thermo-minérales des Monts de la Cheffia (extrême Nord-Est Algérien). *Press.Therm. Climat*,144,p: 191-199
- Hagedorn C. (1976). Influences of soil acidity on *Streptomyces* populations inhabiting forest soils. *Appl Environ Microbiol*, 32(3),p :368-375
- Hagedorn C.(1976). Influences of soil acidity on *Streptomyces* populations inhabiting forest soils. *Appl Environ Microbiol*,32(3),p:368-375
- Henssen A., and Schnepf E. (1967). Zur Kenntnis thermophiler Actinomyceten. *Arch. Mikrobiol* , 57, p : 214–231
- Henssen A. (1957). Beitrage zur morphologie und systematik der thermophilen actinomyceten. *Arch. Mikrobiol*,26,p: 373–414
- Hinch C. F., Cann M. C., Cormick P. A. (1985). Biology of streptomyces. in: *Biology of industrial microorganisms*.The Benjamin/Cummings publishing company,18, p: 291-314
- Holt J.G., Kreig N.R., Sneath P.H.A., Staley J.T ., Williams S.T. (1994) .In: *Bergey's of Actinobacteria*, *Actinobacteria - Basics and Biotechnological Applications*,

Dharumadurai systematic bacteriology, vol 5. Springer-Verlag. New York, NY, p : 1–28

I

- Iijima and Ryusuke. (1996). Plant Activator and Mycelial Fertilizer and Method. Yokohama City. US Patent 5529597

J

- Jani S. A., Chudasama C. J., Patel D. B., Bhatt P. S., Patel H. N. (2012). Optimization of extracellular protease production from alkali thermo tolerant actinomycetes: *Saccharomonospora viridis* SJ-21. *Bull. Environ. Pharmacol. Life Sci*, 1, p: 84–92
- Jani S.A., et al., 2014. Screening, isolation and characterization of keratin degrading actinomycetes: *Streptomyces* sp. and *Saccharothrix xinjiangensi* and analyzing their significance for production of keratinolytic protease and feed grade amino acids. *International journal of Microbiology and Applied Sciences* , 3(9), p : 940_955.
- Jensen P.R., Dwight R., Fenical W. (1991). Distribution of actinomycetes in near-shore tropical marine sediments. *Appl Environ Microbiol*, 57(4), p:1102–1108
- Jensen P.R., Mincer T.J., Williams P.G., Fenical W. (2005). Marine actinomycete diversity and natural product discovery. *A Van Leeuw*, 87(1), p:43-48
- Jiang C., and Xu L. (1993). Actinomycete diversity in unusual habitats. *Actinomycetes* ,4, p: 47–57

K

- Khan M.R., Williams S.T. (1975). Studies on the ecology of actinomycetes in soil—VIII: Distribution and characteristics of acidophilic actinomycetes. *Soil Biol Biochem*, 7(6), p :345-348
- Kitouni M., Boudemagh A., Oulmi L., Reghioua S., Boughachiche F., Zerizer H., Hamdiken H., Couble A., Mouniee D., Boulahrouf A., Boiron P. (2005). Isolation of actinomycetes producing bioactive substances from water, soil and tree bark samples of the north–east of Algeria. *J Med Mycol*, 15(1), p : 45–51

- Kleeberg I., Welzel K., VandenHeuvel J., Müller R. J., Deckwer W. D. (2005). Characterization of a new extracellular hydrolase from *Thermobifida fusca* degrading aliphatic-aromatic copolyesters. *Biomacromolecules*, 6,p: 262–270
- Krasilnikov N. A., Agre N. S. (1964). On two new species of *Thermopolyspora*. *Hindustan Antibiot. Bull*, 6,p:97–107
- Kumari I, et al. (2016) Deciphering the protein translation inhibition and coping mechanism of trichothecene toxin in resistant fungi. *Int J Biochem Cell Biol* ,78, p :370-376
- Kurapova I., Zenova G. M., Sudnitsyn I. I., Kizilova A. K., Manucharova N. A., Norovsuren Z. H., et al. (2012). Thermotolerant and thermophilic actinomycetes from soils of Mongolia Desert Steppe Zone. *Microbiology*, 81, p : 98–108

L

- Lewin G.R., Carlos C., Chevrette M.G., Horn H.A., McDonald B.R., Stankey R.J.(2016).Evolution and ecology of Actinobacteria and their bioenergy applications. *Annual Review of Microbiology*,70,p:235-254
- Li Q., Chen X., Jiang Y., Jiang C. (2016). Morphological Identification of *Actinobacteria*. In *Actinobacteria- Basics and Biotechnological Applications*, *InTech*
- Lu Z., Liu Z., Wang L., Zhang Y., Qi W., Goodfellow M.(2001). *Saccharopolyspora flava* sp. nov. and *Saccharopolyspora thermophila* sp. nov., novel actinomycetes from soil. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol*, 51,p: 319–325
- Ludwig W., Euzéby J., Schumann P., Buss H.J., Trujillo M.E., Kämpfer P., Whiteman Manual of determinative Bacteriology, 9 th edition. Williams and Wilkins Co., Baltimore
- Lykidis A.,Mavromatis K.,Ivanova N.,Anderson I.,Land M.,DiBartolo G., et al.(2007).Genome sequence and analysis of thesoilcellulolytic actinomycete *Thermobifidafusca* YX. *J.Bacterio*, 189, p :2477–2486

M

- Maldonado L.A., Stach J.E., Pathom-aree W., Ward A.C., Bull A.T., Goodfellow M. (2005).Diversity of cultivable Actinobacteria in geographically widespread marine sediments. *A Van Leeuwenhoek*, 87(1),p :8-11.
- McCarthy A. J., Cross T. (1984). A taxonomic study of *Thermomonospora* and other monosporic actinomycetes. *J. Gen. Microbiol*, 130,P: 5–25

- McKinney, R. E. (2004). Environmental pollution control microbiology: a fifty-year perspective. CRC Press
- Medjemadj M., Boudemagh A. (2021). Etude de la biodiversité des actinobactéries dans quelques eaux thermales de la région Est de l'Algérie Doctoral dissertation : Université Frères Mentouri-Constantine 1., 174
- Makkar N.S., Cross, T. (1982). *Actinoplanetes* in soil and on plant litter from freshwater habitats. *J. Appl. Bacteriol*, 52(2):209-218
- Medjemadj M., Escuder-Rodríguez J. J., Boudemagh A. and González-Siso M. I.(2020). Actinobacteria isolated from Algerian hot spring waters: A potential source of important enzymes. *Eco. Env. & Con*,26 (3) ,p :1145-115.
- Mohagheghi A., Grohmann K., Himmel M., Leighton L., Updegraff D. M. (1986). Isolation and characterization of *Acidothermus cellulolyticus* gen nov.,sp. nov., a new genus of thermophilic, acidophilic, cellulolytic bacteria. *Int. J. Syst. Bacteriol*, 36,p:435–443.
- Mokhtar , N. A. (2011). Investigations of triacylglyceride metabolism amongst actinomycete isolates from Peninsular Malaysia Doctoral dissertation : University of Cambridge.

N

- Nawani N., Aigle B., Mandal A., Bodas M., Ghorbel S. And Prakash D. (2013). Actinomycetes: role in biotechnology and medicine. Biomed research international, 1p
- Nedjai R. (1987) . Etude hydrologique et hydrochimique des eaux thermales du centre Algérien. Thèse de doctorat : Univ. Grebouble. France
- Normand P., Orso S., Cournoyer B., Jeannin P., Chapelon C., Dawson J., et al. (1996). Molecular phylogeny of the genus *Frankia* and related genera and emendation of the family Frankiaceae. *Int. J. Syst. Bacteriol*, 46, p: 1–9
- Norris P. R., Davis-Belmar C. S., Brown C. F., and Calvo-Bado,L. A. (2011). Autotrophic, sulfur-oxidizing. *Actinobacteria* in acidic environments *Extremophiles*,15, p:155–163
- Normand P.,Orso S.,Cournoyer B.,Jeannin P.,Chapelon C .,Dawson J.,et al.(1996).Molecular phylogeny of the genus *Frankia* and related genera and emendation of the family Frankiaceae. *Int.J.Syst.Bacterio*., 46, p :1–9.

O

- Ohta Y., Ikeda M. (1978). Deodorization of pig feces by actinomycetes. *Appl. Environ. Microbiol*, 36, p: 487–491
- Omura, S. (1992). *The search for bioactive compounds from microorganisms*. Springer Science & Business Media
- Oskay A M., Usame T., Cem A. (2005). Antibacterial activity of some actinomycetes isolated from farming soils of Turkey. *Afr J Biotechnol*, 3(9), p :441-446
- Ouali S., Mehmah,B., MalekA. (2007). Etude de faisabilité d'utilisation des eaux thermalesde Zelfana Dans la Production d'Hydrogène. *ResearchGate*

P

- Pine L. (1970). Classification and phylogenetic relationship of microaerophilic actinomycetes. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 20, p: 445-474
- Poomthongdee N., Duangmal K., Pathom-aree W. (2015). Acidophilic actinomycetes from rhizosphere soil: Diversity and properties beneficial to plants. *Journal of Antibiotics*,68(2),p:106-114
- Prescott L.M., Harley J.P., and Klein D.A.(2007).Microbiologie. Edition De Boeck et Lacier.
- Pritchard D. (2005). Sourcing a chemical succession for cyclosporin from parasites and human pathogens. *Drug Discov.Today*, 10, p:688–691.

Q

- Qinyuan, Li., Xiu, Chen., Yi, Jiang., Chenglin, Jiang. (2016). Morphological Identification of Actinobacteria, Actinobacteria - Basics and Biotechnological Applications, Dharumadurai Dhanasekaran and Yi Jiang, IntechOpen

R

- Raja A., Prabakarana P. (2011). *Actinomycetes* and drug-an overview. *Am. J. Drug Discov. Develop*, 1, p: 75–84

S

- Salam N., Jiao J.Y., Zhang X.T., Li W.J. (2020). Update on the classification of higher ranks in the phylum Actinobacteria. *Int J Syst Evol Microbiol*, 70(2), p:1331-1355
- Salwan R., Sharma V. (2020). Molecular and biotechnological aspects of secondary metabolites in actinobacteria. *Microbiological Research*, 231, p:126-374
- Sanglier J., Haag H., Huck Ta. Et Fehr T. (1993). Novel bioactive compounds from actinomycetes: a short review (1988–1992). *Research in Microbiology* ,144 (8), p: 633-642.
- Saranya S., Sathivelu M., Sagarana G. (2022). Biocontrol mechanisms of endophytic microorganisms: Antimicrobial metabolites from endophytic microorganisms and its mode of action. In: Radhakrishnan EK., Kumar A., Aswani R. 75-88p
- Sapkota, A., Thapa A., Budhathoki A., Sainju M., Shrestha P., & Aryal, S. (2020). Isolation, Characterization, and Screening of Antimicrobial-Producing Actinomycetes from Soil Samples. *International Journal of Microbiology*, 2020, p :1–7
- Saunders A.P., OTTO R.H., SYLVESTER J.C. (1952). The production of vitamin B12 by various strains of actinomycetes. *J Bacteriol*, 64(5), P:725-8
- Sharma M., Dangi P., Choudhary M. (2014). Actinomycetes: Source, identification, and their applications. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* ,3(2), p:801-832
- Shrivastava L., Satyanarayana T. (2015). Thermophilic and alkaliphilic Actinobacteria: Biology and potential applications. *Frontiers in Microbiology* .,6,p:10-14
- Shrestha B., Nath D. K., Maharjan A., Poudel A., Pradhan R. N., Aryal, S. (2021). Isolation and Characterization of Potential Antibiotic-Producing Actinomycetes from Water and Soil Sediments of Different Regions of Nepal. *International journal of microbiology*
- Silini, S. (2012). Contribution à l'étude de la biodégradation de la méthyléthylcétone en réacteur batch par les actinomycètes isolés à partir des boues activées de la station d'épuration d'El-Atmania
- Singh R., Dubey A.K. (2018). Diversity and applications of endophytic actinobacteria of plants in special and other ecological niches. *Frontiers in Microbiology*, 9, p:17-67

- Song Z., Zhi X., Li W., Jiang H., Zhang C. and Dong H. (2009). Actinobacterial Diversity in Hot Springs in Tengchong (China), Kamchatka (Russia), and Nevada (USA). *Geomicrobiol J*, 26 ,p: 256–263
- Suhr K., Claverie J. M. (2003). Genomic correlates of hyperthermostability, an update. *J. Biol. Chem*, 278, p: 17198–17202.
- Suihko, M. L., Kroppenstedt, R. M., and Stackebrandt, E. (2006). Occurrence and characterization of actinobacteria and thermoactinomycetes isolated from pulp and board samples containing recycled fibres. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol*, 33, p:183–191
- Suzuki K., Yahara S., Maehata K., and Uyeda M. (2001). Isoaurostatin, a novel topoisomerase inhibitor produced by *Thermomonospora alba*. *J. Nat. Prod*, 64, p: 204–207
- Sapkota, A., Thapa A., Budhathoki A., Sainju M., Shrestha P., & Aryal, S. (2020). Isolation, Characterization, and Screening of Antimicrobial-Producing Actinomycetes from Soil Samples. *International Journal of Microbiology*, 2020, p :1–7.

T

- Tan H., Deng Z., Cao L. (2009). Isolation and characterization of actinomycetes from healthy goat faeces. *Lett Appl Microbio*, 49(2), p:248-253
- Tanaka Y., Murata A., Hayashida S. (1995). Accelerated composting of cereal shochu distillery wastes by actinomycetes: promotive composting of Shochu-distillery waster (I). *Seibutsu-kogaku Kais*, 73, p: 365–372
- Thajuddin N., Muralitharan G., Dhanasekaran D., Muhammad Ilyas M.H. (2005). Microbial symbionts of plants. In: *Plant Biology and Biotechnology* (Bahadur et al., Eds). Springer, India.
- Tian X. P., Tang S. K., Dong J. D., Zhang Y. Q., Xu L. H., Zhang S., et al. (2009). *Marinactinospora thermotolerans* gen. nov., sp. nov., a marine actinomycete isolated from a sediment in the northern South China Sea. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol*, 59, p:948–952
- Tortora G.J., Funke B.R., Case C.L., 2007. *Microbiology: An Introduction*. Pearson Benjamin Cummings. San Francisco, CA.

V

Référence

- Valverde A., Tuffin M., Cowan D. A. (2012). Biogeography of bacterial communities in hot Springs. a focus on the actinobacteria. *Extremophiles*,16,p:669–679
- Vieille C., Zeikus G. J. (2001). Hyperthermophilic enzymes: sources, uses, and molecular mechanisms for thermostability. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.*,65, p: 1– 46

W

- Waksman S.A., (1967). Distribution, isolation and methods of study. In: The actinomycetes a summary of current knowledge. *Ronald Press Company. New york*.p: 9-21.
- Winter R. T., Heuts D. P. H. M., Rijpkema E. M. A., van Bloois E., Wijma H. J., Fraaije M. W. (2012). Hot or not? Discovery and characterization of a thermostable alditol oxidase from *Acidothermus cellulolyticus* 11B. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 95,p:389–403
- Wu H., Lian Y., Liu B., Ren Y., Qin P., Huang F. (2014b). *Thermotunica guangxiensis* gen. nov., sp. nov., isolated from mushroom residue compost. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.*, 64,p: 1593–1599

Z

- Zarilla K. A., Perry J. J. (1984). *Thermoleophilum album* gen. nov. and sp. nov., a bacterium obligate for thermophily and n-alkane substrates. *Arch. Microbiol.*, 137,p: 286–290

ANNEXE 1

□ Le milieu de la Gélose actinomycete Isolation Agar (AIA)

- Sodium caseinate 2 g
- L-Asparagine 0.1g
- Sodium propionate 4 g
- Dipotassium phosphate 0.5 g
- Magnesium sulphate 0.1g
- Ferrous sulphate 0.001g
- Agar 15g
- pH 8.2

□ Le milieu de la Gélose à l'amidon et à la caséine (SCA)

- Amidon soluble 10g
- Caséine 0,3g
- K_2HPO_4 2 g
- KNO_3 2g
- $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0,05g
- $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 0,01g
- $CaCO_3$ 0,02g
- Agar 20g
- pH 7,2

Année universitaire : 2023-2024

**Présenté par : BERKANE Hadjer
BOUKABACHE Hibat allah
HANDAOUI Rayene**

La communauté des Actinobactéries dans les eaux thermales : « Un aperçu théorique »

Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Ecologie microbienne

Résumé

Les actinobactéries sont des bactéries filamenteuses à coloration de Gram positif, qui partagent les caractéristiques des bactéries et des champignons. Elles peuvent s'adapter à divers écosystèmes et sont omniprésentes dans les sols, les eaux douces et les milieux marins. De nombreux domaines ont mis en évidence le rôle important joué par les actinobactéries tels que les domaines industriel, médical et vétérinaire, ainsi que dans le domaine de l'agriculture et l'agro-alimentaire. Les actinobactéries se distinguent par leurs divers types, qui leur permettent de survivre dans des environnements hostiles. Parmi ces types on trouve les actinobactéries thermophiles, elles peuvent se développer à des températures comprises entre 40 et 80 C°, qui sont généralement des températures élevées pour la croissance et la survie des microorganismes. Elles prouvent leur capacité à s'adapter à des conditions extrêmes, en produisant des spores thermiques qui restent stables à des températures élevées pendant plusieurs jours. Ces bactéries ont été isolées exceptionnellement à partir des sources thermales, ce sont des réservoirs naturels d'eau thermale riche en minéraux et faible en matière organique, sa température peut varier de 20 à 100 C°, qui peuvent être classés en fonction de deux aspects principaux leur origine géologique et leur composition chimique, ainsi que leur température. Afin d'étudier les propriétés et les caractéristiques de ces bactéries, il est nécessaire de les isoler de l'eau thermale, ce qui passe par plusieurs étapes importantes, notamment l'échantillonnage, l'enrichissement, l'isolement et la purification.

Mots-clefs : *Actinobacteria*, Actinobactérie thermophile, Métabolites thermorésistantes, Eau thermale.

Laboratoires de recherche : laboratoire de (U Constantine 1 Frères Mentouri).

Président du jury : Pr BOUDEMAGH Allaouddine (Pr- U Constantine 1 Frères Mentouri).

Encadrant : Dr MEDJEMADJ Meissa (MA(B) - UFM Constantine 1).

Examineur(s) : Dr BOUFERCHA Oumeima (MA(B) - UFM Constantine 1).