

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE MICROBIOLOGIE & BIOCHIMIE

N°:



DOMAINE : SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE

FILIERE : SCIENCE BIOLOGIQUE

OPTION : MICROBIOLOGIE APPLIQUEE

Mémoire présenté pour l'obtention

Du diplôme de Master Académique

Par : CHERDOUD Aïcha

SELMI Amel - BOUKAF Khansa

Intitulé

*Etude bibliographique sur la production des antimicrobiens par
les actinomycètes thermophiles*

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. BENSEMANE LATIFA	MCB	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Rapporteur
Dr. BISSET SAGHIRA	MCA	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Président
Pr. MEDJEKAL SAMIR	Prof.	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Examinateur

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciements

Nous commençons ces mots de gratitude en remerciant Dieu tout-puissant qui nous a guidés et nous a donné les moyens de mener à bien cette étude.

Nous tenons également à remercier tous ceux qui ont soutenu nos efforts, nous entourant de leur soutien continu et de leur richesse unique de connaissances et d'expertise. Ils n'ont ménagé aucun effort pour partager leurs idées, croyant en la réussite de notre étude jusqu'à la fin.

Le Dr, BENSEMANE LATIFA, notre superviseur, a été d'une aide inestimable, nous apportant ses connaissances, ses conseils, sa patience, sa sagesse et une inspiration renouvelée. Nous adressons également nos sincères remerciements et notre gratitude au distingué comité de discussion, le Dr, BISSET SAGHIRA et le Pr, MEDJEKAL SAMIR, pour le temps et les efforts qu'ils ont consacrés à la lecture et à la révision de ce travail afin de l'enrichir et de l'améliorer. Nous les remercions pour leur patience et leur volonté de donner le meilleur d'eux-mêmes, et nous leur souhaitons le meilleur.

Nous adressons également nos remerciements les plus sincères à tous les professeurs éminents qui ont enrichi nos esprits et notre expérience éducative grâce à leur style d'enseignement sobre et à leur soutien académique continu. Nous exprimons notre profonde gratitude à nos camarades de la promotion 2025. Vous avez été de véritables partenaires dans les défis de cette modeste étude, et votre présence et votre soutien, direct ou indirect, ont contribué à sa réussite. Enfin, nous concluons ces mots en adressant nos remerciements les plus sincères à tous ceux qui ont semé des graines d'espoir et de soutien moral dans nos cœurs, nous ont souhaité la réussite, nous ont aidés et soutenus du fond du cœur.

Dédicaces

Nous dédions le fruit de ce travail acharné et de cette grande diligence à tous ceux qui ont marqué notre parcours d'une empreinte lumineuse, à tous ceux qui nous ont soutenus et qui nous ont été d'un grand secours.

Nous adressons nos remerciements les plus sincères à nos honorables parents. Vous êtes notre soutien, notre pilier que les tempêtes de la vie n'ébranlent pas, et notre port sûr où nous jetons l'ancre après chaque voyage. Vous êtes la force qui nous anime et l'ombre qui nous protège des épreuves. C'est vous qui nous avez appris le sens de la persévérance et de la patience.

À mes chers camarades qui ont partagé avec moi la réalisation de ce mémorandum, ainsi qu'à mes chers collègues du département, vous qui avez été notre meilleur soutien et compagnon dans le voyage de la connaissance et de l'apprentissage. Vous êtes la source de notre inspiration et de notre soutien académique, et chaque moment passé ensemble a été agréable et fructueux. Il ne s'agissait pas seulement d'une bourse, mais d'une véritable amitié et d'une collaboration fructueuse qui a enrichi notre parcours. Nous vous remercions pour tous ces moments précieux et inoubliables.

À nos éminents professeurs, vous avez été des phares de la connaissance et de l'orientation, ainsi que des torches qui éclairent les chemins de l'ignorance. Vous nous avez transmis votre amour du savoir, vous nous avez encouragés à donner et vous avez été les meilleurs modèles par votre engagement et votre dévouement. Les mots de remerciement ne vous rendent pas justice, et nous prions sincèrement pour que vous continuiez à donner et à briller.

Enfin, mes amis, je vous remercie pour votre invitation, vous qui avez partagé avec nous les plus beaux moments et les sentiments les plus sincères. Nous vous sommes reconnaissants pour les rires qui ont résonné dans les couloirs de nos journées et pour le soutien mutuel sans faille. Vous avez été nos meilleurs compagnons et vous avez fait partie intégrante de nos vies.

Sommaire

Résumé	i
Liste des abréviations	ii
Liste des figures.....	iii
Liste des tableaux	iv
Introduction	1
Chapitre I . Les actinomycètes	2
I.1. Les actinomycètes	2
I.1.1. Taxonomie des actinomycètes	2
I.1.2. La morphologie des actinomycètes	3
I.1.3. La Physiologie des actinomycètes	7
I.1.4. Distribution et fonction écologique des actinomycètes	8
I.1.5. Les métabolites secondaires des actinomycètes.....	11
I.1.6. Importance des actinomycètes en biotechnologie.....	13
Chapitre II . Les actinomycètes thermophiles	15
II.1. Les thermophiles.....	15
II.1.1. Leur habitat	16
II.1.2. Isolements et identification des thermophiles.....	17
II.1.3. Mécanismes d'adaptation à la thermophile	18
II.1.4. Les microorganismes thermophiles et hyperthermophiles	20
II.1.5. Applications des thermophiles en biotechnologie et industrie	21
II.1.6. Application pharmaceutique	23
II.2. Les actinomycètes thermophiles	23
II.2.1. Pourquoi les actinomycètes thermophiles ?.....	23
II.2.2. Les actinomycètes thermophiles.....	24
II.2.3. Applications en biotechnologiques.....	25

II.2.4. Importance des actinobactéries dans les sources thermales	26
Chapitre III . Les actinomycètes thermophiles producteurs d'antimicrobiennes	28
III.1. La résistance aux antimicrobiens	28
III.2. Les actinomycètes thermophiles antimicrobiens.....	28
III.2.1. Les activités antimicrobiennes des actinomycètes thermophiles	29
III.3. Les actinomycètes thermophiles productifs d'antimicrobiens en Algérie	30
Conclusion.....	32
Références Bibliographiques.	
Les Annex.	

ملخص

من بين مجموعة الكائنات الحية الدقيقة المتنوعة التي تنتج عوامل مضادة للميكروبات، تحتل الفطريات الشعاعية المحبة للحرارة مكانة بارزة. تُصنف هذه الكائنات الحية على أنها بكتيريا خيطية، وهي كائنات دقيقة قادرة على البقاء على قيد الحياة والتطور في البيئات ذات درجات الحرارة العالية. وكثيراً ما توجد في بيئات مثل التربة الحارة أو أكوام السماد العضوي أو الينابيع الساخنة. وأثبتت هذه الكائنات قدرة عالية على إنتاج مركبات نشطة بيولوجياً، لا سيما المضادات الحيوية التي تُستخدم لمكافحة البكتيريا والفطريات وأحياناً الفيروسات المسببة للأمراض. تتميز الفطريات الشعاعية المحبة للحرارة بتنوع أنشطتها البيولوجية. فهي تنتج مجموعة واسعة من المواد الفعالة، بما في ذلك الإنزيمات المحبة للحرارة والمضادات الحيوية والمركبات المضادة للأورام. كما أنها تساعد على تحسين خصوبة التربة عن طريق تحليل المواد العضوية المعقدة. تُستخدم هذه الكائنات الحية في مجموعة واسعة من التطبيقات، بما في ذلك في القطاع الطبي لتصميم عقاقير جديدة، وفي الزراعة كمبيدات حيوية طبيعية لمكافحة الأمراض النباتية، وفي صناعة التكنولوجيا الحيوية لإنتاج إنزيمات فعالة على النحو الأمثل في درجات الحرارة العالية.

الكلمات المفتاحية : محبة للحرارة _ فطريات شعاعية _ مضاد حيوي .

Abstract

Among the diversity of microorganisms producing antimicrobial agents, thermophilic actinomycetes occupy a prominent place. These organisms are classified as filamentous bacteria, which are micro-organisms capable of surviving and growing in high-temperature environments. They are frequently found in environments such as hot soils, compost heaps or hot springs. These organisms have proved highly capable of producing bioactive compounds, notably antibiotics, which are used to combat bacteria, fungi and sometimes even viruses. Thermophilic actinomycetes are characterized by the diversity of their biological activities. They produce a wide range of active substances, including thermophilic enzymes, antibiotics and antitumor compounds. In addition, their action contributes to improving soil fertility through the decomposition of complex organic matter. These organisms are used in a wide range of applications, including in the medical sector for the design of new drugs, in the agricultural sector as natural biocides to combat plant pathologies, and in the biotechnology industry for the production of enzymes that are optimally effective at high temperatures.

Keywords : thermophiles _actinomycetes _antibiotic .

Résumé

Parmi la diversité des micro-organismes producteurs d'agents antimicrobiens, les actinomycètes thermophiles occupent une place prépondérante. Ces organismes sont classés dans la catégorie des bactéries filamenteuses, qui sont des micro-organismes capables de subsister et de se développer dans des environnements à haute température. On les trouve fréquemment dans des milieux tels que les sols chauds, les tas de compost ou encore les sources chaudes. Ces organismes se sont révélés très capables de produire des composés bioactifs, notamment des antibiotiques, qui sont utilisés pour lutter contre les bactéries, les champignons et parfois même les virus pathogènes. Les actinomycètes thermophiles se caractérisent par la diversité de leurs activités biologiques. Ils sont producteurs d'une large gamme de substances actives, parmi lesquelles des enzymes thermophiles, des antibiotiques et des composés antitumoraux. En outre, leur action contribue à l'amélioration de la fertilité des sols par la décomposition de matières organiques complexes. Ces organismes sont employés dans de multiples applications, notamment dans le secteur médical pour la conception de nouveaux médicaments, dans le domaine agricole en tant que biocides naturels pour lutter contre les pathologies végétales, et dans l'industrie biotechnologique pour la production d'enzymes qui manifestent une efficacité optimale à des températures élevées.

Mots-clés : thermophiles _actinomycetes _antibiotique .

Liste des abréviations

°C : Degré Celsius

FAME: Fatty Acide Methyl Esters.

G+ : Gram positif.

MIS : Système d'Identification Microbienne.

PCR : Polymerase Chain Reaction.

PH : Potentiel Hydrogène.

Rep-PCR: Repetitive-element PCR.

TGY: Trypticase Glucose Yeast.

AIA: Acide Indole Acétique.

atm : atmosphère.

LCR : Réaction en chaîne de la ligase (LCR).

qPCR : PCR quantitative en temps réel .

ISP: The International Streptomyces Project .

Liste des figures

Figure 1. Coupe transversale d'une colonie d'actinobactéries avec des hyphes vivant.....	2
Figure 2. Micrographies électroniques à balayage de cellules de la souche EGI 6500322T (<i>Arthrobacter endophyticus sp</i>) (a-b) cultivées sur un milieu gélosé 1/2 ISP 2 à 30 °C.	3
Figure 3. Division cellulaire chez <i>Arthrobacter</i> , Micrographie électronique à transmission de la division cellulaire chez <i>Arthrobacter crystallopoietes</i> , illustrant la division par claquement et les groupes cellulaires en forme de V.	4
Figure 4. Cycle de croissance en milieu solide de <i>Streptomyces</i>	5
Figure 5. Couleur du mycélium aérien et du substrat ainsi que formation de pigments solubles chez certaines espèces de <i>Streptomyces</i>	6
Figure 6. Relation vis à vis de la température d'organismes psychrophiles, mésophiles, et de différents hypertherophiles	15
Figure 7. Photographies de sources chaudes sous la forme d'une piscine ou d'un bassin (A-C), d'un ruisseau (D), de boue chauffée (E-F) et d'un pot (G). Diverses couleurs de biomats et de sédiments pouvant former des sources chaudes (H-L).....	17

Liste des tableaux

Tableau 1. Répartition de quelques genres d'actinomycètes par type d'habitat	8
Tableau 2. Exemples des champignons thermophiles.....	20
Tableau 3. Exemples des algues et protozoaires thermophiles	21
Tableau 4. Exemples des bactéries et archéobactéries thermophile selon les catégories de Température	21
Tableau 5. Les application potentielle des thermophiles en biotechnologie.....	22
Tableau 6. Espèces d'actinobactéries provenant de diverses sources thermales	26
Tableau 7. Quelques Actinomycètes thermophiles producteurs d'antimicrobiens	30

Introduction

Introduction

Les maladies microbiennes connaissent une augmentation continue, ce qui en fait une menace majeure pour la santé publique. Actuellement, plus de 200 maladies sont transmises à l'homme par divers agents pathogènes, notamment les bactéries, les champignons, les virus, les prions, les rickettsies et les protozoaires (**Ganesan et al., 2017**).

L'émergence d'agents pathogènes résistants et multirésistants aux médicaments constitue l'un des défis les plus préoccupants, d'où la nécessité urgente de développer de nouveaux agents antimicrobiens dotés de mécanismes d'action innovants, en particulier à partir de sources naturelles (**Trenozhnikova et al., 2018**). Bien que les antibiotiques aient sauvé des millions de vies au cours des 70 dernières années, leur utilisation abusive a conduit à la sélection de micro-organismes résistants, faisant craindre un retour à l'ère pré-antibiotique (**Talbot et al., 2006**). Dans ce contexte, les actinomycètes apparaissent comme des micro-organismes prometteurs pour la production de composés bioactifs. Ils sont largement répandus dans divers environnements naturels tels que les sols, les eaux, les plantes, les grottes, les zones désertiques ou marines. Ils sont capables de synthétiser un large éventail de métabolites secondaires bioactifs : antibiotiques, enzymes, agents antitumoraux, antiviraux, inhibiteurs enzymatiques, pigments, biosurfactants, etc (**Selim et al., 2021**).

Les actinomycètes thermophiles, en particulier, présentent un intérêt considérable en raison de leur capacité à se développer à des températures élevées et à produire des enzymes thermostables telles que la Taq polymérase, l'amylase, la lipase, la protéase ainsi que des composés antimicrobiens. Ces biomolécules sont précieuses pour leurs applications biotechnologiques et industrielles (**Verma et al., 2015**). Cependant, le principal défi reste la capacité de ces micro-organismes à produire des composés stables et actifs dans des conditions de température extrême.

Compte tenu de l'augmentation rapide de la résistance aux antibiotiques existants, il devient crucial d'isoler de nouveaux composés bioactifs pour des usages thérapeutiques. Le développement d'agents antimicrobiens innovants est impératif, notamment parce que de nombreux agents pathogènes bactériens, fongiques ou viraux ne disposent pas encore de traitements réellement efficaces et sûrs (**Harwani, 2013**).

L'objectif de cette étude bibliographique est d'étudier l'activité antimicrobienne des actinomycètes thermophiles .

Chapitre I : Les actinomycètes

Chapitre I . Les actinomycètes

I.1. Les actinomycètes

Le terme « actinomycètes » dérive des mots grecs « aktis » ou « aktin » (lumière) et « mukes » (champignon) (**Rateb et al., 2018**).

Les actinomycètes sont des bactéries filamenteuses à Gram positif qui se caractérisent par un cycle de vie complexe (**Fig.1**). Elles appartiennent au phylum des *Actinobacteria*, qui constitue l'une des plus grandes unités taxonomiques du domaine des Bactéries (**Ventura et al., 2007**). Elles sont largement réparties dans les écosystèmes terrestres et aquatiques, en particulier dans les sols, où elles jouent un rôle essentiel dans le recyclage des biomatériaux réfractaires en décomposant des mélanges complexes de polymères issus de végétaux, d'animaux et de champignons morts.

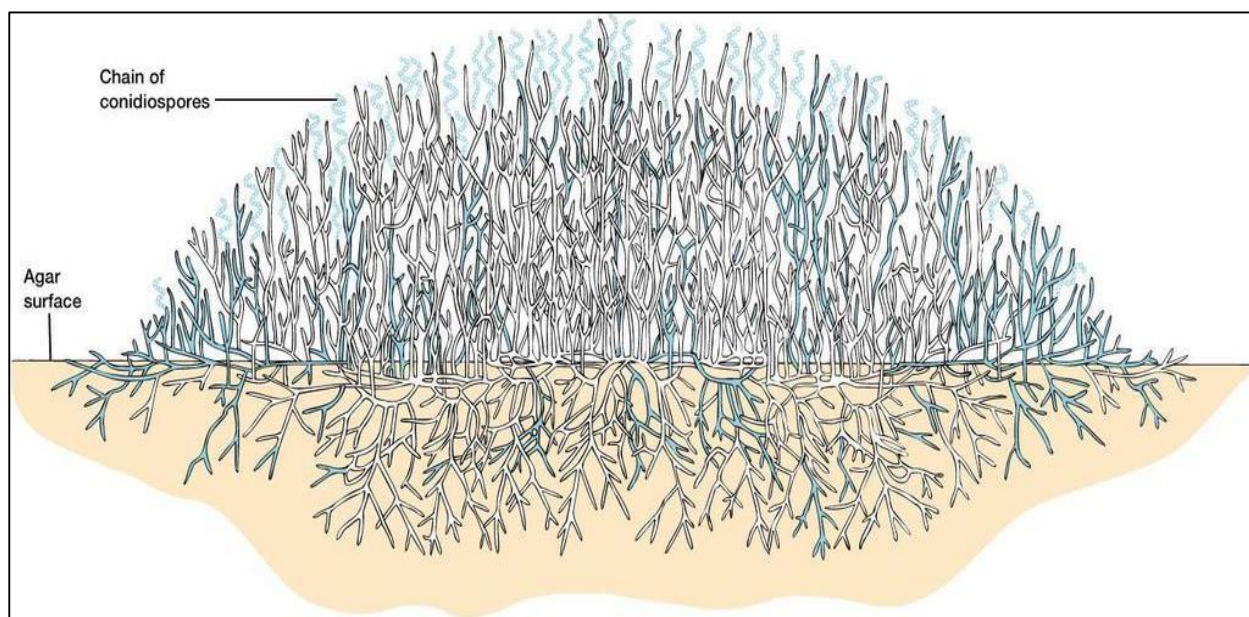


Figure 1. Coupe transversale d'une colonie d'*actinobactéries* avec des hyphes vivant (bleu et vert) et morts (blanc) montrant le mycélium végétatif et le mycélium aérien avec des chaînes de conidiospores (**Prescott et al., 2010**).

I.1.1. Taxonomie des actinomycètes

Les actinobactéries sont des bactéries Gram positif, connues pour avoir un génome fort riche en guanine et cytosine (G+C). Les actinobactéries représentent l'une des plus grandes unités taxonomiques parmi les 18 lignées majeures actuellement reconnues dans le domaine des bactéries (**Barka et al., 2016**).

D'après le Manuel de Bergey 2007, le phylum *Actinobacteria* comprend six classes, 23 ordres, 53 familles et 222 genres (**Ruan, 2013**). Les genres appartenant à ce phylum montrent une immense diversité morphologique, physiologique et métabolique.

I.1.2. La morphologie des actinomycètes

Les actinobactéries sont omniprésentes et constituent l'un des groupes de bactéries les plus diversifiés dans la nature. Ses membres vont des organismes anaérobies et unicellulaires aux lignées aérobies, filamenteuses et sporulées (**Lewin et al.,2016**).

I.1.2.1. Unicellulaires

Certaines actinobactéries vivent sous forme unicellulaire (*Micrococcus, Arthrobacter*).

Arthrobacter est un genre de bactéries appartenant aux *Actinobacteria*, Ce sont des bâtonnets aérobies, c'est-à-dire qu'ils ont une forme allongée, besoin d'oxygène pour vivre, il se caractérise par sa capacité à changer de forme au cours de leur cycle de vie (**Presscott et al., 2010**). (**Fig.2**).

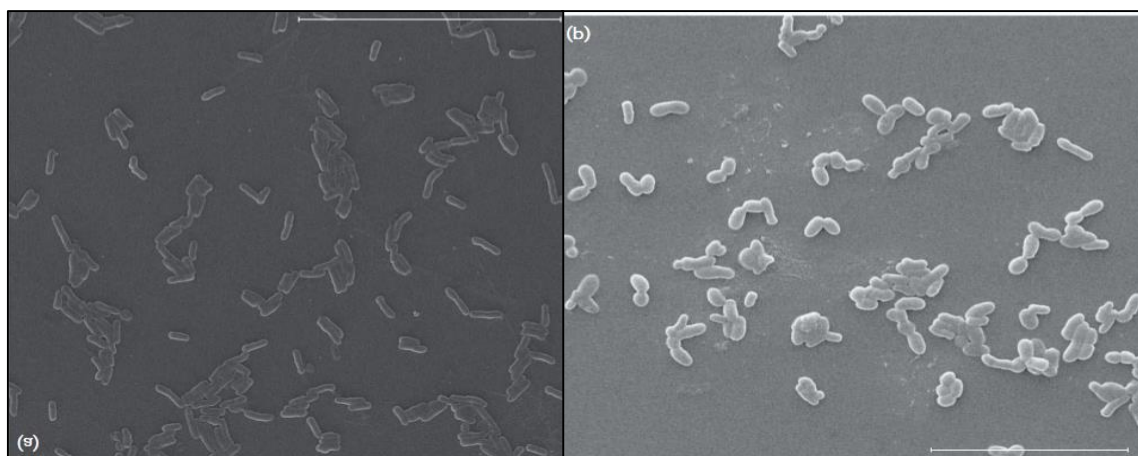


Figure 2.Micrographies électroniques à balayage de cellules de la souche EGI 6500322T (*Arthrobacter endophyticus sp*) (a-b) cultivées sur un milieu gélosé 1/2 ISP 2 à 30 °C.

(a) Morphologie des bâtonnets après 6 heures de culture. Barre, 20 mm.

(b) Morphologie transformée en forme coccoïde après 120 h de culture. Barre, 10 mm (**Wang et al.,2015**).

a) Phase de croissance exponentielle :

- La bactérie se développe rapidement.
- Les cellules ont la forme de bâtonnets irréguliers, parfois ramifiés.
- Elles se multiplient par un mécanisme particulier appelé division par cassure (au lieu de la division binaire classique) (**Fig. .3**).
- Cela signifie que les filaments peuvent se briser pour former de nouvelles cellules (**Presscott et al., 2010**).

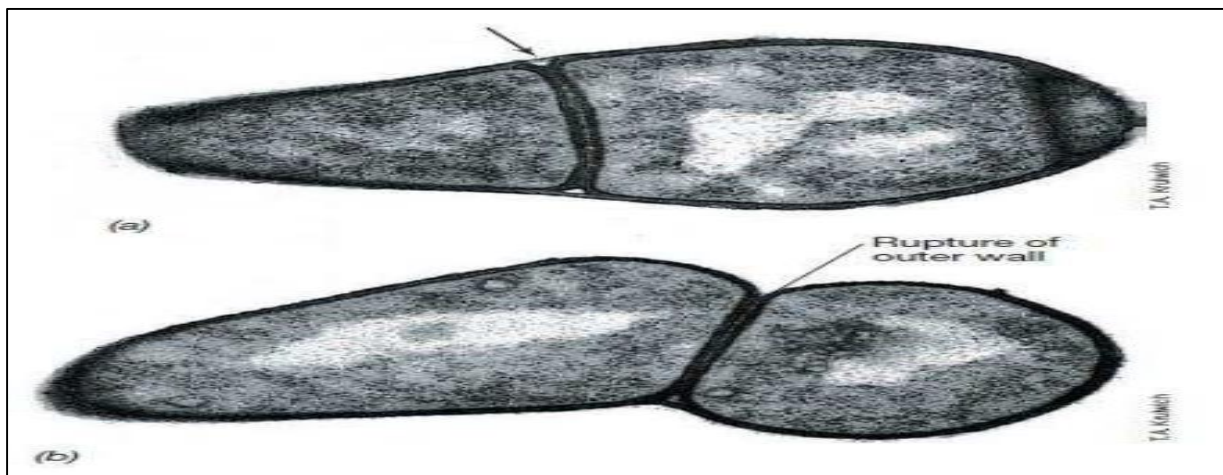


Figure 3. Division cellulaire chez *Arthrobacter* , Micrographie électronique à transmission de la division cellulaire chez *Arthrobacter crystallopoietes*, illustrant la division par claquement et les groupes cellulaires en forme de V.

(a) Avant la rupture de la couche externe de la paroi cellulaire (flèche).

(b) Après rupture de la couche externe d'un côté. Les cellules mesurent 0,9-1µm de diamètre (**Wang et al.,2015**).

b) Phase stationnaire :

Dans les conditions moins favorables Les cellules changent de forme et deviennent coccoïdes. Ce changement permet aux cellules de mieux résister à des conditions plus difficiles (manque de nutriments, stress environnemental, etc.) (**Presscott et al., 2010**).

I.1.2.2. Filamenteuses

D'autres actinobactéries, comme *Streptomyces*, produisent des mycéliums multicellulaires, comme les champignons, qui peut être végétatif ou aérien. (**Aouar,2006**).

Streptomyces bactéries aérobies, Gram-positif, non acido-résistantes, qui forment un substrat fortement ramifié et des mycéliums aériens, chimio-organotrophes, avec un métabolisme de type

oxydatif. Les hyphes végétatifs (0,5 à 2,0 μ m de diamètre) se fragmentent rarement. Le mycélium aérien forme des chaînes de trois à plusieurs spores à maturité. Certaines espèces présentent de courtes chaînes de spores sur le substrat mycélien, tandis que d'autres forment des sclérotés, des structures pycnidiennes, sporanges et synnémata. Les spores sont immobiles. Les colonies sont discrètes et lichénoïdes, coriaces ou butyreuses. Souvent, les colonies présentent initialement une surface lisse, mais développent ensuite une trame de mycélium aérien qui peut apparaître floconneuse, granuleuse, poudreuse ou veloutée (Kämpfer, 2015) (Fig.4).

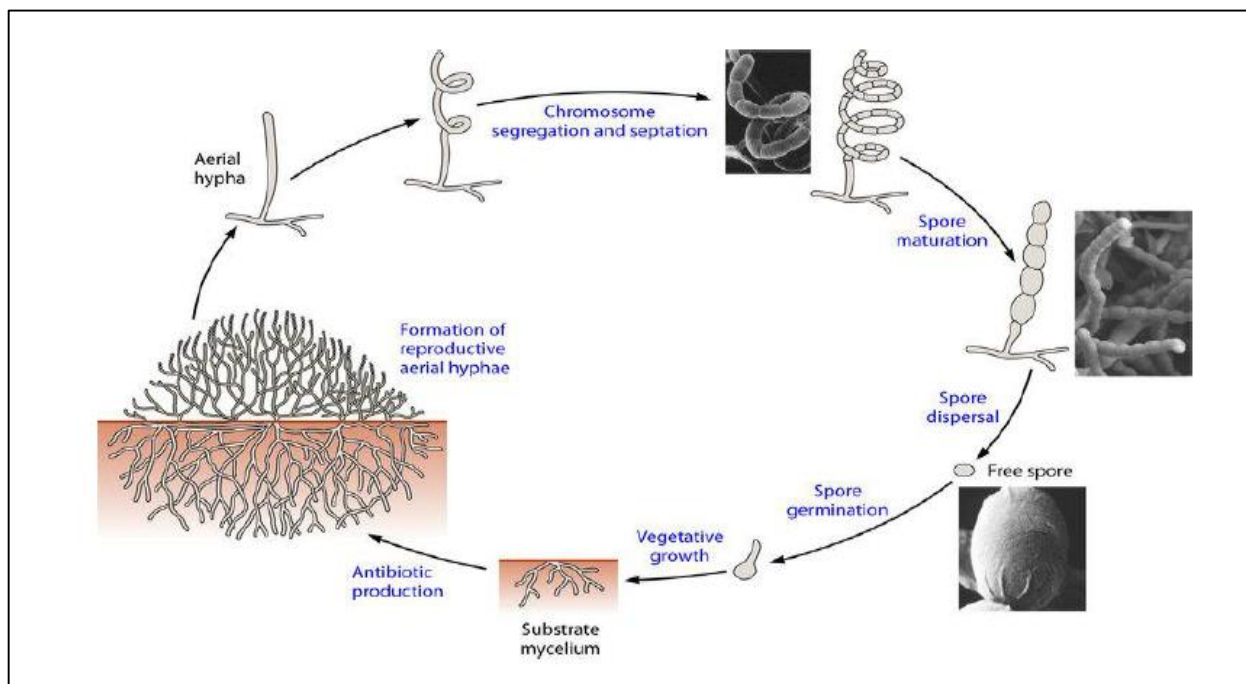


Figure 4. Cycle de croissance en milieu solide de *Streptomyces* (Barka *et al.*, 2016).

Peut produire une grande variété de pigments responsables de la couleur des mycéliums végétatifs et aériens (Fig.5). Des pigments colorés diffusibles peuvent également être formés. De nombreuses souches sont capables de produire une ou plusieurs substances antibiotiques (Wink *et al.*, 2017).

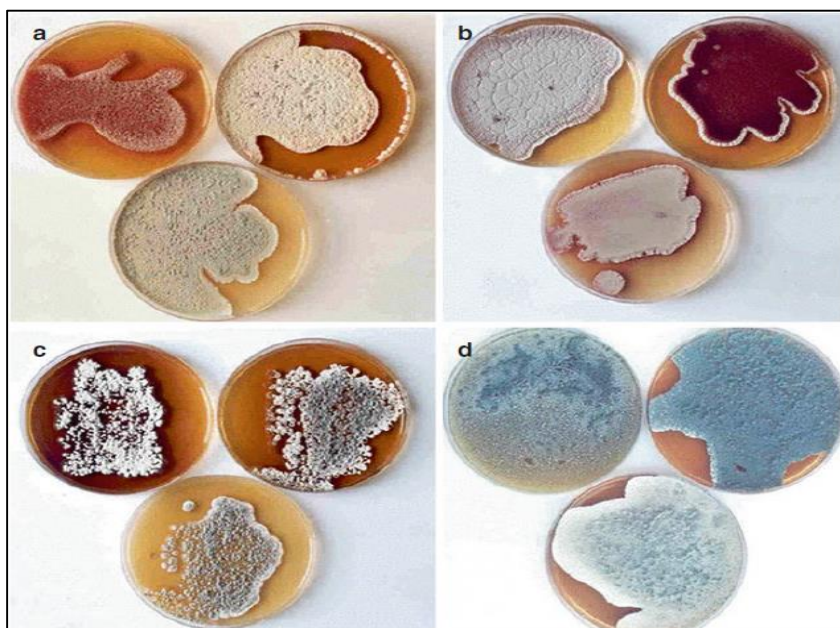


Figure 5. Couleur du mycélium aérien et du substrat ainsi que formation de pigments solubles chez certaines espèces de Streptomyces. Les souches sont cultivées sur le milieu GYM (en haut à gauche), ISP 2 (en haut à droite) et ISP 3 (en bas) pendant 14 jours à 28°C. **(a)** *Streptomyces bellus*, **(b)** *S. californicus*, **(c)** *S. aurantiogriseus*, **(d)** *S. pharetrae* (Wink et al., 2017).

Catalase positive. Réduisent généralement les nitrates en nitrites et dégradent les substrats polymères tels que la caséine, la gélatine, l'hypoxanthine et l'amidon, ainsi que l'adénine et la L-tyrosine (Kämpfer, 2015).

La plupart des espèces utilisent une large gamme de composés organiques comme seules sources de carbone pour leur énergie et leur croissance. La température optimale pour la plupart des espèces se situe entre 25 et 35 °C ; certaines espèces, cependant, peuvent se développer à des températures comprises entre les plages psychrophile et thermophile ; le pH optimal pour la croissance est compris entre 6,5 et 8. Le peptidoglycane de la paroi cellulaire contient des quantités importantes de LL-A 2 pm. Dans certains cas, de faibles quantités de méso-A 2 pm peuvent être détectées. Elles sont dépourvues d'acides mycoliques, contiennent des quantités importantes d'acides gras saturés, iso- et anté-iso-, et possèdent généralement des ménaquinones hexa- ou octahydrogénées, dont l'isoprénologue prédominant est à neuf unités isoprènes, bien que l'on trouve également des ménaquinones à huit et dix unités isoprènes. On observe un profil lipidique polaire complexe, contenant généralement du diphosphatidylglycérol, de la phosphatidyléthanolamine, du phosphatidylinositol et des mannosides de phosphatidylinositol (Kämpfer, 2015).

I.1.3. La Physiologie des actinomycètes

Le développement des actinomycètes est fortement influencé par divers paramètres physiologiques, notamment la disponibilité en oxygène, le pH du milieu, la température, l'activité de l'eau, ainsi que d'autres facteurs environnementaux (Avril *et al.*, 1992).

I.1.3.1. 1. L'oxygène

L'oxygène est un facteur clé pour la croissance, les actinomycètes sont des bactéries dont le métabolisme peut varier selon leur besoin en oxygène. On peut les classer en deux grands groupes selon leur type de respiration (Avril *et al.*, 1992) :

a) Oxydatives aérobies :

Ces types d'actinomycètes ont besoin d'oxygène pour vivre, Elles utilisent une respiration aérobie, ce qui leur permet une production d'énergie plus efficace comme le genre *Streptomyces*, ces bactéries sont très abondantes dans la nature, en particulier dans les sols, où elles Jouent un rôle majeur dans la décomposition de la matière organique. Elles sont aussi connues pour produire des antibiotiques naturels (Avril *et al.*, 1992).

b) fermentatives anaérobies :

Ces types d'actinomycètes ne nécessitent pas d'oxygène pour survivre, elles utilisent un métabolisme fermentatif comme le genre *Actinomyces*, ce genre sont des commensales obligatoires, c'est-à-dire qu'elles vivent de façon naturelle dans certaines parties du corps sans causer de maladie (sauf si déséquilibre). On les trouve dans les cavités naturelles du corps humain et des animaux (comme la bouche, le tube digestif, etc.). Elles font partie de la flore de Veillon, un ensemble de micro-organismes vivant dans la cavité buccale (Avril *et al.*, 1992).

I.1.3.2. 2. La température

La température est un facteur essentiel de croissance influence fortement la vitesse de croissance et l'activité métabolique des actinomycètes, comme pour la majorité des micro-organismes (Rangaswami *et al.*, 2004).

Pour la plupart des actinomycètes, la température idéale de croissance se situe entre 25°C et 30°C, c'est dans cette plage que leur activité est maximale, notamment la production d'enzymes et, pour certains, d'antibiotiques (Rangaswami *et al.*, 2004).

Certaines espèces d'actinomycètes préfèrent vivre à des Températures élevées, Ces espèces peuvent croître à des températures allant de 55°C à 65°C, On les trouve souvent dans des

environnements chauds comme les composts, les sources Chaudes, ou des sols exposés au soleil (Rangaswami et al., 2004).

I.1.4. Distribution et fonction écologique des actinomycètes

Les actinomycètes sont largement répandus dans les écosystèmes naturels tels que le sol, la rhizosphère, les plantes actinomycorhiziennes, les sols hypersalins, le calcaire, l'eau douce, la mer, les éponges, les grottes volcaniques, les points chauds, le désert, l'air, les intestins d'insectes, les turricules de vers de terre, les excréments de chèvres et les actinomycètes endophytes (Tab.1).

Tableau 1. Répartition de quelques genres d'actinomycètes par type d'habitat (Goodfellow et Williams, 1983).

Genre	Habitats
<i>Actinomadura, Microbispora, Streptosporangium</i>	Sol
<i>Actinoplanes, Streptomyces</i>	Sol, eau, litière
<i>Frankia</i>	Nodules de racines
<i>Micromonospora, Nocardia</i>	Sol, eau
<i>Rhodococcus</i>	Sol, eau, fumier, litière
<i>Saccharomonospora</i>	Matière en décomposition
<i>Thermomonospora</i>	Matière en décomposition et fermentation

Les caractéristiques les plus importantes des composés bioactifs microbiens sont qu'ils ont des producteurs microbiens spécifiques : leurs diverses bio activités et leurs structures chimiques uniques. Les actinomycètes représentent une source de métabolites secondaires biologiquement actifs tels que les antibiotiques, les agents biopesticides, les hormones de croissance végétale, les composés antitumoraux, les agents antiviraux, les composés pharmacologiques, les pigments, les enzymes, les inhibiteurs d'enzymes, les composés anti-inflammatoires, les aliments protéiques unicellulaires et les biosurfactants (Selim et al., 2021)

Ils jouent un rôle majeur dans le cycle de la matière organique, inhibent la croissance de plusieurs pathogènes végétaux dans la rhizosphère et décomposent des mélanges complexes de

polymères dans les matières végétales, animales et fongiques mortes, ce qui entraîne la production de nombreuses enzymes extracellulaires qui favorisent la production végétale. Les actinomycètes se distinguent par leur contribution majeure au tamponnage biologique des sols, au contrôle biologique des environnements pédologiques par la fixation de l'azote et à la dégradation des composés de poids moléculaire élevé tels que les hydrocarbures dans les sols pollués. En outre, ils sont connus pour améliorer la disponibilité des nutriments et des minéraux, augmenter la production de métabolites et promouvoir les régulateurs de croissance des plantes. En outre, les actinobactéries ne contaminent pas l'environnement, mais contribuent à améliorer durablement la santé des sols en formant et en stabilisant les tas de compost, en formant un humus stable et en se combinant avec d'autres micro-organismes du sol pour décomposer les résidus végétaux coriaces tels que la cellulose et les résidus animaux afin de maintenir l'équilibre biotique du sol en coopérant avec le cycle des nutriments (**Bhatti et al.,2017**).

I.1.4.1. Les Actinomycètes dans les déserts

Les déserts couvrent environ un cinquième de la surface de la Terre (**Varma et al.,2014**). Les déserts sont incroyablement arides (précipitations annuelles moyennes inférieures à 25 cm) et présentent une large gamme de températures et de conditions météorologiques avec un faible niveau de nutriments, ce qui rend difficile la survie de la plupart des organismes (**Makhalanyane et al.,2015**). Bien que l'impression générale que l'on a d'un désert soit celle d'une étendue de terre chaude et vide, certains déserts sont froids tout au long de l'année. Ils peuvent être classés en quatre catégories : subtropicaux, froids, côtiers et semi-arides (**Logan,1968**). Bien que les déserts aient été autrefois considérés comme sans vie en raison de leur environnement extrême, des études récentes ont prouvé que cette perception était erronée. Une large gamme d'actinobactéries est cultivable dans ces endroits. Pour survivre dans un environnement aussi hostile, les formes vivantes, y compris les bactéries, doivent disposer de mécanismes de survie uniques pour s'adapter à l'environnement extrême. Elles ont donc tendance à produire divers métabolites secondaires intéressants qui les aident à survivre.

De nombreuses études ont été menées pour étudier les actinobactéries isolées des déserts et analyser leur potentiel bioactif. Les abenquines sont de nouveaux métabolites bioactifs découverts par (**Schulz et al.,2011**). La souche DB634 de *Streptomyces sp.* A été isolée du sol du Salar de Tara, dans le désert d'Atacama, au Chili. Ce dernier est connu pour être l'un des endroits les plus secs de la planète, avec des précipitations annuelles moyennes d'environ 15 mm ; chaque mètre carré ne reçoit que 15 mm d'eau par an (**Doran et al.,2000**). Il présente également le niveau de rayonnement ultraviolet le plus élevé de la planète. Pour les raisons susmentionnées,

son sol a été comparé à celui de Mars. Dans cette étude, quatre abenquines (A–D) ont ensuite été isolées du bouillon de fermentation de la souche DB634 de *Streptomyces sp.* Et se sont révélées structurellement apparentées aux aminobenzoquinones.

D'autres études ont révélé que les benzoquinones possèdent des propriétés antioxydantes et anticancéreuses en plus d'effets anti-inflammatoires (**Dandawate et al.,2010**).

Quatre types de polycétides de type ansamycine, les chaxamycines A–D, ont été identifiés à partir de la souche C34 de *Streptomyces sp.* Isolée du Salar de Tara, dans le sol d'Atacama. L'ansamycine est un antibiotique lipophile qui possède une activité antitumorale. Elle exerce son activité en inhibant sélectivement la protéine de choc thermique (Hsp90) en interrompant son activité ATPase, ce qui induit la mort des cellules tumorales. Son action sélective contre Hsp90 conduit également à la dégradation de protéines essentielles à la survie des cellules cancéreuses (**Hostein et al.,2001**). De plus, l'augmentation des bactéries résistantes aux antibiotiques a poussé les scientifiques à rechercher de nouveaux antibiotiques. Ainsi, les propriétés antimicrobiennes des chaxamycines A–D ont été évaluées avec *Staphylococcus aureus* et *Escherichia coli* par la méthode de diffusion en gélose. La chaxamycine D a montré une activité antibactérienne sélectivement élevée contre *S. aureus* résistant à la méthicilline (SARM) et *S. aureus* sensible à la méthicilline (SASM), la majorité avec des valeurs de CMI inférieures à 1,21 µg/mL (**Rateb et al.,2011**). Cette étude illustre que les actinobactéries isolées des déserts constituent des ressources prometteuses en bioprospection pour de nouveaux antibiotiques et médicaments contre le cancer (**Nithya et al.,2018**). ont évalué l'activité antimicrobienne de 134 isolats d'actinobactéries prélevés dans le désert d'Arabie saoudite. Parmi ces isolats, l'extrait à l'acétate d'éthyle de *Streptomyces sp.* DA3-7 a démontré un effet antagoniste à large spectre sur divers agents pathogènes, notamment *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Klebsiella pneumoniae*, *Enterococcus faecalis*, *Escherichia coli*, *Proteus vulgaris* et *Salmonella typhimurium*, ainsi que sur les champignons *Candida albicans*, *Cryptococcus neoformans* et *Saccharomyces cerevisiae*. Il est probable que *Streptomyces sp.* DA3-7 soit une bactérie thermotolérante car elle est capable de tolérer des maximas à 40 °C. Il a été établi que les microbes thermotolérants atteignent une croissance optimale à 40 °C (**Noreen et al.,2019**). De plus, l'extrait a également montré une activité cytotoxique contre la lignée cellulaire d'adénocarcinome du sein MCF-7 (CI50 = 85 µg/mL). Le composé actif, la pyridine-2,5-diacétamide, a été isolé de l'extrait brut, et il a été constaté que les valeurs de CMI de la pyridine-2,5-diacétamide étaient les plus faibles contre *E. coli* et *C. neoformans* (tous deux 31,25 µg/mL),

ce qui est inférieur à celui des médicaments thérapeutiques standard kétoconazole (50 µg/mL) et streptomycine (10 µg/disque), respectivement (Nithya et al.,2018).

I.1.4.2. Les actinobactéries dans les sédiments des grands fonds

La recherche sur la diversité des actinobactéries des grands fonds marins est limitée, ce qui est souvent dû à la difficulté d'échantillonnage. Grâce aux avancées technologiques, des espèces uniques sont mises au jour (Mestre et al.,2014).

Dix-huit actinobactéries marines ont été isolées d'eau de mer, de coraux et d'échinodermes dans le canyon d'Avilés, en Espagne. Les échantillons ont été prélevés à une profondeur de 1 500 à 4 700 m. Le séquençage de l'ARNr 16S a permis de déterminer qu'elles appartenaient principalement au genre *Streptomyces*, les autres étant *Pseudonocardia*, *Micromonospora* et *Myceligenans* (Sarmiento et al.,2017). Des tests cytotoxiques ont également été réalisés sur des extraits à l'acétate d'éthyle des souches contre HeLa, une lignée cellulaire mammaire, et HCT116, une lignée cellulaire tumorale du côlon humain. Les extraits des deux souches *Streptomyces cyaneofuscatus* M-157 et M-192 ont montré la plus forte activité cytotoxique contre les cellules cancéreuses.

Plus encore, les deux extraits étaient toujours actifs même après dilution à 1:100. *Streptomyces xiamenensis* M186 et *S. cyaneofuscatus* M190 étaient également capables de produire du β-élémane, un composé qui a été utilisé pour traiter cliniquement le cancer du cerveau et du sein (Li et al.,2013). L'analyse du profilage des métabolites a montré que trois composés, la cosmomycine, la daunomycine et la galtamycine, qui possèdent une activité antitumorale, ont été détectés dans l'extrait d'acétate d'éthyle de *S. cyaneofuscatus* M192 (Sarmiento-Vizcaíno et al.,2017). En outre, des tests d'antibiotiques avec des extraits d'acétate d'éthyle de différentes souches ont également montré une puissante activité antibactérienne contre un large éventail d'agents pathogènes et de champignons tels que *Escherichia coli* Gram négatif, *Micrococcus luteus* et *Saccharomyces cerevisiae*.

I.1.5. Les métabolites secondaires des actinomycètes

Les actinomycètes jouent également un rôle majeur dans la biodégradation des sols et la formation de l'humus, en recyclant les nutriments associés à des polymères récalcitrants tels que la chitine, la kératine et les lignocelluloses (Stach et Bull, 2005).

De plus, les actinomycètes présentent des propriétés physiologiques et métaboliques variées, notamment par la production d'enzymes extracellulaires (Schtroumpf, 2001).

Cette activité métabolique aboutit à la production de plusieurs substances volatiles, dont la géosmine, est un terpène produit par des microbes du sol tels que *Streptomyces* spp. Est responsable de l'odeur de terre et de pétrole associée aux pluies fraîches sur un sol sec. La géosmine est également présente dans les champignons, les amibes et certaines plantes, dans les écosystèmes terrestres et aquatiques. L'homme est très sensible à la géosmine, qu'il détecte à de très faibles concentrations sans risque de toxicité. Les raisons de cette sensibilité sont encore inconnues (**Young, 2025**).

Il est rapporté que les métabolites secondaires bioactifs produits par les micro-organismes s'élèvent à environ 23 000, dont 10 000 sont issus des actinomycètes, ce qui représente 45 % de tous les métabolites microbiens bioactifs découverts (**Berdy, 2005**).

Parmi ceux-ci, environ 7 600 composés sont produits par des espèces du genre *Streptomyces* (**Berdy, 2005**). Plusieurs de ces métabolites secondaires possèdent une activité antibiotique puissante, ce qui confère aux *streptomycètes* le statut de principaux producteurs d'antibiotiques exploités par l'industrie pharmaceutique (**Berdy, 2005**).

Le développement rapide de résistances à de multiples agents chimiothérapeutiques, ainsi que leurs effets secondaires indésirables, ont accru la demande de nouveaux agents antitumoraux plus efficaces et mieux tolérés, notamment pour le traitement de tumeurs jusqu'ici intraitables (**Demain et Sanchez, 2009**).

Les membres des actinomycètes sont également producteurs de médicaments antitumoraux cliniquement utiles, tels que les anthracyclines (acliarubicine, daunomycine, doxorubicine), les peptides (bléomycine, actinomycine D), les acides auréoliques (mithramycine), les énédiynes (néocarzinostatine), les antimétabolites (pentostatine), le carzinophiline, les mitomycines, etc. (**Newman et Cragg, 2007**).

Des progrès significatifs ont été accomplis récemment dans la découverte de nouveaux médicaments issus des actinomycètes, grâce à l'utilisation de techniques de fermentation et de criblage à haut débit, à la biosynthèse combinatoire ainsi qu'à l'exploitation des génomes pour identifier des voies cryptiques susceptibles de générer de nouveaux métabolites secondaires apparentés à des pharmacophores existants (**Baltz, 2008**).

La découverte de nouveaux taxons d'actinomycètes ayant une activité métabolique unique à partir d'échantillons prélevés en eaux profondes, ainsi que de nouveaux composés présentant la plus grande diversité biogénique et métabolique et les activités biologiques les plus importantes, montre clairement que les actinomycètes indigènes des eaux profondes existent bel et bien dans

les océans et qu'ils constituent une source importante de nouveaux métabolites secondaires. D'autres fonctions des actinobactéries des grands fonds sont également intéressantes, comme la dégradation du pétrole et la production de biosurfactants (Wang et al., 2014). Il convient de noter que l'absence de prétraitement thermique, la méthode de séchage et de tamponnage et l'incubation à basse température ont été plus productives pour l'isolement des actinomycètes à partir de certains échantillons d'eaux profondes. Avec le développement de techniques indépendantes de la culture, une stratégie plus productive d'isolement des souches guidée par la distribution des actinomycètes d'eaux profondes ou le clonage direct et l'expression hétérologue des gènes fonctionnels pourrait être envisagée (Kamjam et al., 2017).

I.1.6. Importance des actinomycètes en biotechnologie

Les actinomycètes jouent des rôles cruciaux dans le sol et dans leurs interactions avec les plantes, ainsi que pour la production de nombreux métabolites ayant un intérêt biotechnologique (Conn, 2005). Selon une estimation, sur les 16500 antibiotiques identifiés, 8700 d'entre eux (soit 53%) sont produits par les actinomycètes, dont 6550 (40%) proviennent de l'espèce *Streptomyces* (Choulet, 2006). Outre la synthèse d'antibiotiques, les actinomycètes génèrent un vaste éventail d'autres métabolites secondaires possédant diverses fonctions, comme des inhibiteurs enzymatiques, des immunosuppresseurs, des toxines et des pesticides (Dairi, 2005 ; Pizzul, 2006).

I.1.6.1. Production d'enzymes

Les actinomycètes ont la capacité de produire certaines enzymes d'intérêt industriel, comme les chitinases, glucanases, peroxydases et glutaminases (Divya et al., 2013). Certaines espèces de *Streptomyces* sont également capables de produire des amylases, cellulases et hémi-cellulases. Cependant, l'espèce *Streptosporangium sp.* Extraite des feuilles de maïs produit des gluco-amylases utilisées industriellement pour la décomposition de l'amidon, tandis que d'autres ont la capacité de décomposer la lignine. Certaines souches d'actinomycètes produisent également des lipases, enzymes qui catalysent l'hydrolyse des triglycérides en diglycérides, monoglycérides, glycérol et acides gras (Hasegawa et al., 2006).

I.1.6.2. Production des antibiotiques

Les microorganismes du sol produisent une multitude de substances antimicrobiennes, environ 23000 métabolites secondaires bioactifs, qui ont un rôle antagoniste significatif. Entre autres, les actinobactéries produisent 45% de ces substances sous forme de 10 000 métabolites secondaires. Selon (Valli et al., 2012), les espèces appartenant au genre *Stréptomyces* génèrent près de 7600

métabolites bioactifs, dont la majorité sont des antibiotiques utilisés par l'industrie pharmaceutique. Les actinomycètes sont également capables de synthétiser divers produits tels que l'acide indole acétique (AIA) et les sidérophores. Ils ont même la capacité de solubiliser le phosphore présent dans le sol (**Ben Ameer et al., 2009**).

Chapitre II : Les actinomycètes thermophiles

Chapitre II . Les actinomycètes thermophiles

II.1. Les thermophiles

La température est le facteur environnemental le plus important qui affecte l'existence et la croissance des microbes (Yanmis *et al.*, 2014).

Les micro-organismes sont regroupés en quatre catégories : psychrophiles, mésophiles, thermophiles et hyperthermophiles, en fonction des intervalles de croissance températures des micro-organismes (Fig.6) (Yanmis *et al.*, 2015).

- Les psychrophiles vivent entre 0 et 12°C.
- Les mésophiles entre 25 et 40°C.
- Les thermophiles entre 45 et 80°C.
- Les hyperthermophiles entre 90 et 115°C.

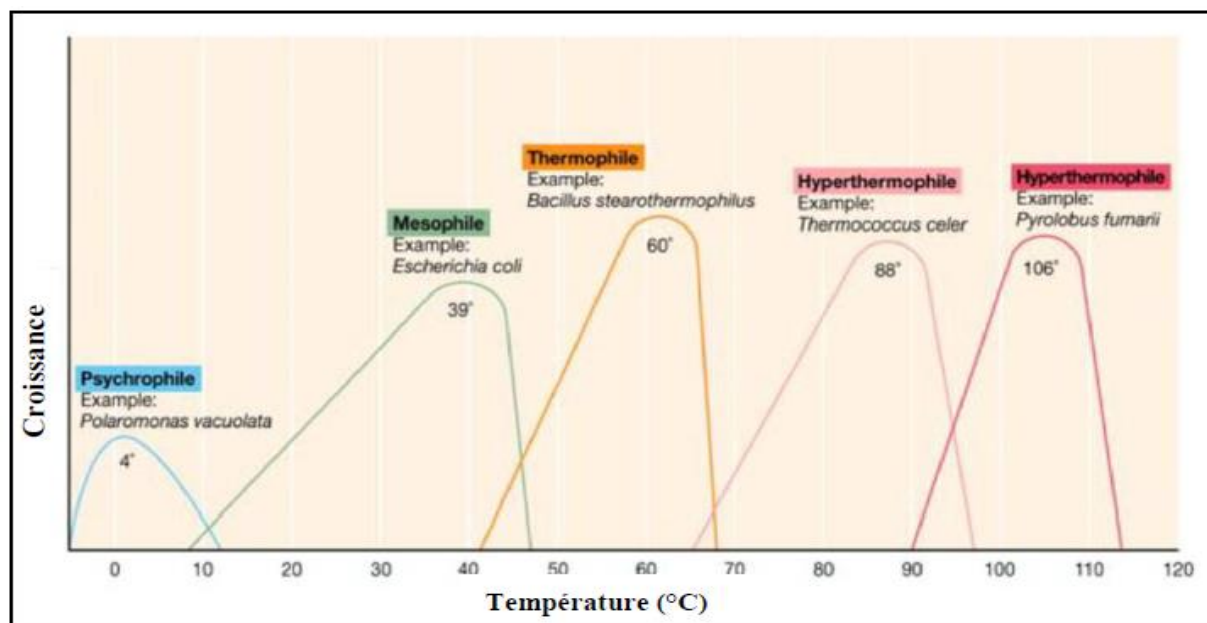


Figure 6. Relation vis à vis de la température d'organismes psychrophiles, mésophiles, et de différents hyperthermophiles . Les températures optimales des différents organismes cités en exemple sont indiquées sur les courbes. Les hyperthermophiles ont des températures optimales supérieures à 80°C (Madigan et Martinko, 2007).

Les microorganismes thermophiles et hyperthermophiles sont capables de se développer et de survivre dans des milieux à températures élevées (Sarmiento *et al.*, 2015).

Karl Stetter a formulé une définition plus étendue et pragmatique, affirmant que les organismes thermophiles sont des entités capables de se reproduire à des températures dépassant 45°C (Stetter,1996).

Cette définition est captivante puisqu'elle détermine quatre sous-ensembles parmi les thermophiles :

- **Les thermophiles modérés**, dont les conditions optimales de croissance se situent entre 55 et 65°C.
- **Les thermophiles extrêmes**, dont la température optimale de croissance est comprise Entre 65 et 80°C.
- **Hyperthermophiles** : la température de croissance optimale est supérieure à 80°C.
- **Hyperthermophiles extrêmes** : leurs températures de croissance optimale sont supérieures ou égale à 115°C (**Stetter, 1996**).

II.1.1. Leur habitat

Les micro-organismes thermophiles et hyperthermophiles se trouvent principalement dans des environnements chauds. La température optimale de croissance des micro-organismes thermophiles est normalement supérieure à 55°C, tandis que celle des micro-organismes hyperthermophiles est supérieure à 80°C (**Satyanarayana et al., 2005**).

Les biotopes naturels où l'on trouve des micro-organismes thermophiles sont répartis dans le monde entier. Il s'agit d'habitats à température relativement élevée, par rapport à ceux qui sont anthropogéniques ou créés par l'homme. Ils peuvent être d'origine terrestre ou marine. Les plus remarquables d'entre eux, qui abritent une grande variété de micro-organismes thermophiles, sont les zones géothermiques et volcaniques terrestres et les cheminées hydrothermales en eaux profondes (cheminées hydrothermales sous-marines). La plupart des thermophiles et hyperthermophiles extrêmes actuellement connus ont été découverts dans ces régions par des approches dépendantes ou indépendantes de la culture. Les zones géothermiques et volcaniques comprennent les fumerolles terrestres (par exemple, les solfatares), les sources chaudes terrestres et les geysers. D'autres biotopes naturels comprennent les réservoirs de pétrole et d'huile chauffés géo-thermiquement et les sols/sédiments chauffés par le soleil (**Satyanarayana et al., 2013**).



Figure 7. Photographies de sources chaudes sous la forme d'une piscine ou d'un bassin (A-C), d'un ruisseau (D), de boue chauffée (E-F) et d'un pot (G). Diverses couleurs de biomats et de sédiments pouvant former des sources chaudes (H-L) (Urbieta *et al.*,2015).

II.1.2. Isolements et identification des thermophiles

Les zones géothermiques, les terres thermales, les déserts et les environnements volcaniques sont les principales sources d'isolement de nouvelles espèces de thermophiles (Khiyami *et al.*,2012). Lors de la première étape des études d'isolement, d'identification et de caractérisation de tous les micro-organismes, des méthodes conventionnelles basées sur des caractéristiques phénotypiques (morphologiques, physiologiques, biochimiques) doivent être utilisées (Gulluce *et al.*,2014). D'autre part, l'utilisation de ces méthodes seules est insuffisante et peu fiable pour classer et différencier les isolats au niveau des espèces et des sous-espèces et pour déterminer les relations évolutives (Gilbert *et al.* ,2009 ; Khiyami *et al.*,2012). Cependant, les techniques moléculaires peuvent être plus fiables en termes d'identification de la diversité des écosystèmes, révélant les relations phylogénétiques entre les souches et distinguant les micro-organismes génétiquement proches les uns des autres. La méthode d'empreinte génomique telle que la rep-PCR, la PCR spécifique telle que la PCR pour la région de l'ARNr 16S et le système d'identification microbienne (MIS) utilisant l'analyse des esters méthyliques d'acides gras (FAME) sont les techniques moléculaires les plus couramment utilisées et fournissent des

données inestimables pour la détermination de la biodiversité microbienne (**Mosivand et al.,2009 ; Adiguzel et al.,2014**).

Les résultats de ces études montrent que, normalement, seuls 1 % à 10 % de la population totale de la biosphère peuvent être cultivés. En raison de cette limitation, les scientifiques ont ensuite choisi une approche indépendante de la culture qui contourne les étapes de culture et d'isolement pour amplifier directement la séquence presque complète du gène de l'ARNr 16S à partir du génome en vrac (**Giaveno et al., 2013 ; Urbieta et al., 2015**).

II.1.3. Mécanismes d'adaptation à la thermophile

Un grand nombre de bactéries et d'archées thermophiles et hyperthermophiles se trouvent à la fois à la surface et à l'intérieur des cheminées hydrothermales, à des profondeurs où les températures peuvent dépasser les 100°C (**Minic et al., 2006**).

L'Archae *Pyrolobus fumari* est capable de se développer à des températures atteignant 113 °C, avec une température idéale de croissance autour de 106 °C (**Minic et al., 2006**).

L'ajustement de ces micro-organismes nécessite plusieurs modifications de leurs éléments qui doivent être capables de résister et de fonctionner à ces températures. Cette adaptation moléculaire a été étudiée sur le plan des enzymes et des protéines, mais également au niveau des membranes et des acides nucléiques (**Minic et al., 2006**).

La stabilisation des protéines est le résultat de modifications souvent multiples, dont la gamme varie d'une protéine à l'autre (**Kumar et al., 2000**) (**Robinson et al., 2006**).

Parmi les changements effectués, on peut citer :

- L'augmentation du nombre d'acides aminés chargés et, ce qui en découle, du nombre de liaisons ioniques.
- l'augmentation du nombre de résidus prolines, ce qui augmente dans la structure le nombre de β -turns et confère à la protéine une structure plus compacte et diminue l'instabilité des boucles.
- l'accroissement de la taille et de la compacité des noyaux hydrophobes de la protéine, ce qui résulte de l'augmentation de la taille des chaînes latérales des acides aminés hydrophobes qui constituent ces noyaux (substitutions gly \rightarrow ala, ala \rightarrow leu, val \rightarrow ileu).
- le remplacement d'un certain nombre de résidus lysines par des arginines, ce qui augmente le nombre de liaisons hydrogène que ces résidus contractent avec leur environnement.

- la diminution ou l'absence d'acides aminés dont la chaîne latérale est particulièrement sensible aux hautes températures (groupe amide de l'asparagine et de la glutamine, cystéine, tryptophane) (**Kumar et al., 2000**) (**Robinson et al., 2006**).

La nature et le nombre de ces modifications varient beaucoup d'une protéine à une autre, la structure de chacune d'elles déterminant les modifications à apporter. Ceci est illustré de manière significative chez *Bacillus stearothermophilus*. Chez ce micro-organisme, la stabilisation de l'enzyme d'inactivation de la kanamycine implique la présence d'un seul résidu lysine supplémentaire, alors que celle de l'oligo-1,6-glucosidase implique la présence de 14 résidus prolines supplémentaires, et que celle de la glycéraldéhyde-3-phosphate déhydrogénase est associée à la présence de six ponts ioniques supplémentaires, ainsi qu'à de nombreuses liaisons hydrogène et hydrophobes, qui n'existent pas chez son homologue des espèces mésophiles (**Ganter et al.,1990**) .

La stabilisation des membranes cytoplasmiques découle de changements qui entraînent la création de liaisons covalentes entre les deux couches de lipides (**De Rosa et al.,1991**).

Concernant l'ADN, l'adaptation aux températures élevées semble liée à une plus grande proportion de paires G-C, un taux supérieur de super-enroulement et d'interaction avec des protéines basiques, ainsi qu'à une fixation accrue de cations (**Vinogradov, 2003**).

Ce sont là les processus moléculaires les plus manifestes qui nécessitent d'être soutenus par des adaptations physiologiques plus sophistiquées. Cette supposition est démontrée, notamment, par l'observation seulement chez *Pyrococcus abyssi*, une Archée recueillie à l'intérieur d'un fumeur noir, l'étude de ses caractéristiques de ses deux premières enzymes de la biosynthèse des nucléotides pyrimidiques a révélé trois mécanismes d'adaptation distincts (**Erauso et al.,1993**).

- Un remplacement successif d'acides aminés qui, par exemple, entraîne un doublement du nombre d'acides aminés chargés situés sur la surface de ces unités et contribue donc à la stabilisation de la structure quaternaire de cette enzyme (**Purcarea, et al.,1997**).
- Un phénomène de « transfert génétique » où *Pyrococcus* dépend de l'adaptation d'une enzyme, la carbamate kinase, qui catalyse une réaction très similaire pour synthétiser le carbamylphosphate (**Purcarea et al.,1999**).
- Un mécanisme de « canalisation métabolique » où le carbamylphosphate, un métabolite hautement instable, est produit au sein de cet organisme par la synthétase carbamylphosphate-like de la carbamate kinase et transféré directement au site catalytique de l'aspartate transcarbamylase, évitant ainsi la diffusion de ce métabolite

intermédiaire dans le cytoplasme. Ce processus dépend d'une interaction passagère entre les deux enzymes (**Purcarea et al.,1999**).

II.1.4. Les microorganismes thermophiles et hyperthermophiles

Les microbes capables de croître à des températures élevées sont une grande variété de procaryotes et d'eucaryotes. C'est pourquoi Brock a proposé la définition suivante : « un thermophile est un organisme capable de vivre à des températures égales ou proches du maximum pour le groupe taxonomique dont il fait partie ». Cette définition a l'avantage de souligner les distinctions taxonomiques de la thermophile dans différents groupes d'organismes (**Satyanarayana et al.,2005**).

II.1.4.1. Les champignons

Quelques champignons thermophiles ont été isolés à partir de composts, de sols, de matériaux de nidification d'oiseaux, de copeaux de bois et de nombreuses autres sources (**Tab.2**) (**Mouchacca, 1999**).

Tableau 2. Exemples des champignons thermophiles (**Mouchacca, 1999**).

Type de champignons	Espèces
Zygomycètes	<i>Rhizomucor miehei</i> , <i>R. pusillus</i>
Ascomycètes	<i>Thermoascus aurantiacus</i> , <i>Dactylomyces thermophilus</i> , <i>Melanocarpus albomyces</i> , <i>Talaromyces thermophilus</i> , <i>Talaromyces emersonii</i> , <i>Thielavia terrestris</i>
Basidiomycètes	<i>Phanerochaete chrysosporium</i>
Hyphomycètes	<i>Acremonium alabamensis</i> , <i>A. thermophilum</i> , <i>Myceliophthora thermophila</i> , <i>Thermomyces lanuginosus</i> , <i>Scytalidium thermophilum</i> , <i>Malbranchea cinnamomea</i>

II.1.4.2. Les algues et protozoaires

Certaines algues et certains protozoaires se développent à des températures élevées (**Satyanarayana, 2005**).

Tableau 3. Exemples des algues et protozoaires thermophiles (**Satyanarayana, 2005**).

Algues	Ex : <i>Achanthes exigua</i> , <i>Mougeotia sp</i> , <i>Cyanidium caldarium</i>
Protozoaires	Ex : <i>Cothuria sp</i> , <i>Oxytricha falla</i> , <i>Cercosulciferhamathensis</i> , <i>Tetrahymena pyriformis</i> , <i>Cyclidiumcitrullus</i> , <i>Naegleria fowleri</i> .

II.1.4.3. Les bactéries et archéobactéries

Plusieurs bactéries et archéobactéries capables de se développer à des températures élevées sur la base de leurs besoins en température optimale (**Tab.4**) (**Ghosh,2003**). Elles ont été classées dans les catégories suivantes :

Tableau 4. Exemples des bactéries et archéobactéries thermophile selon les catégories de Température(**Ghosh,2003**).

Catégorie de température	Espèces
Modérées	<i>Bacillus caldolyticus</i> , <i>Geobacillus stearothermophilus</i> , <i>Thermoactinomyces vulgaris</i> , <i>Clostridium thermohydrosulfuricum</i> , <i>Thermoanaerobacter ethanolicus</i> , <i>Thermoplasma acidophilum</i>
Extrêmes	<i>Thermus aquaticus</i> , <i>T. thermophilus</i> , <i>Thermodesulfobacterium commune</i> , <i>Sulfolobus acidocaldarius</i> , <i>Thermomicrobium roseum</i> , <i>Dictyoglomus thermophilum</i> , <i>Methanococcus vulcanicus</i> , <i>Sulfurococcus mirabilis</i> , <i>Thermotoga mritima</i>
Hyperthermophiles	<i>Methanoccus jannaschii</i> , <i>Acidianus infernos</i> , <i>Archaeoglobus profundus</i> , <i>Methanopyrus kandleri</i> , <i>Pyrobaculum islandicum</i> , <i>Pyrococcus furiosus</i> , <i>Pyrodictiumoccultum</i> , <i>Pyrolobus fumarii</i> , <i>Thermococcus littoralis</i> , <i>Ignicoccusislandicum</i> , <i>Nannoarchaeum equitans</i>

II.1.5. Applications des thermophiles en biotechnologie et industrie

L'importance des biomolécules thermostables dans le domaine croissant de la biotechnologie a stimulé la recherche sur les organismes capables de croître à des températures élevées. Le phénomène de la thermophilie, tel que nous le connaissons aujourd'hui, a été établi par Brock de l'université du Wisconsin, grâce à ses études approfondies et pionnières dans le parc national de Yellowstone (Whom-ing, États-Unis), sources chaudes, où en 1967 a signalé pour la première fois l'existence des micro-organismes dont les températures optimales de croissance sont supérieures à 75 °C (**Verma et al., 2015**).

Les thermophiles ont montré un énorme potentiel d'applications dans la biotechnologie moderne. Les micro-organismes thermophiles sont importants en raison de leur grande capacité

en tant que sources d'enzymes et d'autres matériaux biologiques avec des applications en biotechnologie et en médecine, tant humaine qu'animale. (**Tab.5**). Les entreprises de biotechnologie du monde entier les recherchent en raison de leurs caractéristiques uniques. (**Arbab et al.,2022**).

Tableau 5. Les application potentielle des thermophiles en biotechnologie (**Satyanarayana et al.,2005**).

Source à partir des thermophiles	Utilisations
ADN polymérase	Amplification de l'ADN par PCR
Phosphatase alcaline	Diagnostics
Protéases et lipases	Produits laitiers
Lipases, pullulanase, amylopullulanase et protéases α -Amylases, glucoamylase, α -glucosidase, pullulanase, transformation de l'amidon, et glucose et fructose pour édulcorants amylopullulanase et xylose/glucose isomérases.	Cuisson et brassage et production d'acides aminés à partir de kératine
Alcool déshydrogénase	Synthèse chimique
Xylanases	Blanchiment du papier
Protéines et lipides de la couche S	Tamis molecular
Micro-organismes dégradant l'huile	Agents tensioactifs pour la récupération du pétrole
Micro-organismes oxydant le soufre	Biolixiviation, charbon et désulfuration des gaz résiduaire
Consortia thermophiles	Traitement des déchets et production de méthane
ADN ligase	Réaction en chaîne de la ligase (LCR)
Antibiotiques	Pharmaceutique

Alpha-amylases stables pour l'hydrolyse de l'amidon, xylanases pour le blanchiment du papier et protéases pour l'industrie alimentaire, la transformation des aliments, la boulangerie, la brasserie et les détergents à lessive. Toutes ces enzymes ont été découvertes chez les thermophiles. Les cellulases peuvent être utilisées pour augmenter la digestibilité et l'efficacité nutritionnelle de la biomasse contenant de la cellulose et des cultures fourragères, ainsi que pour éclaircir les couleurs des détergents (**Poli et al.,2017**).

Les ADN polymérases thermostables principalement utilisées dans les procédures PCR appartiennent aux polymérases de la famille A des bactéries thermophiles et aux polymérases de la famille B des organismes archéologiques hyperthermophiles. La Taq ADN polymérase de la famille A présente une efficacité élevée en matière de PCR et peut être utilisée dans les essais de la qPCR employant des sondes d'hydrolyse marquées de manière fluorescente (**Aschenbrenner et al.,2017**).

De nombreuses protéines thermostables isolées du genre *Thermus* sont importantes pour la recherche et dans les applications industrielles comme les protéases (**Henne et al.,2004**).

II.1.6. Application pharmaceutique

Les micro-organismes thermophiles ont acquis une importance mondiale en raison de leur énorme potentiel de produire des enzymes thermostables qui ont de vastes applications dans le domaine pharmaceutique et industriel (**Tab.5**).

Les isolats de *Bacillus sp.* sont de véritables thermophiles et peuvent constituer une source de protéase thermostable pour l'industrie pharmaceutique (**Panda et al.,2013**).

À partir du thermophile *Aspergillus terreus*, les chercheurs ont isolé l'asperjinone, un nor-néolignan, et la terreine, ont un suppresseur de cellules cancéreuses du sein exprimant l'ABCG2, qui peuvent restaurer la sensibilité aux médicaments et peuvent être la clé pour l'amélioration des thérapies contre le cancer du sein. Le traitement par la terreine a supprimé de manière significative la croissance des cellules cancéreuses du sein MCF-7 exprimant l'ABCG2 (**Liao et al.,2012**).

II.2. Les actinomycètes thermophiles

II.2.1. Pourquoi les actinomycètes thermophiles ?

Le principal défi pour les actinomycètes réside dans leur survie et la production de molécules bioactives actives et stables à haute température. De plus, la mise en œuvre de procédés biotechnologiques à haute température réduit le risque de contamination par des bactéries mésophiles courantes et a une influence significative sur la biodisponibilité et la solubilité. La

découverte récente de nouveaux métabolites primaires et secondaires issus de populations taxonomiquement uniques d'actinomycètes extrémophiles suggère que ces micro-organismes pourraient apporter une nouvelle dimension à la recherche sur les produits naturels microbiens. De plus, la demande actuelle en composés bioactifs a considérablement augmenté en raison du problème mondial du développement d'une incidence accrue de pathogènes naturellement résistants aux antibiotiques existants. Compte tenu du niveau d'utilisation de ces antibiotiques coûteux pour traiter les agents pathogènes, l'isolement de nouveaux composés bioactifs à usage thérapeutique est essentiel. De plus, le développement de nouveaux agents antimicrobiens est impératif, car de nombreux micro-organismes, dont la plupart des champignons, bactéries et virus, ne disposent pas d'antibiotiques véritablement efficaces et sûrs (Harwani, 2013).

Définition des actinomycètes thermophiles :

Les actinomycètes thermophiles font partie de la microflore autochtone des habitats où la décomposition de la matière organique a lieu à des températures élevées et dans des conditions aérobies ou semi-aérobies. Bien qu'aucune frontière nette ne puisse être établie entre les micro-organismes mésophiles et thermophiles, tout actinomycète peut être considéré comme thermophile s'il se développe à 50 °C et plus (Cross, 1981). Nombre de ces organismes se développent également dans la zone mésophile (28-40 °C) et peuvent être isolés à des températures inférieures à 45 °C.

II.2.2. Les actinomycètes thermophiles

Les espèces thermophiles de neuf genres d'*Actinomycetales* ont été caractérisées par leur morphologie, leurs marqueurs biochimiques, leur physiologie et leur lysotypie. Les résultats de ont permis d'établir une clé d'identification des genres *Actinomadura*, *Faenia*, *Microbispora*, *Micropolyspora*, *Pseudonocardia*, *Saccharomonospora*, *Saccharopolyspora* et *Thermomonospora*. Sur la base des données biochimiques, les espèces suivantes, dont la plupart ne figurent pas sur les listes approuvées de noms bactériens, sont décrites : *Actinomadura angiospora* (anciennement *Micropolyspora angiospora*), *Actinomadura rubrobrunea* (contenant les deux anciennes espèces « *Excellospora rubrobrunea* » et « *Excellospora uiridinigro* », *Saccharomonospora caesia*. (Anciennement « *Micropolyspora caesia* »), *Saccharomonospora internatus* (anciennement « *Micropolyspora internatusi* » et *Thermopoiyspora lexosa*, (anciennement « *Actinomadura flexuosa* »). Dans le cas de *Microbispora*, *Saccharomonospora* et *Thermomonospora*, et *Streptomyces* (Cross, 1981).

Le genre *Thermoactinomyces* n'a pas été inclus dans cette étude en raison de sa parenté phylogénétique avec les *Bacillaceae*, comme le montrent la formation des endospores (**Cross, 1981**), les propriétés biochimiques et les séquences d'ARNr 16S. Des études complémentaires sont nécessaires pour l'identification des espèces (**Greiner-Mai et al, 1987**).

Les microbiologistes appliqués rencontrent ces actinomycètes lorsqu'ils étudient la microflore des composts, du fumier et des matières auto-échauffantes telles que le foin, les céréales, la bagasse, etc. (**Lacey, 1978 ; Cross, 1981**). Certains de ces organismes sont responsables de maladies allergiques chez les personnes travaillant avec ces matières (**Lacey, 1981**).

Enfin, les programmes de criblage à la recherche d'enzymes et de métabolites secondaires peuvent conduire à l'isolement d'organismes d'intérêt biotechnologique parmi les actinomycètes thermophiles (**Fennington et al., 1984**).

II.2.3. Applications en biotechnologiques

Pour obtenir des antimicrobiens à partir de la flore microbienne naturelle, les scientifiques tentent d'explorer des habitats inexplorés, de nouveaux actinomycètes, candidats potentiels à la découverte de nouveaux composés bioactifs. La découverte récente de nouveaux métabolites primaires et secondaires issus de populations taxonomiquement uniques d'actinomycètes extrêmophiles suggère que ces organismes pourraient apporter une nouvelle dimension à la recherche sur les produits naturels microbiens (**Thumar, 2010**).

Les actinobactéries présentent un avantage sur les autres microbes en tant que productrices prolifiques de nombreux produits biopharmaceutiques (**Bull et al., 2000**). Les actinobactéries thermophiles sont d'excellents producteurs de plusieurs enzymes d'importance commerciale, telles que les ADN polymérasés, les pullulanases, les amylases, les xylanases, les lipases et les protéases (**Mahajan et Balachandran, 2017**), et les cellulases (**Singh et al., 2018**).

Les actinomycètes thermophiles sont réputés être des producteurs efficaces de nouveaux métabolites secondaires qui présentent une gamme d'activités biologiques, notamment la production d'enzymes, antibactériennes, antifongiques et extracellulaires (**Agarwal et Mathur, 2016**).

Au cours des dernières décennies, la recherche sur les actinobactéries s'est concentrée sur les habitats spécifiques et les environnements extrêmes; cependant, en raison des contraintes culturelles, les actinobactéries endémiques des sources chaudes sont moins connues de la communauté scientifique (**Panda et al ,2018**).

Les actinobactéries thermophiles synthétisent une grande variété de métabolites tels que des composés antioxydants et anti-inflammatoires et des enzymes d'importance clinique. Récemment, de nombreux articles et documents de recherche ont été publiés sur la diversité des actinobactéries, leurs gènes fonctionnels et leurs métabolites, ainsi que sur leurs fonctions écologiques (Qin et al., 2016 ; Passari et al., 2016). Des rapports sporadiques sont également disponibles sur les enzymes industrielles des actinobactéries thermophiles associées aux sources chaudes.

II.2.4. Importance des actinobactéries dans les sources thermales

Les actinobactéries jouent un rôle important dans les cycles biogéochimiques et l'évolution des sols en produisant diverses substances bioactives. Cependant, la distribution des espèces et la biogéographie du phylum *Actinobacteria* dans les sources thermales sont peu décrites. *Micromonospora* sp. Est capable de dégrader la matière organique en produisant des enzymes hydrolytiques. Les *Streptomyces* jouent un rôle majeur dans le cycle du carbone piégé dans les débris organiques insolubles. *Thermobifida*, une actinobactérie modérément thermophile, dégrade la paroi cellulaire des plantes contenant de la matière organique thermiquement active. Les *rhodocoques* peuvent dégrader une gamme remarquable de composés xénobiotiques et organiques car ils possèdent une grande plasticité de gènes cataboliques. Des rapports font état de la présence de *Micromonospora* sp., *Streptomyces* sp. (Liu et al., 2016) et *Rhodococcus erythropolis* (Mehetre et al., 2016) dans des sources thermales (Tab.6).

Tableau 6. Espèces d'actinobactéries provenant de diverses sources thermales (Panda et al.,2018).

Localisation	Source	Espèces d'actinobactéries	Références
Sources chaudes acides dans le parc national de Yellowstone	Eau de source chaude	<i>Acidothermus cellulolyticus</i> 11B	(Baraboteet al.,2009)
Source thermale de Hehua à Tengchong, province du Yunnan, sud-ouest de la Chine	Sédiments de sources chaudes	<i>Streptomyces calidiresistens</i> sp. nov.	(Duan et al.,2014)
Eryuan, Yunnan, Chine	Sédiments de sources chaudes	<i>Streptomyces thermogriseus</i>	(Xu et al. ,1998)
Tatta Pani, Kotli, Azad Jammu et Cachemire, Pakistan	Sol de source chaude	<i>Streptomyces caldifontis</i> sp. nov.	(Amin et al., 2017)

Source chaude, Gujarat, Inde	Sol de source chaude	<i>Saccharomonospora viridis</i> SJ-21	(Jani et al., 2012)
Sources d'eau chaude dans la région de Lushan à Taïwan	Eau de source chaude	<i>Rubrobacter taiwanensis</i> sp. nov.	(Chen et al., 2004)
Étang de source chaude dans la province de Krabi, Thaïlande	Sol de source chaude	<i>Planosporangium thailandense</i> sp. nov.	(Thawai et al., 2013)
Sources d'eau chaude, Portugal central	Eau de source chaude	<i>Rubrobacter radiotolerans</i>	(Ferreira et al., 1999)
Source chaude Gusikha (60C) dans la vallée de Bargusin (zone du rift du Baïkal, Russie)	Sédiments de sources chaudes	<i>Thermoactinomyces</i> sp. Gus2-1	(Rozanov et al., 2017)
Tatta Pani, Kotli, Pakistan	Eau de source chaude	<i>Nocardioides pakistanensis</i> sp. nov.	(Amin et al., 2016)

**Chapitre III : Les
actinomycètes thermophiles
producteurs d'antimicrobiens**

Chapitre III . Les actinomycètes thermophiles producteurs d'antimicrobiennes

III.1. La résistance aux antimicrobiens

La résistance aux antimicrobiens est l'une des principales menaces pour la santé humaine à l'échelle mondiale (**Lancet,2022**). Récemment, on a estimé que 1,2 million de personnes sont mortes d'infections bactériennes résistantes aux antibiotiques, soit plus que celles causées par le VIH/sida ou le paludisme (**Murray et al.,2022**). Il y a donc un besoin urgent de nouveaux antimicrobiens efficaces. Depuis de nombreuses années, notre groupe s'est engagé dans un effort de criblage pour détecter les métabolites secondaires de la nature qui peuvent inhiber les micro-organismes pathogènes (**Wibowo et al.,2020**), tels que *Staphylococcus aureus*. *S. aureus* est l'un des principaux agents pathogènes (le deuxième après *Escherichia coli*) pour ce qui est des décès liés à la résistance (**Murray et al.,2022**). Les microbes constituent l'une des sources les plus prolifiques de petites molécules, les deux tiers des métabolites secondaires microbiens connus étant dérivés d'actinobactéries (**Barka et al., 2016**). Les actinobactéries constituent un vaste groupe de bactéries morphologiquement et physiologiquement diverses, bien connues pour leur production de produits naturels et de composés importants sur le plan biotechnologique (**Ribeiro et al.,2020**). On sait que 70 % d'entre eux sont produits par le genre *Streptomyces*.

III.2. Les actinomycètes thermophiles antimicrobiens

Les actinomycètes thermophiles représentent un groupe fascinant de bactéries filamenteuses qui se développent à des températures élevées (**Krishnan et al., 2016**). Cette thermotolérance est due à des adaptations morphologiques, physiologiques et biochimiques, telles que la production de protéines chaperonne, la composition lipidique des membranes et l'expression de gènes spécifiques (**Li et al., 2021**). Ils suscitent un intérêt croissant en biotechnologie, notamment en raison de leur capacité à produire des composés antimicrobiens uniques, souvent actifs contre des pathogènes résistants aux antibiotiques classiques (**Zhao et al., 2015**). Leur aptitude à survivre dans des environnements extrêmes tels que les sources chaudes, les composts et les déserts leur confère une métabolisation particulière, qui est utile pour la production de métabolites secondaires bioactifs (**Belkacemi et al., 2019**).

III.2.1. Les activités antimicrobiennes des actinomycètes thermophiles

Les actinomycètes thermophiles accomplissent diverses activités qui les rendent intéressants pour l'industrie pharmaceutique et biotechnologique :

III.2.1.1. Production des antibiotiques

Les actinomycètes thermophiles sont en effet d'importants producteurs de métabolites secondaires antimicrobiens. *Streptomyces thermoviolaceus*, par exemple, produit la thermorubine, un composé thermostable qui a montré une activité significative contre des bactéries résistantes (Krishnan et al., 2016). La production de ce composé à haute température est un atout majeur pour les applications industrielles où des conditions thermiques extrêmes sont nécessaires.

III.2.1.2. Production de composés antifongiques et antiviraux

Certaines actinomycètes thermophiles produisent des composés à propriété antifongiques et antivirales, *Micromonospora thermotolerans* est connue pour produire la thermomicine, un peptide aux propriétés antifongiques contre *Candida albicans* et antivirales contre des virus à ARN (Li et al., 2021). Cette capacité montre un potentiel dans la lutte contre les infections opportunistes et virales

III.2.1.3. Biocontrôle et bio fertilisation

Les actinomycètes thermophiles produisent des substances favorisant la croissance des plantes et inhibant les agents pathogènes végétaux. Ils produisent également des phytohormones telles que l'acide indole-3-acétique (IAA) et des sidérophores qui facilitent l'absorption du fer par les plantes (Belkacemi et al., 2019).

III.2.1.4. Bioremédiation

Thermobifida fusca peut dégrader des hydrocarbures complexes et des polymères comme le polyéthylène grâce à des enzymes spécifiques (Zhao et al., 2015). Cela en fait un candidat idéal pour la décontamination de sites pollués. Le tableau suivant présente quelques genres/espèces producteurs de composés antimicrobiens (Tab.7).

Tableau 7. Quelques Actinomycètes thermophiles producteurs d'antimicrobiens

Genre / Espèce	Famille	Produit antimicrobien	Référence
<i>Streptomyces thermoviolaceus</i>	Streptomycetaceae	Thermorubin	Krishnan et al., 2016
<i>Thermobifida fusca</i>	Thermomonosporaceae	Fuscanine	Zhao et al., 2015
<i>Actinopolyspora biskrensis</i>	Pseudonocardiaceae	Biskramycine	Belkacemi et al., 2019
<i>Saccharopolyspora thermophila</i>	Pseudonocardiaceae	Saccharothine	Kim et al., 2020
<i>Micromonospora thermotolerans</i>	Micromonosporaceae	Thermomicine	Li et al., 2021

III.3. Les actinomycètes thermophiles productifs d'antimicrobiens en Algérie

Jusqu'à présent, presque toutes les études algériennes se sont concentrées sur une forme de stress environnemental, à savoir les genres halophiles ou thermophiles ; cependant, l'isolement des actinomycètes thermo-halotolérants algériens qui se développent dans des environnements chauds et salins a rarement été tenté (**Nekhili et al., 2021**).

L'étudié montre la biodiversité et le potentiel d'inhibition de la croissance des bactéries mycéliennes thermo-halotolérantes isolées à partir de sols algériens. Au total, 55 souches ont été isolées à partir de 11 échantillons de sol dans 3 provinces différentes en Algérie. Certaines souches possédaient les caractéristiques morphologiques de *Saccharomonospora* (24 souches) et de *Saccharopolyspora* (4 souches). Cependant, les caractéristiques morphologiques de 5 souches correspondent à celles décrites pour membres de la famille des *Thermoactinomycetaceae*. En outre, 22 souches appartenant à des genres inconnus ont été isolées sur le site. L'isolement des bactéries mycéliennes thermo-halotolérantes a été réalisé sur un milieu gélosé nutritif supplémentaire avec 10% de NaCl, sous incubation pendant 10 jours à 52 °C. Les analyses du gène 16S rRNA de 15 des 55 bactéries mycéliennes thermo-halotolérantes ont indiqué qu'une souche appartient à *Saccharopolyspora*, neuf souches appartiennent à *Saccharomonospora* et cinq souches appartiennent à *Melghirimyces*. Une évaluation des propriétés biologiques de ces 15 actinomycètes thermo-halotolérants, évaluées par la méthode de la plaque cylindrique contre 15 micro-organismes cibles, a montré des activités inhibitrices de croissance modérées à fortes contre les bactéries, les microchampignons ou les levures. Nous avons constaté une variation des diamètres d'inhibition entre les actinomycètes testés. De plus, ces valeurs étaient différentes en

fonction du milieu de culture (GYEA ou BM) et également en fonction de la concentration de NaCl sur (1% ou 5%). L'activité inhibitrice de croissance la plus forte a été enregistrée contre *Listeria monocytogenes* ATCC 13932, *Micrococcus luteus* ATCC 9314 (24 mm) et *Klebsiella pneumoniae* E40 (24 mm).

Dans l'étude de (Nekhili et al., 2021), 55 souches thermo-halotolérantes ont été isolées à partir de sols algériens. Les résultats démontrent le potentiel élevé des bactéries thermo-halotolérantes de, en particulier des souches de *Melghirimyces*, pour produire des composés antimicrobiens. Par conséquent, ils fournissent une preuve supplémentaire que les sols algériens sont une source riche de nouveaux taxons actinomycéaux rares et thermo-halotolérants, potentiellement, de composés bioactifs originaux (Nekhili et al., 2021).

Conclusion

Conclusion

De nombreuses recherches ont été réalisées dans le but de l'étude de l'identification des souches d'actinomycètes à partir des différents types d'environnements.

La résistance des micro-organismes aux molécules représente un enjeu crucial, notamment lorsqu'elle touche des agents pathogènes. Elle se manifeste par la capacité d'un micro-organisme à échapper aux effets d'un agent chimiothérapeutique auquel il était initialement sensible. La propagation de ces bactéries est ainsi devenue une problématique de santé publique majeure.

Il demeure essentiel de continuer à rechercher de nouvelles substances antimicrobiennes présentant un spectre d'activité plus étendu, tout en étant moins nocives pour l'hôte.

Les actinomycètes présentent un énorme potentiel en tant que source de composés secondaires bioactifs, notamment en raison de leur capacité à produire des antimicrobiens uniques. Cette particularité est le résultat de leur capacité d'adaptation à des environnements à haute température où la concurrence biologique est réduite, leur permettant de développer des mécanismes métaboliques uniques. Ces micro-organismes constituent un atout majeur dans la lutte contre les souches microbiennes résistantes, justifiant des recherches futures pour approfondir la compréhension de leur diversité génétique et de leurs voies métaboliques. Cette exploration ouvrira la voie au développement de thérapies nouvelles et efficaces, contribuant ainsi à trouver des solutions innovantes aux problèmes de santé mondiaux.

Références

Bibliographiques

Références Bibliographiques

A

1. Adiguzel, A., Nadaroglu, H., & Adiguzel, G. (2014). Purification and characterization of β -mannanase from *Bacillus pumilus* (M27) and its applications in some fruit juices. *Journal of Food Science and Technology*, 52(8), 5292-5298.
2. Aouar, A. (2006). Les Actinobactéries et leur rôle dans la production d'antibiotiques. Mémoire de Magistère, Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen.
3. Arbab, S., Ullah, H., Khan, M. I., Khattak, M. N., Zhang, J., Li, K., & Hassan, I. U. (2022). Diversity and distribution of thermophilic microorganisms and their applications in biotechnology. *Journal of basic microbiology*, 62(2), 95-108.
4. Aschenbrenner, J., & Marx, A. (2017). DNA polymerases and biotechnological applications. *Current opinion in biotechnology*, 48, 187-195.
5. Avril, J. L., Monteil, H., & Rozé, D. (1992). Bactériologie médicale. Paris: Flammarion Médecine-Sciences.

B

6. Baltz, R.H. Renaissance in antibacterial discovery from actinomycetes. *Curr. Opin. Pharmacol.* 2008, 8, 557-563.
7. Barka, E. A., Vatsa, P., Sanchez, L., Gaveau-Vaillant, N., Jacquard, C., Klenk, H. P., ... & van Wezel, G. P. (2016). Taxonomy, physiology, and natural products of Actinobacteria. *Microbiology and molecular biology reviews*, 80(1), 1-43.
8. Belkacemi, L., Zhor, H., Meriem, A., & Noureddine, B. (2019). Isolation and characterization of *Actinopolyspora biskrensis* from Sahara soils producing biskramycine. *Journal of Antibiotics*, 72(6), 402–410.
9. Ben Ameer Mehdi, R., Shaaban, K. A., Rebai, I. K., Smaoui, S., Bejar, S., & Mellouli, L. (2009). Five naturally bioactive molecules including two rhamnopyranoside derivatives isolated from the *Streptomyces* sp. strain TN58. *Natural Product Research*, 23(12), 1095-1107.
10. Berdy J. (2005). Bioactive Microbial Metabolites. *Journal of Antibiotics*. 58: 1–26.
11. Bhatti, A. A., Haq, S., & Bhat, R. A. (2017). Actinomycetes benefaction role in soil and plant health. *Microbial pathogenesis*, 111, 458-467.

C

12. Choulet, F. (2006). Evolution du génome des Streptomyces : transfert horizontal et variabilité des extrémités chromosomiques (Doctoral dissertation, Université Henri Poincaré-Nancy 1).
13. Conn, V. M. (2005). Molecular interactions of endophytic actinobacteria in wheat and arabidopsis. Flinders University, Department of Medical Biotechnology..McCarthy, A.J.; Williams, S.T. Actinomycetes as agents of biodegradation in the environment-a review. *Gene* 1992, 115, 189-192.
14. Cross, T.: The monosporic actinomycetes. In: *The Procaryotes Ahandbook on habitats, isolation and identification of bacteria* (M. P. Starr, H. Stolp, H. G. Triiper, A. Balows, H. G.Schlegel, eds.), pp. 2091-2100. Berlin, Springer-Verlag 1981

D

15. Dairi, T. (2005). Studies on biosynthetic genes and enzymes of isoprenoids produced by actinomycetes. *The Journal of antibiotics*, 58(4), 227-243.
16. Dandawate, P. R., Vyas, A. C., Padhye, S. B., Singh, M. W., & Baruah, J. B. (2010). Perspectives on medicinal properties of benzoquinone compounds. *Mini Reviews in Medicinal Chemistry*, 10(5), 436-454.
17. De Rosa, M., Trincone, A., Nicolaus, B., & Gambacorta, A. (1991). Archaeobacteria: lipids, membrane structures, and adaptation to environmental stresses. In *Life Under Extreme Conditions: Biochemical Adaptation* (pp. 61-87). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
18. Demain, A.L.; Sánchez, S. Microbial drug discovery: 80 years of progress. *J. Antibiot.* 2009, 62, 5-16
19. Divya P., Neelu N., Mansi P., Manish B., Abul M., Madhukar K., and Balasaheb K., (2013). Actinomycetes: A Repertory of Green Catalysts with a Potential revenue resource. *Journal of BioMed Research International*, 264020: 8.édition. Paris. 589-603
20. Doran, P. T., McKay, C. P., Clow, G. D., Dana, G. L., Fountain, A. G., Nylén, T., & Lyons, W. B. (2002). Valley floor climate observations from the McMurdo Dry Valleys, Antarctica, 1986–2000. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D24), ACL-13.dunes: a remote sensing approach. *Advances in remote sensing*, 3(01), 10.

E

21. Erauso, G., Reysenbach, A. L., Godfroy, A., Meunier, J. R., Crump, B., Partensky, F., ... & Prieur, D. (1993). *Pyrococcus abyssi* sp. nov., a new hyperthermophilic archaeon isolated from a deep-sea hydrothermal vent. *Archives of microbiology*, *160*, 338-349.

F

22. Fennington, G. E. O. R. G. E., Neubauer, D. E. B. B. I. E., & Stutzenberger, F. R. E. D. (1984). Cellulase biosynthesis in a catabolite repression-resistant mutant of *Thermomonospora curvata*. *Applied and environmental microbiology*, *47*(1), 201-204.

G

23. Ganter, C., & Plueckthun, A. (1990). Glycine to alanine substitutions in helices of glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase: effects on stability. *Biochemistry*, *29*(40), 9395-9402.
24. Ganesan, P., Reegan, A. D., David, R. H. A., Gandhi, M. R., Paulraj, M. G., Al-Dhabi, N. A., & Ignacimuthu, S. (2017). Antimicrobial activity of some actinomycetes from Western Ghats of Tamil Nadu, India. *Alexandria journal of medicine*, *53*(2), 101-110.
25. Gholami, M., Etemadifar, Z., & Bouzari, M. (2015). Isolation a new strain of *Kocuria rosea* capable of tolerating extreme conditions. *Journal of environmental radioactivity*, *144*, 113-119.
26. Ghosh, D., Bal, B., Kashyap, V. K., & Pal, S. (2003). Molecular phylogenetic exploration of bacterial diversity in a Bakreshwar (India) hot spring and culture of *Shewanella*-related thermophiles. *Applied and environmental microbiology*, *69*(7), 4332-4336.
27. Giaveno, M. A., Urbieta, M. S., Ulloa, J. R., González Toril, E., & Donati, E. R. (2013). Physiologic versatility and growth flexibility as the main characteristics of a novel thermoacidophilic *Acidianus* strain isolated from Copahue geothermal area in Argentina. *Microbial ecology*, *65*, 336-346.
28. Gilbert, V., Legros, F., Maraite, H., & Bultreys, A. (2009). Genetic analyses of *Pseudomonas syringae* isolates from Belgian fruit orchards reveal genetic variability and isolate-host relationships within the pathovar *syringae*, and help identify both races of the pathovar *morsprunorum*. *European Journal of Plant Pathology*, *124*, 199-218.
29. Goodfellow, M.; Williams, S.T. Ecology of actinomycetes. *Annu. Rev. Microbiol.* 1983, *37*, 189- 216.
30. Greiner-Mai, E., Kroppenstedt, R. M., Korn-Wendisch, F., & Kutzner, H. J. (1987). Morphological and biochemical characterization and emended descriptions of

thermophilic actinomycetes species. *Systematic and applied microbiology*, 9(1-2), 97-109.

31. Gulluce, M., Bal, T., Ozkan, H., Adiguzel, A., Sahin, F., & Yanmis, D. (2014). Conventional and molecular identification of bacteria with magnesite enrichment potential from local quarries in Erzurum. *Geomicrobiology Journal*, 31(5), 445-451.

H

32. Harwani, D. (2013). Biodiversity of rare thermophilic actinomycetes in the great Indian Thar desert: an overview. *Indo Am J Pharm Res*, 3, 934-939.
33. Hasegawa S., A. Meguro M., Shimizu T., Nishimura., Kunoh H., (2006). Endophyticactinomycetes and their interactions with host plants. *Actinomycetol*, 20 (2): 72-Sommer P., Bormann C., and Cötz F., (1997). Genetic and biochemical characterization *Streptomyces humidus*. *Infect dis.* 5 (3): 207-213.
34. Hedlund, B.P.; Cole, J.K.; Williams, A.J.; Hou, W.; Zhou, E.; Li, W.; Dong, H. A review of the microbiology of the Rehai geothermal field in Tengchong, Yunnan Province, China. *Geosci. Front.* **2012**, 3, 273–288
35. Henne, A., Brüggemann, H., Raasch, C., Wiezer, A., Hartsch, T., Liesegang, H., ... & Fritz, H. J. (2004). The genome sequence of the extreme thermophile *Thermus thermophilus*. *Nature biotechnology*, 22(5), 547-553.
36. Hostein, I., Robertson, D., DiStefano, F., Workman, P., & Andrew Clarke, P. (2001). Inhibition of signal transduction by the Hsp90 inhibitor 17-allylamino-17-demethoxygeldanamycin results in cytostasis and apoptosis. *Cancer research*, 61(10), 4003-4009.
37. Hui, M. L. Y., Tan, L. T. H., Letchumanan, V., He, Y. W., Fang, C. M., Chan, K. G., ... & Lee, L. H. (2021). The extremophilic actinobacteria: from microbes to medicine. *Antibiotics*, 10(6), 682.

K

38. Kamjam, M., Sivalingam, P., Deng, Z., & Hong, K. (2017). Deep sea actinomycetes and their secondary metabolites. *Frontiers in Microbiology*, 8, 760.
39. Kämpfer, P. (2015). *Streptomyces*. *Bergey's manual of systematics of archaea and bacteria*, 1-414.
40. Khiyami, M. A., Serour, E. A., Shehata, M. M., & Bahkha, A. H. (2012). Thermo-aerobic bacteria from geothermal springs in Saudi Arabia. *African Journal of Biotechnology*, 11(17), 4053-4062.

41. Kim, Y. S., Park, J. H., Lee, H. J., & Kim, J. Y. (2020). Antimicrobial activity of *Saccharopolyspora thermophila* isolated from compost. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(3), 1235–1245
42. Krishnan, M., Rajendran, V., & Balakrishnan, S. (2016). Production of thermostable thermorubin from *Streptomyces thermoviolaceus*. *Microbiological Research*, 192, 100–106.
43. Kumar, R.R. & Vasantba, J.J. (2016). Isolation of Actinomycetes: A Complete Approach. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 5(5):606-618.
44. Kumar, S., Tsai, C. J., & Nussinov, R. (2000). Factors enhancing protein thermostability. *Protein engineering*, 13(3), 179-191.

L

45. Lacey, J. (1978). Ecology of actinomycetes in fodders and related substrates. *Zentralblatt fur Bakteriologie, Parasitenkunde*.
46. Lacey, J. (1981). Airborne actinomycete spores as respiratory allergens. *Zentralblatt fur Bakteriologie, Mikrobiologie und Hygiene. I. Abt.: Supplemente*, 11.
47. Lancet, T. (2022). Antimicrobial resistance: time to repurpose the Global Fund. *Lancet (London, England)*, 399(10322), 335.
48. Lewin, G. R., Carlos, C., Chevrette, M. G., Horn, H. A., McDonald, B. R., Stankey, R. J., ... & Currie, C. R. (2016). Evolution and ecology of Actinobacteria and their bioenergy applications. *Annual review of microbiology*, 70(1), 235-254.
49. Li, G., Zhou, X., Li, Z., Liu, Y., Liu, D., Miao, Y., ... & Zhang, R. (2021). Significantly improving the thermostability of a hyperthermophilic GH10 family xylanase XynAF1 by semi-rational design. *Applied microbiology and biotechnology*, 105(11), 4561-4576.
50. Li, Q. Q., Lee, R. X., Liang, H., & Zhong, Y. (2013). Anticancer activity of β -elemene and its synthetic analogs in human malignant brain tumor cells. *Anticancer research*, 33(1), 65-76.
51. Liao, W. Y., Shen, C. N., Lin, L. H., Yang, Y. L., Han, H. Y., Chen, J. W., ... & Liaw, C. C. (2012). Asperjinone, a nor-neolignan, and terrein, a suppressor of ABCG2-expressing breast cancer cells, from thermophilic *Aspergillus terreus*. *Journal of Natural Products*, 75(4), 630-635.
52. Liu, L., Salam, N., Jiao, J. Y., Jiang, H. C., Zhou, E. M., Yin, Y. R., ... & Li, W. J. (2016). Diversity of culturable thermophilic actinobacteria in hot springs in Tengchong, China and studies of their biosynthetic gene profiles. *Microbial Ecology*, 72, 150-162.

53. Logan, R. F. (1968). Causes, climates, and distribution of deserts. In *Desert biology* (pp. 21-50). Academic Press.

M

54. Madigan M., Martinco J. (2007). *Biologie des micro-organismes*. 11ème éd. Paris : Pearson éducation France. 1047p. Kamjam, M., Sivalingam, P., Deng, Z., & Hong, K. (2017). Deep sea actinomycetes and their secondary metabolites. *Frontiers in Microbiology*, 8, 760.
55. Makhalanyane, T. P., Valverde, A., Gunnigle, E., Frossard, A., Ramond, J. B., & Cowan, D. A. (2015). Microbial ecology of hot desert edaphic systems. *FEMS microbiology reviews*, 39(2), 203-221.
56. Mehetre, G. T., Paranjpe, A. S., Dastager, S. G., & Dharme, M. S. (2016). Complete metagenome sequencing based bacterial diversity and functional insights from basaltic hot spring of Unkeshwar, Maharashtra, India. *Genomics data*, 7, 140-143.
57. Mestre, N. C., Calado, R., & Soares, A. M. (2014). Exploitation of deep-sea resources: the urgent need to understand the role of high pressure in the toxicity of chemical pollutants to deep-sea organisms. *Environmental Pollution*, 185, 369-371.
58. Minic, Z., Serre, V., & Hervé, G. (2006). Adaptation des organismes aux conditions extrêmes des sources hydrothermales marines profondes. *Comptes rendus. Biologies*, 329(7), 527-540.
59. Mosivand, M., Rahimian, H., & Shams-Bakhsh, M. (2009). Phenotypic and genotypic relatedness among *Pseudomonas syringae* pv. *syringae* strains isolates from sugarcane, stone fruit and wheat. *Iran. J. Plant Pathol*, 45, 75-85.
60. Mouchacca, J. (1999). Thermophilic fungi: present taxonomic concepts. In *Thermophilic moulds in biotechnology* (pp. 43-83). Dordrecht: Springer Netherlands.
61. Murray, C. J., Ikuta, K. S., Sharara, F., Swetschinski, L., Aguilar, G. R., Gray, A., ... & Tasak, N. (2022). Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: a systematic analysis. *The lancet*, 399(10325), 629-655.

N

62. Nekhili, H., Bouras, N., Jiang, Y., Toumatia, O., Lamari, L., Zitouni, A., & Jiang, C. L. (2021). Thermo-halotolerant mycelial bacteria from Algerian soils: Isolation, taxonomy and antagonistic properties. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 33, 101972.
63. Newman, D.J.; Cragg, G.M. 2007. Natural products as sources of new drugs over the last 25 years. *J. Nat. Prod.* 70, 461-477.

64. Nithya, K., Muthukumar, C., Biswas, B., Alharbi, N. S., Kadaikunnan, S., Khaled, J. M., & Dhanasekaran, D. (2018). Desert actinobacteria as a source of bioactive compounds production with a special emphases on Pyridine-2, 5-diacetamide a new pyridine alkaloid produced by *Streptomyces* sp. DA3-7. *Microbiological research*, 207, 116-133.
65. Noreen, N. A. Y. A. R. A., Ramzan, N. A. D. I. A., Perveen, Z. A. H. I. D. A., & Shahzad, S. A. L. E. E. M. (2019). A comparative study of cow dung compost, goat pellets, poultry waste manure and plant debris for thermophilic, thermotolerant and mesophilic microflora with some new reports from Pakistan. *Pak. J. Bot*, 51(3), 1155-1159.

P

66. Panda, A. K., Bisht, S. S., Rana, M., De Mandal, S., & Kumar, N. S. (2018). Biotechnological potential of thermophilic Actinobacteria associated with hot springs. In *New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering* (pp. 155-164). Elsevier.
67. Panda, M. K., Sahu, M. K., & Tayung, K. (2013). Isolation and characterization of a thermophilic *Bacillus* sp. with protease activity isolated from hot spring of Tarabalo, Odisha, India. *Iranian journal of microbiology*, 5(2), 159.
68. Passari, A. K., Mishra, V. K., Gupta, V. K., Saikia, R., & Singh, B. P. (2016). Distribution and identification of endophytic *Streptomyces* species from *Schima wallichii* as potential biocontrol agents against fungal plant pathogens. *Polish Journal of Microbiology*, 65(3), 9.a. plant health. *Microbial pathogenesis*, 111, 458-467.
69. Poli, A., Finore, I., Romano, I., Gioiello, A., Lama, L., & Nicolaus, B. (2017). Microbial diversity in extreme marine habitats and their biomolecules. *Microorganisms*, 5(2), 25.
70. Prescott L. M., Harley. J. P, Klein D.A. 2010. Microbiologie. De Boeck : Bruxelles. 2^{ème} Edition. 589 - 603.
71. Prescott L., Sherwood L. and Woolverton C.J. (2010). Microbiologie. De Boeck. 3eme
72. Purcarea, C., Evans, D. R., & Hervé, G. (1999). Channeling of carbamoyl phosphate to the pyrimidine and arginine biosynthetic pathways in the deep sea hyperthermophilic archaeon *Pyrococcus abyssi*. *Journal of Biological Chemistry*, 274(10), 6122-6129.
73. Purcarea, C., Hervé, G., Ladjimi, M. M., & Cunin, R. (1997). Aspartate transcarbamylase from the deep-sea hyperthermophilic archaeon *Pyrococcus abyssi*: genetic organization, structure, and expression in *Escherichia coli*. *Journal of bacteriology*, 179(13), 4143-4157.

Q

74. Qin, S., Li, W. J., Dastager, S. G., & Hozzein, W. N. (2016). Actinobacteria in special and extreme habitats: Diversity, function roles, and environmental adaptations. *Frontiers in microbiology*, 7, 1415.

R

75. Rangaswami, G., Bagyaraj, D. J., & David, D. J. (2004). *Agricultural Microbiology* (2nd ed.). Prentice-Hall of India
76. Rateb M.E, Ebel R, & Jaspars M. (2018). Natural Product Diversity of Actinobacteria in the Atacama Desert. *Antonie van Leeuwenhoek*. 111 : 1467-1477.
77. Rateb, M. E., Houssen, W. E., Arnold, M., Abdelrahman, M. H., Deng, H., Harrison, W. T., ... & Jaspars, M. (2011). Chaxamycins A–D, bioactive ansamycins from a hyper-arid desert *Streptomyces* sp. *Journal of Natural products*, 74(6), 1491-1499.
78. Ribeiro, I., Girão, M., Alexandrino, D. A., Ribeiro, T., Santos, C., Pereira, F., ... & Carvalho, M. F. (2020). Diversity and bioactive potential of actinobacteria isolated from a coastal marine sediment in northern Portugal. *Microorganisms*, 8(11), 1691.
79. Robinson-Rechavi, M., Alibés, A., & Godzik, A. (2006). Contribution of electrostatic interactions, compactness and quaternary structure to protein thermostability: lessons from structural genomics of *Thermotoga maritima*. *Journal of molecular biology*, 356(2), 547-557.
80. Ruan, J. S. (2013). Taxonomy and phylogeny of the phylum Actinobacteria. In *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology* (2nd ed., Vol. 5). Springer.

S

81. Salwan, R., & Sharma, V. (2018). Diversity and potential of thermophilic actinomycetes. *International Journal of Applied Microbiology*, 25(2), 67-89.
82. Sarmiento, F., Peralta, R., & Blamey, J. M. (2015). Cold and hot extremozymes: industrial relevance and current trends. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 3, 148.
83. Sarmiento, F., Peralta, R., & Blamey, J. M. (2015). Cold and hot extremozymes: industrial relevance and current trends. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 3, 148.
84. Sarmiento-Vizcaíno, A., González, V., Braña, A. F., Palacios, J. J., Otero, L., Fernández, J., & Blanco, G. (2017). Pharmacological potential of phylogenetically diverse Actinobacteria isolated from deep-sea coral ecosystems of the submarine Avilés Canyon in the Cantabrian Sea. *Microbial ecology*, 73, 338-352.

85. Satyanarayana, T., Littlechild, J., & Kawarabayasi, Y. (2013). Thermophilic microbes in environmental and industrial biotechnology. *Biotechnol. Thermophiles*, 3.
86. Satyanarayana, T., Raghukumar, C., & Shivaji, S. (2005). Extremophilic microbes: diversity and perspectives. *Current science*, 78-90.
87. Schmidt, T. M. (Ed.). (2019). *Encyclopedia of microbiology*. Academic Press.
88. Schrempf, H. Recognition and degradation of chitin by streptomycetes. *Antonie van Leeuwenhoek* 2001, 79, 285-289 Berdy, J. Bioactive microbial metabolites. *J. Antibiot.* 2005, 58, 1-26.
89. Schulz, D., Beese, P., Ohlendorf, B., Erhard, A., Zinecker, H., Dorador, C., & Imhoff, J. F. (2011). Abenquines A–D: Aminoquinone derivatives produced by *Streptomyces* sp. strain DB634. *The Journal of antibiotics*, 64(12), 763-768.
90. Selim, M. S. M., Abdelhamid, S. A., & Mohamed, S. S. (2021). Secondary metabolites and biodiversity of actinomycetes. *Journal of Genetic Engineering and biotechnology*, 19(1), 72.
91. Singh, S. P., Shukla, R. J., & Kikani, B. A. (2013). Molecular diversity and biotechnological relevance of thermophilic actinobacteria. In *Thermophilic Microbes in Environmental and Industrial Biotechnology: Biotechnology of Thermophiles* (pp. 459-479). Dordrecht: Springer Netherlands.
92. Stach, J.E.; Bull, A.T. Estimating and comparing the diversity of marine actinobacteria. *Antonie van Leeuwenhoek* 2005, 87, 3-9.

I

93. Talbot, G. H., Bradley, J., Edwards Jr, J. E., Gilbert, D., Scheld, M., & Bartlett, J. G. (2006). Bad bugs need drugs: an update on the development pipeline from the Antimicrobial Availability Task Force of the Infectious Diseases Society of America. *Clinical infectious diseases*, 42(5), 657-668.
94. Thumar, J. T., Dhulia, K., & Singh, S. P. (2010). Isolation and partial purification of an antimicrobial agent from halotolerant alkaliphilic *Streptomyces aburaviensis* strain Kut-8. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 26, 2081-2087.
95. Trenzchnikova, L., & Azizan, A. (2018). Discovery of actinomycetes from extreme environments with potential to produce novel antibiotics. *Central Asian Journal of Global Health*, 7(1), 337.

U

96. Urbietta, M. S., Donati, E. R., Chan, K. G., Shahar, S., Sin, L. L., & Goh, K. M. (2015). Thermophiles in the genomic era: Biodiversity, science, and applications. *Biotechnology Advances*, 33(6), 633-647.

V

97. Valli S., Suvathi Sugasini S., Aysha OS., Nirmala P., VinothKumar P., Reena A., (2012). Antimicrobial potential of Actinomycetesspecies isolated from marine environment. *Asian. Pacific Journal of Tropical Biomedicine*. 2(6): 469-473.
98. Varma, S., Shah, V., Banerjee, B., & Buddhiraju, K. M. (2014). Change detection of desert sand
99. Ventura, M.; Canchaya, C.; Tauch, A.; Chandra, G.; Fitzgerald, G.F.; Chater, K.F.; van Sinderen, D. Genomics of Actinobacteria: Tracing the evolutionary history of an ancient phylum. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 2007, 71, 495-548.
100. Verma, A., Dhiman, K., Gupta, M., & Shirkot, P. (2015). Bioprospecting of thermotolerant bacteria from Hot Water Springs of Himachal Pradesh for the production of Taq DNA polymerase. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 85, 739-749.
101. Vinogradov, A. E. (2003). DNA helix: the importance of being GC-rich. *Nucleic acids research*, 31(7), 1838-1844.

W

102. Wang, H. F., Li, L., Zhang, Y. G., Hozzein, W. N., Zhou, X. K., Liu, W. H., ... & Li, W. J. (2015). *Arthrobacter endophyticus* sp. nov., an endophytic actinobacterium isolated from root of *Salsola affinis* CA Mey. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 65(Pt_7), 2154-2160.
103. Wang, W., Cai, B., & Shao, Z. (2014). Oil degradation and biosurfactant production by the deep sea bacterium *Dietzia maris* As-13-3. *Frontiers in microbiology*, 5, 711.
104. Wibowo, M., Gotfredsen, C. H., Sasseti, E., Melchiorson, J., Clausen, M. H., Gram, L., & Ding, L. (2020). Azodyrecins A–C: Azoxides from a Soil-Derived *Streptomyces* Species. *Journal of Natural Products*, 83(12), 3519-3525.
105. Wink, J., Mohammadipanah, F., & Kazemi Shariat Panahi, H. (2017). Practical aspects of working with actinobacteria. *Biology and Biotechnology of Actinobacteria*, 329-376.

Y

106. Yanmis D. and Adiguzel A., Molecular Typing of Thermophilic Bacilli isolated from Different Hot Springs of Turkey, *Res J Biotech*, 9(10), 83-88 (2014).

107. Yanmis, D., Baltaci, M. O., Gulluce, M., & Adiguzel, A. (2015). Identification of thermophilic strains from geothermal areas in Turkey by using conventional and molecular techniques. *Res J Biotechnol*, *10*(1), 39-45.
108. Young, K. B. (2025). Harnessing Geosmin: Exploring Innovative and Sustainable Strategies for Mosquito Control.

Z

109. Zhao, L., Geng, J., Guo, Y., Liao, X., Liu, X., Wu, R., ... & Zhang, R. (2015). Expression of the *Thermobifida fusca* xylanase Xyn11A in *Pichia pastoris* and its characterization. *BMC biotechnology*, *15*, 1-12.

Les Annex

Les Annex

BD Milieu de culture déshydraté Difco™ : Milieu ISP 2

Gélose d'extrait de malt de levure du projet international Streptomyces

Format de milieux	Extrait de levure 4 g/l, extrait de malt 10 g/l, dextrose 4 g/l, gélose 20 g/l
Type	Gélose à malt ISP levure
Durée de conservation	1460 jours
Format	Déshydraté
Certifications/Conformité	CE
Conditions de stockage	Réfrigéré
À utiliser avec (application)	Pour caractériser les espèces de Streptomyces selon le projet international Streptomyces
Quantité	500 g
Type de milieu	Gélose à malt ISP-levure (milieu 2)
Conditionnement	Flacon

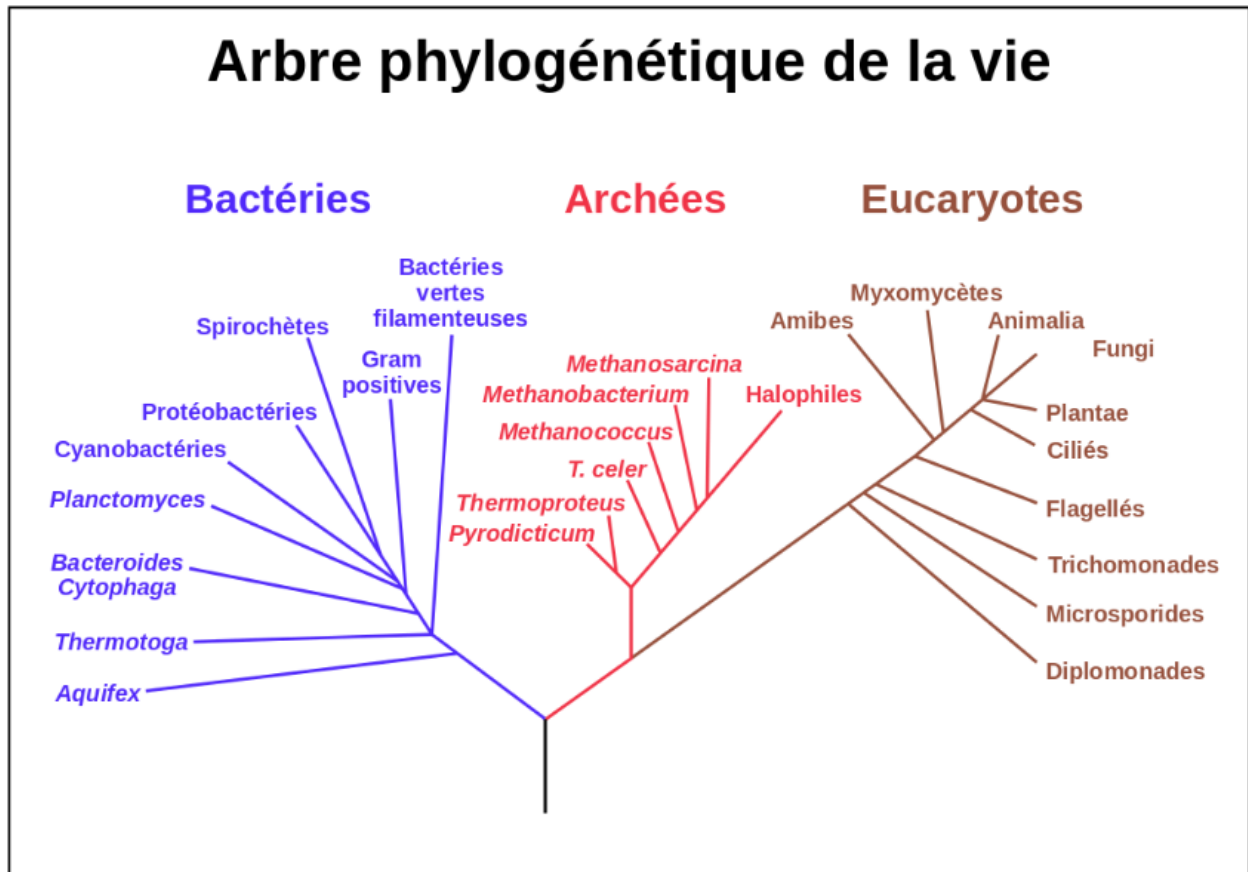


Figure 7 : Arbre phylogénétique du monde vivant d'après Woese et al. (1990)

BERNARD, S. (2025). Début du vivant et enregistrement fossile. *Terre archéenne et protérozoïque: Enfance et adolescence de la planète Terre*, 267.

ملخص

من بين مجموعة الكائنات الحية الدقيقة المتنوعة التي تنتج عوامل مضادة للميكروبات، تحتل الفطريات الشعاعية المحبة للحرارة مكانة بارزة. تُصنف هذه الكائنات الحية على أنها بكتيريا خيطية، وهي كائنات دقيقة قادرة على البقاء على قيد الحياة والتطور في البيئات ذات درجات الحرارة العالية. وكثيراً ما توجد في بيئات مثل التربة الحارة أو أكوام السماد العضوي أو الينابيع الساخنة. وأثبتت هذه الكائنات قدرة عالية على إنتاج مركبات نشطة بيولوجياً، لا سيما المضادات الحيوية التي تُستخدم لمكافحة البكتيريا والفطريات وأحياناً الفيروسات. تتميز الفطريات الشعاعية المحبة للحرارة بتنوع أنشطتها البيولوجية. فهي تنتج مجموعة واسعة من المواد الفعالة، بما في ذلك الإنزيمات المحبة للحرارة والمضادات الحيوية والمركبات المضادة للأورام. كما أنها تساعد على تحسين خصوبة التربة عن طريق تحليل المواد العضوية المعقدة. تُستخدم هذه الكائنات الحية في مجموعة واسعة من التطبيقات، بما في ذلك في القطاع الطبي لتصميم عقاقير جديدة، وفي الزراعة كمبيدات حيوية طبيعية لمكافحة الأمراض النباتية، وفي صناعة التكنولوجيا الحيوية لإنتاج إنزيمات فعالة على النحو الأمثل في درجات الحرارة العالية.

Abstract

Among the diversity of microorganisms producing antimicrobial agents, thermophilic actinomycetes occupy a prominent place. These organisms are classified as filamentous bacteria, which are micro-organisms capable of surviving and growing in high-temperature environments. They are frequently found in environments such as hot soils, compost heaps or hot springs. These organisms have proved highly capable of producing bioactive compounds, notably antibiotics, which are used to combat bacteria, fungi and sometimes even viruses. Thermophilic actinomycetes are characterized by the diversity of their biological activities. They produce a wide range of active substances, including thermophilic enzymes, antibiotics and antitumor compounds. In addition, their action contributes to improving soil fertility through the decomposition of complex organic matter. These organisms are used in a wide range of applications, including in the medical sector for the design of new drugs, in the agricultural sector as natural biocides to combat plant pathologies, and in the biotechnology industry for the production of enzymes that are optimally effective at high temperatures.

Résumé

Parmi la diversité des micro-organismes producteurs d'agents antimicrobiens, les actinomycètes thermophiles occupent une place prépondérante. Ces organismes sont classés dans la catégorie des bactéries filamenteuses, qui sont des micro-organismes capables de subsister et de se développer dans des environnements à haute température. On les trouve fréquemment dans des milieux tels que les sols chauds, les tas de compost ou encore les sources chaudes. Ces organismes se sont révélés très capables de produire des composés bioactifs, notamment des antibiotiques, qui sont utilisés pour lutter contre les bactéries, les champignons et parfois même les virus. Les actinomycètes thermophiles se caractérisent par la diversité de leurs activités biologiques. Ils sont producteurs d'une large gamme de substances actives, parmi lesquelles des enzymes thermophiles, des antibiotiques et des composés antitumoraux. En outre, leur action contribue à l'amélioration de la fertilité des sols par la décomposition de matières organiques complexes. Ces organismes sont employés dans de multiples applications, notamment dans le secteur médical pour la conception de nouveaux médicaments, dans le domaine agricole en tant que biocides naturels pour lutter contre les pathologies végétales, et dans l'industrie biotechnologique pour la production d'enzymes qui manifestent une efficacité optimale à des températures élevées.