

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

جامعة باجي مختار - عنابة

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT DE BIOCHIMIE  
LABORATOIRE DE BIOCHIMIE ET MICROBIOLOGIE APPLIQUEE



**THÈSE**

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT

**DOMAINE : Sciences de la Nature et de la Vie**

**FILIERE : Sciences Biologiques**

**SPECIALITE : Microbiologie Environnementale et Sanitaire**

**THEME**

Isolement et caractérisation phénotypique et  
génotypique des Actinomycètes endophytes associées  
aux herbacées du genre *Artemisia*

**Présentée par : M<sup>lle</sup> Mena Belkis**

**Directeur de la thèse : M. CHEKIREB Djamel Prof., Université Badji Mokhtar Annaba**

**Membres de Jury**

**Présidente : Mme GACEMI-KIRANE Djamila Prof., Université Badji Mokhtar Annaba**

**Examineurs : Mr KADRI Skander Prof., Université Badji Mokhtar Annaba**

**Examinatrice : Mme AOUN Leila Prof., Université Chadli Bendjedid El-Tarf**

**Année universitaire : 2025/2026**

## REMERCIEMENTS

Je rends avant tout grâce à Dieu le Tout-Puissant, pour la force, la patience et la persévérance qu'Il m'a accordées tout au long de ce travail.

J'exprime ma profonde reconnaissance à Monsieur **Chekireb Djamel**, Professeur à l'Université Badji Mokhtar d'Annaba, pour avoir dirigé cette thèse de doctorat. Je le remercie sincèrement pour son encadrement rigoureux, sa disponibilité constante, ses conseils avisés ainsi que pour la confiance qu'il m'a témoignée. Ses qualités scientifiques et humaines ont largement contribué à la réalisation de ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements à Madame **Gacemi-Kirane Djamilia**, Professeure à l'Université Badji Mokhtar d'Annaba, pour l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant de présider le jury de cette thèse. J'exprime également ma gratitude à Monsieur **Kadri Skander**, Professeur à la même université, pour avoir accepté de faire partie du jury. Mes remerciements s'adressent également à Madame **Aoun Leila**, Professeur à l'Université d'El-Taref, d'avoir accepté de juger ce travail.

Je tiens à remercier Madame **Maria de Fátima Carvalho, Inês Ribeiro, Mariana Oliveira, Patri, Margarida Pereira** et **Sofia Correia** chercheuses au centre **CIIMAR – Interdisciplinary Centre of Marine and Environmental Research**, Université de Porto (Portugal), pour leur collaboration précieuse dans l'identification moléculaire et pour leurs conseils éclairés.

Ma gratitude s'étend à Madame **Berredjem Hajira**, Directrice du Laboratoire de Biochimie et Microbiologie Appliquée (LBMA), pour son accompagnement et ses orientations scientifiques pertinentes.

Je remercie également Monsieur **Ladjama** et Madame **Kerouf Marwa** pour leurs conseils dans la partie enzymatique de ce travail. Je souhaite exprimer mes remerciements à Mademoiselle **Rahal Sarah, Boufafa Mouna, Slimani Hanene, Kout Amira** et **Kerouf Linda** pour leur précieuse assistance au laboratoire, ainsi qu'à Madame **Dendani Nadjette** et **Trad Bouteina** pour leur aide dans la réalisation des analyses statistiques. Mes remerciements vont également à Madame **Amamra Amani** et **Kerboua Sarah** pour la collecte des souches pathogènes et des antibiotiques, ainsi qu'à Monsieur **Taibi Adel** pour sa participation au traitement des figures. Je tiens aussi à remercier Monsieur **Ghazioui Mohamed Lamine, Menail Aimen Adib** et **Mahmoud** pour la collecte des échantillons provenant des régions de Tamanrasset et Djanet.

Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble du personnel technique du département de Biochimie, ainsi qu'à toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Enfin, j'exprime ma profonde gratitude à mes parents, pour leur amour, leur soutien et leurs prières constantes, ainsi qu'à mes sœurs **Zineb, Chaima** et **Roumaissa**, mes beaux-frères **Abdelghafour** et **Ibrahim**, mes cousines **Imen, Manel, Youssra, Asma, Kawter, Soumaya** et **Sara**, mes tantes, mes oncles, et ma nièce **Djoumana** pour leur appui moral tout au long de ce parcours académique.

# SOMMAIRE

<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b>	<b>I</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b>II</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	<b>III</b>
<b>RESUME</b>	<b>IV</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>1</b>
<b>I. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
<b>1. Présentation de la plante <i>Artemisia</i></b>	<b>4</b>
1.1. Historique	4
1.2. Description de la plante <i>Artemisia</i>	4
1.2.1. Partie aérienne	4
1.2.2. Partie souterraine ou racinaire	5
1.3. Classification	5
1.4. Composition chimique de la plante	6
1.4.1. Composés polyphénoliques	6
1.4.2. Terpènes	6
1.4.2.1. Monoterpènes	6
1.4.2.2. Sesquiterpènes	6
1.4.3. Huiles essentielles	6
1.5. Usage	7
1.6. Toxicité	7
1.7. Écologie de la plante <i>Artemisia</i>	7
1.8. Distribution d' <i>Artemisia</i> en Algérie	7
<b>2. Actinomycètes endophytes</b>	<b>11</b>
2.1. Définition des endophytes	11
2.2. Les Actinomycètes	12
2.2.1. Historique	12
2.2.2. Définition des Actinomycètes	12
2.2.3. Actinomycètes endophytes	13
2.2.4. Taxonomie et critères de classification des actinomycètes	14
2.2.4.1. Critères de classification	14
2.2.4.2. Évolution de la classification des actinomycètes	15
2.2.5. Morphologie et cycle de vie des actinomycètes	17
2.2.5.1. Morphologie des actinomycètes	17
2.2.5.2. Le cycle de vie	18
2.2.6. Écologie et Habitats	19
2.2.7. Halotolérance	20
2.2.8. Intérêt des Actinomycètes	20
<b>3. Le genre <i>Streptomyces</i></b>	<b>21</b>
3.1. Historique	21
3.2. Définition du genre <i>Streptomyces</i>	21
3.3. Classification des <i>Streptomyces</i>	21

3.3.1.	Critères de classification	22
3.3.1.1.	Critères morphologiques	22
3.3.1.2.	Critères moléculaires	23
3.3.1.3.	Développements de méthodes d'identification moléculaire	24
3.3.1.4.	Reclassification du Genre <i>Streptomyces</i>	25
3.4.	Morphologie et type de spores du genre <i>Streptomyces</i>	27
3.5.	Écologie et Habitats	28
3.6.	Intérêt des <i>Streptomyces</i>	28
3.7.	Métabolites secondaires dérivés de <i>Streptomyces</i>	29
3.7.1.	Production d'antibiotiques et activité antibactérienne	29
3.7.2.	Production d'enzymes	30
3.7.3.	Solubilisation du phosphate	31
4.	Le genre <i>Micromonospora</i>	31
4.1.	Historique	31
4.2.	Définition	31
4.3.	Classification	32
4.3.1	Critères de classification	32
4.3.1.1.	Critères morphologiques	32
4.3.1.2.	Critères moléculaires	32
4.3.1.3.	Développements de méthodes d'identification moléculaire	32
4.4.	Isolement du genre <i>Micromonospora</i> en Algérie	32
4.5.	Morphologie et type de spores	32
4.6.	Écologie et habitats	32
4.7.	Intérêt	33
4.7.1.	Métabolites secondaires	33
4.7.1.1.	Production d'antibiotiques et activité antibactérienne	33
4.7.1.2.	Production d'enzymes	33
4.7.1.3.	Solubilisation du phosphate	33
5.	Le genre <i>Nonomuraea</i>	33
5.1.	Historique	33
5.2.	Définition	33
5.3.	Classification	34
5.3.1.	Critères de classification	34
5.3.1.1.	Critères morphologiques	34
5.3.1.2.	Critères chimiotaxonomiques et moléculaires	34
5.3.1.3.	Développements récents	34
5.4.	Isolement du genre <i>Nonomuraea</i>	34
5.5.	Morphologie et types de spores	35
5.6.	Écologie et habitats	35
5.7.	Intérêt	35
5.7.1.	Métabolites secondaires	35
5.7.2.	Production d'enzymes	35
5.7.3.	Applications agronomiques	35
6.	Le genre <i>Nocardiosis</i>	36
6.1.	Historique	36
6.2.	Définition	36
6.3.	Classification	36
6.3.1.	Critères de classification	36

6.3.1.1.	Critères morphologiques	36
6.3.1.2.	Critères chimiotauxonomiques et moléculaires	36
6.3.1.3.	Développements récents	36
6.4.	Isolement du genre <i>Nocardiopsis</i>	36
6.5.	Morphologie et types de spores	37
6.6.	Écologie et habitats	37
6.7.	Intérêt	37
6.7.1.	Métabolites secondaires	37
6.7.2.	Production d'enzymes	37
6.7.3.	Applications biotechnologiques et agronomiques	37
7.	Le genre <i>Gordonia</i>	38
7.1.	Historique	38
7.2.	Définition	38
7.3.	Classification	38
7.3.1.	Critères de classification	38
7.3.1.1.	Critères morphologiques	38
7.3.1.2.	Critères chimiotauxonomiques et moléculaires	38
7.3.1.3.	Développements récents	38
7.4.	Isolement du genre <i>Gordonia</i>	38
7.5.	Morphologie et types de spores	39
7.6.	Écologie et habitats	39
7.7.	Intérêt	39
7.7.1.	Métabolites secondaires	39
7.7.2.	Production d'enzymes	39
7.7.3.	Applications biotechnologiques et agronomiques	39

## II. MATERIEL ET METHODES

1.	Site d'étude	40
2.	Échantillonnage	42
2.1.	Récolte des plants d' <i>Artemisia</i>	42
2.2.	Préparation des échantillons	44
2.2.1.	Désinfection de la surface des plants	44
2.3.	Préparation des suspensions des échantillons	45
3.	Isolement des actinomycètes endophytes	45
4.	Purification et conservation des souches	47
5.	Étude de la diversité des actinomycètes endophytes	48
5.1.	Étude macroscopique	48
5.2.	Étude microscopique	48
6.	Caractéristiques physiologiques	49
7.	Extraction d'ADN et identification moléculaire des souches endophytes par séquençage du gène de l'ARNr 16S	49
7.1.	Extraction de l'ADN génomique	49
7.2.	Dosage de la quantité d'ADN	51
7.3.	Amplification par PCR de l'ARNr 16S	52
7.4.	Électrophorèse sur gel d'agarose et révélation des bandes d'ADN	52
7.5.	Séquençage des produits de PCR, analyse des séquences et identification des isolats	52
7.6.	Analyses phylogénétiques des souches endophytes	52
9.	Recherche de l'activité antibactérienne	53

10.	Tests de sensibilité aux antibiotiques des souches endophytes	54
11.	Solubilisation du phosphate	55
12.	Criblage des souches endophytes pour la production d'enzymes extracellulaires	56
12.1.	Activité Protéasique	56
12.2.	Activité amylolytique	56
12.3.	Recherche de xylanases	56
12.4.	Activité cellulolytique	56
12.5.	Activités pectinolytiques	56
12.6.	Activité lipolytique	57
12.7.	Activité estérololytique	57
12.8.	Recherche de gélatinases	57
12.9.	Recherche de la catalase	57
13.	Analyse statistique	58

### III. RESULTATS ET DISCUSSION

1.	Présentation des résultats	60
1.1.	Isolement, purification et sélection des actinobactéries endophytes d' <i>Artemisia</i> (Identification des actinobactéries endophytes des plantes médicinales du genre <i>Artemisia</i> )	60
2.	Caractéristiques physiologiques et biochimiques	71
3.	Analyse phylogénétique des souches d'actinomycètes endophytes d' <i>Artemisia</i> spp. par séquençage du gène de l'ARNr 16S	75
3.1.	Caractérisation moléculaire des isolats	75
3.2.	Séquençage du gène de l'ARNr 16S des isolats endophytes	76
3.3.	Analyse phylogénétique	77
4.	Activité antibactérienne des isolats endophytes	86
5.	Sensibilité aux antibiotiques des actinomycètes endophytes	92
6.	Solubilisation du phosphate	94
7.	Recherche d'enzymes extracellulaires chez les actinomycètes	96
8.	Caractéristiques biotechnologiques des actinobactéries endophytes	100

### IV. DISCUSSION

Conclusion et perspectives	110
References bibliographiques	114
Annexes	145

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

<b>Abréviation</b>	<b>Description</b>
<b>ANOVA</b>	Analysis of Variance (Analyse de la variance)
<b>ISP</b>	International Streptomyces Project (Projet International Streptomyces)
<b>IS</b>	Indice de Solubilisation
<b>BLAST</b>	Basic Local Alignment Search Tool
<b>NCBI</b>	National Center for Biotechnology Information
<b>MEGA</b>	Molecular Evolutionary Genetics Analysis (Logiciel d'analyse de génétique moléculaire et évolutive)
<b>MUSCLE</b>	Multiple Sequence Comparison by Log-Expectation (Algorithme d'alignement multiple de séquences)
<b>SD</b>	Standard Deviation (Écart type)
<b>TSA</b>	Tryptic Soy Agar (Gélose Tryptone Soja)
<b>S.A.R.M</b>	Staphylococcus aureus Résistant aux Méthicillines
<b>CMI</b>	Concentration Minimale Inhibitrice
<b>MBC</b>	Concentration Minimale Bactéricide
<b>RMN</b>	Résonance Magnétique Nucléaire
<b>HE</b>	Huiles Essentielles
<b>DAP</b>	Acide Diaminopimélique
<b>PCR</b>	Polymerase Chain Reaction (Réaction en chaîne par polymérase)
<b>ADN</b>	Acide Désoxyribonucléique
<b>ARNr</b>	Acide Ribonucléique Ribosomique
<b>MLSA</b>	Analyse des Séquences Multilocus
<b>LPSN</b>	List of Prokaryotic names with Standing in Nomenclature
<b>DDH</b>	DNA–DNA Hybridization (Hybridation ADN–ADN)
<b>WGS</b>	Whole Genome Sequencing (Séquençage du génome entier)
<b>OGRI</b>	Overall Genome Relatedness Index (Indice global de parenté génomique)
<b>MK</b>	Menaquinone (vitamine K <sub>2</sub> )
<b>NRRL</b>	Northern Regional Research Laboratory (USA - collection de cultures)
<b>DSM</b>	Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen (Allemagne - collection de cultures)
<b>CCTCC</b>	China Center for Type Culture Collection (Chine - collection de cultures)
<b>KCTC</b>	Korean Collection for Type Cultures (Corée du Sud - collection de cultures)
<b>MS</b>	Matière Sèche

## LISTE DES FIGURES

N°Figure	Titre	Page
<b>Figure.1</b>	Morphologie générale de la plante <i>Artemisia</i> spp. (Pottier, 1981).	<b>5</b>
<b>Figure.2</b>	Présentation d' <i>Artemisia judaica</i> (Quezal et al. 1994).	<b>10</b>
<b>Figure.3</b>	<i>Artemisia herba-alba</i> de la région de Biskra (Bezza et al. 2010).	<b>11</b>
<b>Figure.4</b>	Micromorphologie de quelques espèces d'actinomycètes appartenant à différents genres. (Observations au microscope électronique à balayage).	<b>18</b>
<b>Figure.5</b>	Développement du cycle de vie du genre <i>Streptomyces</i> dans un milieu solide (Ait Barka et al. 2016)	<b>19</b>
<b>Figure.6</b>	Nouvelles espèces de <i>Streptomyces</i> . D'après SAJ News of Actinomycetologica	<b>22</b>
<b>Figure.7</b>	Morphologie et subdivision des différentes chaînes de spores chez les, <i>Streptomyces</i> sept sections morphologiques (Pridham et al. 1958).	<b>28</b>
<b>Figure.8</b>	Répartition géographique de la plante <i>Artemisia</i> spp. en Algérie. La carte montrant les huit sites de prélèvement situés dans le Sud-Ouest ; Sud-Est et Sud de l'Algérie. Les détails figurent dans le Tableau.3.	<b>42</b>
<b>Figure.9</b>	Plante <i>Artemisia</i> spp	<b>44</b>
<b>Figure.10</b>	Etapes de la désinfection de plante	<b>45</b>
<b>Figure.11</b>	Suspension des échantillons	<b>45</b>
<b>Figure.12</b>	Isolement des actinomycètes endophytes.	<b>47</b>
<b>Figure.13</b>	Conservation des souches	<b>47</b>
<b>Figure.14</b>	Etapes d'extraction d'ADN utilisant le Kit ADN bactérien E.Z.N.A.®.	<b>51</b>
<b>Figure.15</b>	Amplification par PCR et électrophorèse sur gel d'agarose.	<b>53</b>
<b>Figure.16</b>	Préparation des suspensions	<b>54</b>
<b>Figure.17</b>	Morphologie et couleur du mycélium aérien et de substrat des isolats endophytes d' <i>Artemisia</i> spp. récolté de la Sebkhia-Ezzemoul, du Djebel Bou Arif, du Djebel Arris, d'Oued Djerat, de Djebel Ilamane, de Djebel Aissa, d'Al Mansourah et El Hamel en Algérie.	<b>62</b>
<b>Figure.18</b>	Aspect du mycélium (aérien et substrat) des isolats endophytes sur les différents milieux de cultures (ISP1, ISP2, ISP4, ISP5, MPA, FAA, FSA).	<b>64</b>
<b>Figure.19</b>	Aspect microscopique des mycéliums de quelques isolats d'actinobactéries endophytes, structure des filaments et disposition des spores (objectif ×100).	<b>70</b>
<b>Figure.20</b>	Croissance de l'isolat AR5 à différentes concentrations en NaCl	<b>71</b>
<b>Figure.21</b>	Production de pigment mélanoidé sur milieu gélosé à la tyrosine (ISP7)	<b>74</b>
<b>Figure.22</b>	Electrophorèse sur gel d'agarose des produits de la PCR du gène de l'ARNr 16S.	<b>76</b>
<b>Figure.23</b>	Arbre phylogénétique des isolats endophytes d' <i>Artemisia</i> spp. et de leurs plus proches espèces d'actinobactéries dans GenBank.	<b>83</b>
<b>Figure.24</b>	Arbre phylogénétique des isolats endophytes d' <i>Artemisia judaica</i> L. ssp. <i>sahariensis</i> (région de Tamanrasset) et de leurs plus proches espèces d'actinobactéries dans GenBank.	<b>84</b>
<b>Figure.25</b>	Arbre phylogénétique des isolats endophytes d' <i>Artemisia judaica</i> L.	<b>85</b>

	ssp. <i>sahariensis</i> (région de Djanet) et de leurs plus proches espèces d'actinobactéries dans GenBank.	
<b>Figure.26</b>	Activités antibactériennes des isolats endophytes vis-à-vis <i>S. aureus</i> 29213, <i>E. coli</i> 29522, <i>P. aeruginosa</i> 29553 et <i>S. typhimurium</i> 14028.	<b>87</b>
<b>Figure.27</b>	Solubilisation du phosphate par des isolats endophytes associés aux racines et aux feuilles d'espèces d' <i>Artemisia</i> collectées dans les régions du sud-est, du sud-ouest et du sud de l'Algérie, évaluée à l'aide du milieu gélosé de Pikovskaya.	<b>96</b>
<b>Figure.28</b>	Production d'enzymes extracellulaires par des isolats endophytes associés aux racines et aux feuilles d' <i>Artemisia judaica</i> L. ssp. <i>sahariensis</i> , collectées à Oued Djerat (Djanet) et Djebel Ilamane (Tamanrasset), Algérie.	<b>99</b>
<b>Figure.29</b>	Production d'enzymes extracellulaires par des isolats endophytes de <i>Streptomyces</i> associés aux racines et aux feuilles d'espèces d' <i>Artemisia</i> collectées dans les régions du sud-est, du sud-ouest et du sud de l'Algérie.	<b>99</b>
<b>Figure.30</b>	Production de catalase par quelques isolats endophytes	<b>100</b>

## LISTE DES TABLEAUX

N°Tableau	Titre	Page
<b>Tableau.1</b>	Actinomycètes endophyte d' <i>Artemisia</i> spp.	<b>13</b>
<b>Tableau.2</b>	Classes, ordres et familles du phylum des actinobactéries (Goodfellow et al. 2012).	<b>16</b>
<b>Tableau.3</b>	Répartition géographique de la plante <i>Artemisia</i> dans le Sud-Est ; Sud-ouest et sud de l'Algérie.	<b>40</b>
<b>Tableau.4</b>	Caractéristiques des sites d'échantillonnages localisés dans le Sud-Est ; Sud-ouest et sud de l'Algérie.	<b>41</b>
<b>Tableau.5</b>	Différentes parties de la plante avant stérilisation	<b>43</b>
<b>Tableau.6</b>	Compositions des différents milieux de cultures utilisés (1litre)	<b>46</b>
<b>Tableau.7</b>	Composition des milieux ISP (ISP1 à ISP5) utilisés pour la caractérisation morphologique des actinobactéries endophytes.	<b>48</b>
<b>Tableau.8</b>	Liste des antibiotiques utilisés pour le profil des actinomycètes.	<b>55</b>
<b>Tableau.9</b>	Composition des milieux de culture pour l'activité enzymatique des souches d'actinomycètes isolés	<b>58</b>
<b>Tableau.10</b>	Répartition et origine des isolats endophytes par site et par milieu de culture.	<b>61</b>
<b>Tableau.11</b>	Caractérisation morphologique des isolats étudiés après mise en culture sur le milieu FSA.	<b>65</b>
<b>Tableau.12</b>	Caractéristiques physiologiques et biochimiques des isolats endophytes associés aux racines et feuilles des espèces d' <i>Artemisia</i> collectées dans les régions sud-est, sud-ouest et sud de l'Algérie.	<b>72</b>
<b>Tableau.13</b>	Concentration d'ADN génomique des isolats endophytes	<b>75</b>
<b>Tableau.14</b>	Taille des séquences de 16S rRNA des isolats endophytes	<b>76</b>
<b>Tableau.15</b>	Identification taxonomique des isolats endophytes associés aux racines et feuilles des espèces d' <i>Artemisia</i> collectées dans les régions sud-est, sud-ouest et sud de l'Algérie, et numéro d'accession correspondant dans GenBank.	<b>78</b>
<b>Tableau.16</b>	Activités antibactériennes des isolats endophytes vis-à-vis <i>S. aureus</i> 29213, <i>E.coli</i> 29522, <i>P.aeruginosa</i> 29553 et <i>S. typhimurium</i> 14028.	<b>89</b>
<b>Tableau.17</b>	Activités antibactériennes des <i>Streptomyces</i> endophytes vis-à-vis <i>S. aureus</i> 29213, <i>E.coli</i> 29522, <i>P.aeruginosa</i> 29553 et <i>S. typhimurium</i> 14028.	<b>90</b>
<b>Tableau.18</b>	Concentrations minimales inhibitrices (CMI) des isolats actinobactériennes endophytes bioactives vis-à-vis les bactéries pathogènes de référence ( <i>S. aureus</i> 29213, <i>E. coli</i> 29522, <i>P. aeruginosa</i> 29553 et <i>S. typhimurium</i> 14028)	<b>91</b>
<b>Tableau.19</b>	Concentrations minimales inhibitrices (CMI) des <i>Streptomyces</i> endophytes bioactives vis-à-vis les bactéries pathogènes de référence ( <i>S. aureus</i> 29213, <i>E. coli</i> 29522, <i>P. aeruginosa</i> 29553 et <i>S. typhimurium</i> 14028)	<b>92</b>
<b>Tableau.20</b>	Profil de résistance aux antibiotiques des <i>Streptomyces</i> endophytes associés aux racines et aux feuilles d'espèces d' <i>Artemisia</i> collectées dans les régions sud-est, sud-ouest et sud de l'Algérie	<b>94</b>
<b>Tableau.21</b>	Indice de solubilisation du phosphate (IS) (Moyenne ± écart type) des actinobactéries endophytes associées aux racines et aux feuilles	<b>95</b>

	d'espèces d' <i>Artemisia</i> collectées dans les régions du sud-est, du sud-ouest et du sud de l'Algérie.	
<b>Tableau.22</b>	Production d'enzymes extracellulaires par des actinobactéries endophytes associées aux racines et aux feuilles d' <i>Artemisia judaica</i> L. ssp. <i>sahariensis</i> , collectées à Oued Djerat (Djanet) et Djebel Ilamane (Tamanrasset), en Algérie.	<b>97</b>
<b>Tableau.23</b>	Production d'enzymes extracellulaires par des <i>Streptomyces</i> endophytes associés aux racines et aux feuilles d'espèces d' <i>Artemisia</i> collectées dans les régions du sud-est, du sud-ouest et du sud de l'Algérie.	<b>98</b>

# **RESUME**

## RESUME

Les actinobactéries endophytes, connues pour leurs relations symbiotiques avec les plantes et leur capacité à produire des composés bioactifs, se rencontrent dans divers environnements, y compris les déserts. Les conditions extrêmes du Sahara – limitation en nutriments, températures élevées et salinité – favorisent des adaptations microbiennes uniques, faisant de cette région un réservoir prometteur de nouveaux taxons. La présente étude rapporte, pour la première fois, l'isolement et la caractérisation d'actinobactéries endophytes issues de trois plantes médicinales des habitats extrêmes d'Algérie : *Artemisia judaica* L. ssp. *sahariensis*, *Artemisia campestris* et *Artemisia herba-alba* Asso, collectées dans des régions de sebkha, montagne et désert. Un total de 82 isolats a été obtenu à partir des tissus racinaires et foliaires et identifiés par séquençage du gène 16S rRNA, indiquant leur appartenance à cinq genres : *Micromonospora*, *Nonomuraea*, *Nocardiopsis*, *Gordonia* et principalement *Streptomyces*. Les isolats ont été caractérisés sur les plans morphologique, physiologique et bioactif, incluant la production de pigments, la tolérance au stress salin (NaCl), la solubilisation du phosphate, la production d'enzymes extracellulaires et l'activité antibactérienne. Les isolats ont toléré jusqu'à 5 % de NaCl, tandis que (AJR36, AJR38, AJR16, AR5) ont pu résister à 15–20 %. La solubilisation du phosphate a été observée chez 31% des souches. Les tests enzymatiques ont montré que 24 % des isolats produisent plusieurs enzymes hydrolytiques (amylase, protéase, cellulase, lipase, estérase, pectinase, gélatinase, xylanase), les souches AL1, AL3, AR14, AR23 et AR6 présentant des profils enzymatiques larges. Les essais antibactériens ont révélé que 83 % des isolats inhibaient au moins un pathogène testé, les souches les plus actives présentant des valeurs de concentration minimale inhibitrice comprises entre 4 et 8 µg/mL. Ces résultats mettent en évidence la diversité des actinobactéries endophytes associées aux environnements désertiques et de sebkha à forte salinité soulignent le potentiel biotechnologique des souches associées à *Artemisia* comme sources de nouveaux agents antibactériens, d'enzymes et de traits favorisant la croissance des plantes.

### Mots-clés :

Actinobactéries endophytes ; *Artemisia* spp. ; environnements extrêmes ; enzymes hydrolytiques ; activité antibactérienne ; solubilisation du phosphate ; potentiel biotechnologique.

## ABSTRACT

Endophytic actinobacteria, known for their symbiotic relationships with plants and their ability to produce bioactive compounds, are found in diverse environments, including deserts. The extreme conditions of the Sahara—nutrient limitation, high temperatures, and salinity—favor unique microbial adaptations, making this region a promising reservoir of novel taxa. The present study reports, for the first time, the isolation and characterization of endophytic actinobacteria from three medicinal plants inhabiting extreme environments in Algeria: *Artemisia judaica* L. ssp. *sahariensis*, *Artemisia campestris*, and *Artemisia herba-alba* Asso, collected from sebkha, mountain, and desert regions. A total of 82 isolates were obtained from root and leaf tissues and identified by 16S rRNA gene sequencing, indicating their affiliation with five genera: *Micromonospora*, *Nonomuraea*, *Nocardiopsis*, *Gordonia*, and predominantly *Streptomyces*. The isolates were characterized morphologically, physiologically, and bioactively, including pigment production, tolerance to salt stress (NaCl), phosphate solubilization, extracellular enzyme production, and antibacterial activity. The isolates tolerated up to 5% NaCl, while strains AJR36, AJR38, AJR16, and AR5 were able to withstand concentrations of 15–20%. Phosphate solubilization was observed in 31% of the strains. Enzymatic assays showed that 24% of the isolates produced multiple hydrolytic enzymes (amylase, protease, cellulase, lipase, esterase, pectinase, gelatinase, xylanase), with strains AL1, AL3, AR14, AR23, and AR6 exhibiting broad enzymatic profiles. Antibacterial assays revealed that 83% of the isolates inhibited at least one tested pathogen, with the most active strains displaying minimum inhibitory concentration (MIC) values ranging from 4 to 8  $\mu\text{g/mL}$ . These findings highlight the diversity of endophytic actinobacteria associated with desert and high-salinity sebkha environments and underscore the biotechnological potential of *Artemisia*-associated strains as promising sources of novel antibacterial agents, enzymes, and plant growth-promoting traits.

### Keywords:

Endophytic actinobacteria; *Artemisia* spp.; extreme environments; hydrolytic enzymes; antibacterial activity; phosphate solubilization; biotechnological potential.

## الملخص

تُعرف الأكتينوبكتيريا الداخلية بعلاقتها التكافلية مع النباتات وقدرتها على إنتاج المركبات الحيوية النشطة، وهي توجد في بيئات متنوعة، بما في ذلك الصحارى. إنّ الظروف القاسية في الصحراء الكبرى – من محدودية العناصر الغذائية وارتفاع درجات الحرارة والملوحة – تعزز تكيفات ميكروبية فريدة، مما يجعل هذه المنطقة خزانًا وأعدًا لأنواع ميكروبية جديدة. تُعدّ هذه الدراسة الأولى من نوعها التي تُبلغ عن عزل وتوصيف أكتينوبكتيريا داخلية من ثلاث نباتات طبية تنمو في بيئات قاسية بالجزائر، وهي *Artemisia judaica* L. ssp. *sahariensis*، و *Artemisia campestris*، و *Artemisia herba* Asso *alba*، والتي جُمعت من مناطق السبخ والجبال والصحراء. تم الحصول على ما مجموعه 82 عزلة من أنسجة الجذور والأوراق، وتم تحديدها من خلال تسلسل جين *S rRNA16*، مما أشار إلى انتمائها إلى خمسة أجناس *Micromonospora*، و *Nonomuraea*، و *Nocardiosis*، و *Gordonia*، وبشكل رئيسي *Streptomyces*.

وقد تم توصيف هذه العزلات من النواحي المورفولوجية والفسولوجية والبيولوجية، بما في ذلك إنتاج الأصباغ، وتحمل الإجهاد الملحي (NaCl)، وإذابة الفوسفات، وإنتاج الإنزيمات خارج الخلوية، والنشاط المضاد للبكتيريا. أظهرت العزلات قدرة على تحمل تركيزات ملحية تصل إلى 5%، في حين تمكنت السلالات AJR36 و AJR38 و AJR16 و AR5 من مقاومة تراكيز تتراوح بين 15-20%. لوحظت قدرة على إذابة الفوسفات لدى 31% من السلالات. وأظهرت الاختبارات الإنزيمية أن 24% من العزلات تنتج عدة إنزيمات تحليلية (الأميلاز، البروتياز، السيلولاز، الليباز، الإستيراز، البيكتيناز، الجيلاتيناز، والزيلاناز)، حيث أظهرت السلالات AL1 و AL3 و AR14 و AR23 و AR6 نشاطًا إنزيميًا واسعًا. كشفت الاختبارات المضادة للبكتيريا أن 83% من العزلات قامت بتثبيط نمو ما لا يقل عن أحد العوامل الممرضة المختبرة، وقد أظهرت السلالات الأكثر نشاطًا قيم تركيز مثبّط أدنى (MIC) تراوحت بين 4 و 8 ميكروغرام/مل. تُبرز هذه النتائج تنوع الأكتينوبكتيريا الداخلية المرتبطة بالبيئات الصحراوية والسبخ عالية الملوحة، وتؤكد الإمكانيات الحيوية والتقنية للسلالات المرتبطة بنبات *Artemisia* كمصادر واعدة لعوامل مضادة للبكتيريا، وإنزيمات، وصفات محفزة لنمو النبات.

### الكلمات المفتاحية:

الأكتينوبكتيريا الداخلية؛ *Artemisia* spp؛ البيئات القاسية؛ الإنزيمات التحليلية؛ النشاط المضاد للبكتيريا؛ إذابة الفوسفات؛ الإمكانيات البيوتكنولوجية.

# **INTRODUCTION GENERALE**

## Introduction

L'Algérie possède une flore médicinale riche et diversifiée, dans laquelle les espèces du genre *Artemisia*, largement distribuées dans les régions semi-arides et arides, occupent une place importante (Quezel et al. 1963). Ces plantes sont utilisées en médecine traditionnelle et moderne pour leurs multiples propriétés biologiques, notamment analgésiques, antibactériennes, antispasmodiques, hémostatiques, antifongiques, antioxydantes et allélopathiques (Mohamed et al. 2010). Parmi elles, *Artemisia judaica* L. ssp. *sahariensis*, endémique des régions sahariennes de Tamanrasset et Djanet, est particulièrement réputée pour ses activités antioxydantes et antispasmodiques, sans toxicité aiguë rapportée (Belkhiter et al. 2025). Traditionnellement, cette plante aromatique est employée dans le traitement des affections gastro-intestinales, cutanées et cardiovasculaires, ainsi que pour renforcer l'immunité et favoriser la cicatrisation (Mohammed et al. 2022).

Les espèces d'*Artemisia* établissent des relations symbiotiques avec des actinobactéries endophytes, qui colonisent les tissus internes (racines, tiges, feuilles, graines, fleurs et organes reproducteurs) sans provoquer de dommages (Alanzi et al. 2023 ; AbdelRazek et al. 2019, 2023). Ces endophytes, ayant coévolué avec leurs hôtes, contribuent à leur résilience en produisant des métabolites secondaires impliqués dans la tolérance aux stress environnementaux et la défense contre les pathogènes (Kealey et al. 2017). Ces métabolites incluent des composés antimicrobiens, antioxydants et anticancéreux, ainsi que des substances favorisant la croissance des plantes, leur conférant ainsi un intérêt à la fois thérapeutique et agricole (Veilumuthu et al. 2024 ; Tanvir et al. 2019 ; Yushchuk et al. 2021).

Ces dernières années, une attention croissante a été portée aux caractéristiques fonctionnelles des endophytes, notamment à leurs rôles dans les interactions symbiotiques avec les plantes médicinales (Khan et al. 2017). Les actinobactéries endophytes associées aux plantes du genre *Artemisia* offrent de multiples avantages à leurs hôtes, principalement grâce à leurs activités biologiques. De nombreuses recherches sur les composés bioactifs issus des extraits d'*Artemisia*, la diversité et les mécanismes fonctionnels des actinobactéries associées demeurent mal connus (Qin et al. 2012). La plupart des actinobactéries endophytes isolées à partir de tissus végétaux appartiennent au genre *Streptomyces*, producteur de métabolites secondaires bioactifs et de composés à potentiel thérapeutique (Qin et al. 2012 ; Zhao et al. 2011).

Des recherches se sont concentrées sur *Artemisia annua*, mais d'autres espèces comme *Artemisia herba-alba* hébergent également des endophytes. Des souches de *Streptomyces* isolées de *A. herba-alba* présentent des propriétés antimicrobiennes, tandis que des taxons rares tels que *Streptomyces endophyticus* et *Rhodococcus artemisiae* illustrent la richesse microbienne de ce genre (El-Shatoury et al. 2022 ; Li et al. 2013 ; Zhao et al. 2012b). Plusieurs espèces de *Streptomyces* endophytes sont isolées d'*Artemisia annua*, notamment *S. endophyticus* (Li et al. 2013) et *S. artemisiae* (Zhao et al. 2010). En Algérie, *A. herba-alba* abrite une diversité d'actinobactéries bioactives, (Djemouai et al. (2024). en Égypte d'autres études mettant en évidence la bioactivité de souches de *Streptomyces* isolées (El-Shatoury et al. 2022). Par ailleurs, des micro-organismes associés à la rhizosphère d'*A. herba-alba* et d'autres plantes médicinales des écosystèmes désertiques algériens ont également été signalés, soulignant le potentiel biotechnologique et l'importance ethnomédicinale de ces habitats arides (Bona et al. 2021 ; Djemouai et al. 2022a, b ; Aouar et al. 2012, 2021 ; Djemouai et al. 2024).

La diversité et les rôles fonctionnels des actinobactéries endophytes chez *Artemisia* spp. ; en particulier en milieux arides ; restent encore peu caractérisés. Ces symbiotes contribuent à la vitalité de l'hôte en produisant des composés bioactifs, notamment des antibiotiques, des enzymes et des régulateurs de croissance. Parmi eux, le genre *Streptomyces* se distingue par sa capacité à synthétiser une vaste gamme de métabolites pharmacologiquement actifs (Li et al. 2013 ; Djemouai et al. 2024 ; Khan et al. 2017 ; Qin et al. 2012). Chez les espèces *Artemisia judaica*, *Artemisia herba-alba* et *Artemisia campestris*, plusieurs genres d'actinobactéries, notamment *Streptomyces*, *Micromonospora*, *Nocardioides* et *Pseudonocardia*, sont fréquemment associés à la promotion de la croissance végétale ainsi qu'à des activités antimicrobiennes, en raison de leur capacité à produire divers métabolites bioactifs (El-Shatoury et al. 2022). Par ailleurs, d'autres genres tels que *Nocardioopsis*, *Rhodococcus* et *Saccharopolyspora* jouent un rôle important dans l'enrichissement de la diversité écologique et fonctionnelle des communautés microbiennes associées à ces espèces végétales (Singh et al. 2018). En plus de leurs propriétés bioactives, les actinobactéries endophytes possèdent une forte capacité de biodégradation de polymères organiques complexes tels que la lignocellulose, l'hémicellulose, l'amylopectine, le xyloglucane, la pectine et les triglycérides. Les espèces de *Streptomyces* sont particulièrement connues pour produire un large éventail d'enzymes hydrolytiques, notamment cellulases, amylases, xylanases, pectinases, lipases et estérases (McCarthy et Stanley 1992 ; Tuomela et al. 2000 ; Narayana et al. 2007 ; Mukhtar et al. 2017 ; Gopalakrishnan et al. 2021). Ces traits enzymatiques renforcent à la fois leur importance écologique et leur potentiel industriel (Mukhtar et al. 2017 ; Gopalakrishnan et al. 2021).

La présente étude explore la biodiversité et le potentiel bioactif des actinobactéries endophytes associées aux racines et aux feuilles de trois espèces d'*Artemisia* : *Artemisia judaica* L. ssp. *sahariensis*, *Artemisia campestris* et *Artemisia herba-alba* Asso; collectées de divers biotopes extrêmes en Algérie:

- ***Sebkha-Ezzemoul***, caractérisée par une salinité comprise entre 20 et 30 % durant la période allant de mars à mai (Amarouayache et al. 2010)
- **Zones montagneuses et désertiques** ; Djebel Bou Arif, Djebel Arris, Oued Djerat, Djebel Ilamane, Djebel Aïssa, Al Mansourah et El Hamel.

Trente et un échantillons d'*Artemisia* ont été utilisés pour l'isolement et la caractérisation taxonomique des actinobactéries endophytes. L'évaluation de leur potentiel biosynthétique a porté sur la production d'enzymes hydrolytiques, la solubilisation du phosphate, la tolérance au NaCl, la synthèse de pigments mélanoidiens, la sensibilité aux antibiotiques et l'activité antibactérienne. À notre connaissance, il s'agit de la première étude de la biodiversité des actinobactéries endophytes, leurs propriétés antibactériennes et leurs capacités enzymatiques associées aux racines et aux feuilles d'espèces d'*Artemisia* adaptées aux environnements extrêmes en Algérie.

# **SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

## 1. Présentation de la plante *Artemisia*

### 1.1. Historique

Le genre *Artemisia* créé par Tournefort en 1700 appartient à la famille des Composées, sous-famille de Corymbifères ou Radiées, tribu des Anthémidées.

Le nom latin d'*Artemisia* aurait deux origines possibles : soit du nom grec de Diane, Artemis, qui présidait aux accouchements et secourait les femmes malades, soit du nom de la femme de Mausole, roi de Carie (**Gardon, 1913**).

### 1.2. Description de la plante *Artemisia*

Le genre *Artemisia* appartient à la famille des Astéracées, avec plus de 350 espèces différentes qui se trouvent principalement dans les zones arides et semi arides d'Europe, d'Amérique, d'Afrique du Nord et d'Asie.

La plante présente une odeur caractéristique d'huile de thymol et un goût amer d'où son caractère astringent (**Nabli, 1989**).

**Ouyahya (1987)**, mentionne 58 taxons observés sur le pourtour méditerranéen, 20 sont présents au Maghreb et au Sahara 12 au Maroc, 11 en Algérie, 6 en Tunisie, 5 en Libye, 4 en Égypte.

Les espèces communes aux Nord et Sud du bassin méditerranéen sont : *Artemisia arborescens*, *A. herba-alba*, *A. absinthium*, *A. vulgaris*, *A. Campestris* subsp. *glutinosa*, *A. verlotorum*, *A. Scoparia*, puis les espèces du sud : *A. atlantica* var. *typica*, *A. judaica* subsp. *sahariensis*, *A. alba* subsp. *chitachensis*, *A. atlantica* var. *maroccana*, *A. flahautti*, *A. ifranensis*, *A. mesatlantica*, *A. negrei*, *A. reptans*, *A. alba* subsp. *kabylica*. et *A. monosperma*.

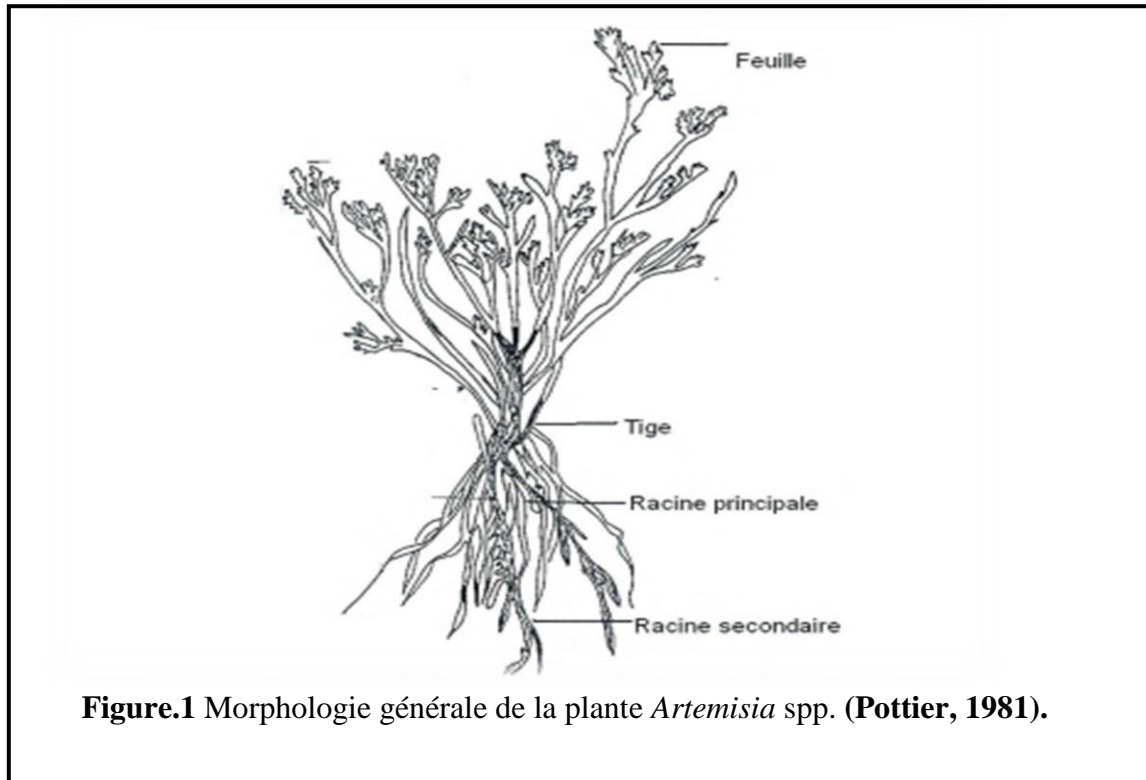
*Artemisia* est une plante herbacée à tiges ligneuses et ramifiées, vivace de 30-50 cm de long. Les tiges sont rigides et droites et les feuilles sont courtes, généralement pubescentes avec un aspect argenté (**Figure.1**).

#### 1.2.1 Partie aérienne

- **Tiges** : ses tiges sont florifères et élancées, un peu velues (**Ozenda, 1983 ; Baba Aissa, 2000**). La partie ligneuse, ramifiée de 30 à 50 centimètres de long, très feuillée avec une couche épaisse. La touffe des tiges est plus importante selon la pluviométrie (**Ozenda, 1985**).
- **Feuilles** : ses feuilles sont oblongues, découpées en segments de couleur vert foncé sur la face et blanc cotonneux sur leur partie inférieure (**Ozenda, 1983 ; Baba Aissa, 2000**). Elles sont courtes, alternées, très divisées, laineuses, blanches, pubescentes et pennatipartites. Elles diminuent de taille au fur et à mesure que les rameaux s'allongent. Cette diminution de taille des feuilles entraîne une réduction considérable de la surface, et par conséquent, permet à la plante de résister à la sécheresse (**Pourrat, 1974**).

### 1.2.2 Partie souterraine ou racinaire

Elle se présente sous forme d'une racine principale, ligneuse et épaisse, bien distincte des racines secondaires et qui s'enfonce dans le sol tel un pivot. La racine pénètre profondément jusqu'à 40 à 50 centimètres et ne se ramifie qu'à cette profondeur (Aidoud, 1988). La croissance végétative de la plante a lieu à l'automne, la floraison commence en Juin et se développe essentiellement en fin d'été.



### 1.3. Classification

Le genre *Artemisia* appartient à la famille des Asteraceae, il possède une grande importance économique.

*Artemisia* est le plus grand et le plus diversifié genre de la famille des Asteraceae (Martin et al. 2001 ; Watson et al. 2002 ; Martin et al. 2003).

#### Hiérarchie taxonomique selon Valles et McArthur (2001) :

**Règne :** *Plantae*

**Sous- Règne :** *Tracheobionta*

**Super division :** *Spermatophyta*

**Division :** *Magnoliophyta*

**Classe :** *Magnoliopsida*

**Sous classe :** *Asteridae*

**Ordre :** *Asterales*

**Famille :** *Asteraceae*

**Genre :** *Artemisia* L.

## 1.4. Composition chimique de la plante

Au Maghreb, *Artemisia* constitue un fourrage particulièrement intéressant. En effet, la plante présente un taux de cellulose beaucoup moins élevé bien que son aspect extérieur indique l'inverse (17 à 33%). La matière sèche (MS) apporte entre 6 et 11% de matière protéique brute dont 72% est constituée d'acides aminés. Le taux de  $\beta$ -carotène varie entre 1,3 et 7mg/kg selon les saisons.

Les plantes de la famille des Astéracées, auquel appartient le genre *Artemisia*, ont fait l'objet de plusieurs études phytochimiques par intérêt économique surtout pour leurs huiles essentielles. Les molécules identifiées sont les sesquiterpènes lactones, les coumarines et les hydrocarbures acétyléniques (**Bruneton, 1999**).

### 1.4.1. Composés polyphénoliques

La plante est riche en composés polyphénoliques, qui sont les meilleurs antioxydants, flavonoïdes et tanins. Le terme flavonoïde désigne une très large gamme des composés naturels appartenant à la famille des polyphénols. Ils sont considérés comme des pigments quasi lents universels des végétaux, souvent responsables de la coloration des fleurs, des fruits et parfois des feuilles (**Kim et al. 2004**).

### 1.4.2. Terpènes

Les terpènes sont des polymères constitués d'unités en C5.

#### 1.4.2.1. Monoterpènes

Les monoterpènes (en C10) sont des substances légèrement volatiles qui forment les huiles essentielles. Ils protègent les végétaux contre les parasites, inhibent la croissance bactérienne. Les principaux monoterpènes identifiés dans l'Armoise herbe blanche sont le thujone (monoterpène lactone), le 1,8-cinéol et le thymol14.

#### 1.4.2.2. Sesquiterpènes

Les sesquiterpènes (3 unités en C5) et des sesquiterpènes lactones sont identifiés chez plusieurs chémotypes du Moyen-Orient (**Patocka et Plucar, 2003**). Les sesquiterpènes lactones sont parmi les produits naturels trouvés dans les espèces d'*Artemisia* et sont en grande partie responsable de l'importance de ces plantes en médecine et en pharmacie. Plusieurs types de sesquiterpènes lactones ont été trouvés dans les parties aériennes d'*Artemisia herba alba*: des eudesmanolides, germacranolides, guainalides, et xanthonolides (**Moufid et Eddouks, 2012**).

### 1.4.3. Huiles essentielles

L'huile d'*Artemisia* contient principalement des monoterpénoïdes, oxygénés, tels que le 1,8-cinéole, le chrysanthenone, le chrysanthenol et son acétate,  $\alpha$  et  $\beta$ thuyone et le camphre (**Feuerstein et al. 1988**).

En Algérie, des études sur la composition de l'huile essentielle d'*Artemisia herba alba* ont montré que le camphre, l' $\alpha$  /  $\beta$ -thujone, le 1,8-cinéole et les dérivés du chrysanthenyl sont les principaux composants.

Selon d'autres études, le camphène (3%), le bornéol (3.6%), l'éther davana (8.8%), le davanone (36.1%) sont les principaux composants (**Dahmani-Hamzani et Baaliouamer ; 2011**).

L'huile essentielle obtenue à partir des parties aériennes d'*Artemisia herba alba* récoltées de Msila-Algérie, contient principalement le camphre (19.4%), le transpinocarveol (16.9%), le chrysanthenone (15.8%) (**Dob et Ben Abdelkader, 2006**).

## 1.5. Usage

L'armoise est connue en Algérie comme un remède très populaire auquel on a souvent recours pour faciliter la digestion, calmer les douleurs abdominales et les maladies du foie. Ses racines sont indiquées contre certains troubles nerveux. Elle est vermifuge, facilite la digestion, et utilisée comme remède contre la rougeole, les faiblesses musculaires et contre l'inflammation du tractus gastro-intestinal (**Baba Aissa, 2000**).

## 1.6. Toxicité

Les huiles essentielles d'*Artemisia* ne sont pas des produits qui peuvent être utilisés sans risque en phytothérapie. Comme tous les produits naturels, à fortes doses, l'armoise est abortive, neurotoxique et hémorragique.

## 1.7. Ecologie de la plante *Artemisia*

C'est une plante cosmopolite, pollinisée par le vent et principalement distribuée dans les zones tempérées de milieux à hautes altitudes de l'hémisphère nord, colonisant paysage des environnements arides et semi-arides, et n'a que peu de représentants dans l'hémisphère sud.

En Algérie, elle se trouve dans les zones arides et semi-arides. L'Asie centrale est son centre de diversification, tandis que la Méditerranée et l'Amérique du Nord-Ouest sont deux zones de spéciation (**McArthur et Plummer, 1978 ; Valles et McArthur, 2001**).

## 1.8. Distribution d'*Artemisia* en Algérie

Les Astéracées sont distribuées dans l'Atlas saharien avec un pourcentage de 35 à 40% dans la flore saharienne (**Ozanda, 1991 ; Quezel, 1965**).

En Algérie, **Quezel et Santa (1963)** ont mentionné 11 taxons appartenant au genre *Artemisia* (*A. herba-alba*, *A. absinthium* L., *A. arborescens* L., *A. judaica* L., *A. atlantica* A. *alba*, *A. campestris* L. ssp. *campestris*, *A. campestris*).

Certains sont très rares dans les hautes montagnes. En revanche, d'autres sont très répandus et abondantes dans les régions steppiques et sahariennes. On distingue 3 principales espèces :

➤ *Artemisia campestris* : Armoise rouge.

- **Classification botanique**

Selon **Caratini (1971)**, la plante *Artemisia campestris* est classée dans :

**Règne** : *Plantae*

**Embranchement :** *Spermatophyta*

**Classe :** *Magnoliopsida*

**Sous classe :** *Asteridae*

**Ordre :** *Asterales*

**Famille :** *Asteraceae*

**Genre :** *Artemisia*

**Espèce :** *Artemisia campestris*.

- **Répartition :** zone pré-désertique et steppique au nord du Sahara septentrional.
- **Habitat :** lits d'oueds ; elle est aussi répandue au sud algérien (El Golea, Tiout, et Ain sefra), au Sahara central (Hoggar et tassili) et dans les régions arides et semi-arides de l'Algérie. (Mahmoudi, 1995 ; Ali-Delille, 2010).
- **Période de floraison :** Aout – septembre. (Quezel et Santa, 1962).
- **Principes actifs de la plante :** L'armoise rouge contient une variété de composés bioactifs. Selon Wichtl et Anton (2003), son huile essentielle est composée de 1,8-cinéol, camphre, linalol, thuyone, ainsi que d'acides et d'alcools sesquiterpéniques, comme les lactones sesquiterpéniques (vulgarine), des flavonoïdes (quercétol-3-O-glucoside, rutine), des coumarines (esculétol, esculoside, coumarol), des dérivés polyactyléniques, des caroténoïdes, de l'acide caféique, de l'acide férulique et des glucosides cyanogénétiques. Baba Aissa (1999) mentionne que l'armoise rouge renferme également des lactones amères (vulganine), des flavones, des stérols, des tanins, des résines.
- **Propriétés thérapeutiques :** Les espèces du genre *Artemisia*, utilisées depuis l'Antiquité par les Grecs, Romains, Perses et Arabes, sont reconnues pour leurs propriétés anthelminthiques et stomachiques (Chopra et al. 1960). L'armoise rouge, en particulier, est utilisée pour ses effets emménagogues, antiépileptiques, vulnéraires, vermifuges, antispasmodiques, antihémorragiques, hémostatiques, ainsi que pour traiter les ascarides et lombrics. Elle est également antivenimeuse et aide à calmer les troubles digestifs, comme les maux d'estomac et les nausées. En application externe, elle est utilisée en cataplasme pour les crampes, la dysménorrhée, et en tant que cicatrisant pour les blessures et brûlures (Meftah, 2001 ; Ali-Delille, 2010 ; Baba Aissa, 2011).

➤ *Artemisia judaica* : Armoise de judée

- **Classification botanique :**

**Règne :** *Plantae*

**Embranchement :** *Spermatophyta*

**Classe :** *Magnoliopsida*

**Sous classe :** *Asteridae*

**Ordre :** *Asterales*

**Famille :** *Asteraceae*

**Genre :** *Artemisia*

**Espèce :** *Artemisia judaica* L.

- **Répartition :** Cette plante est largement répandue dans le Sahara Oriental et particulièrement abondante dans le Sahara central, notamment à In-Amenas et Tamanrasset. Elle est cependant plus rare dans l'Est du Sahara septentrional (**Maie, 1934 ; Ozenda, 1985**).
- **Habitat :** Elle pousse en montagne de 1200m à 1800m d'altitude, elle se présente en une steppe de 50 cm de hauteur. Rencontrées dans les lits sablonneux, limoneux des oueds en Algérie (**Benchelah et al. 2004**), et elle possède une très forte odeur.
- **Période de floraison :** Janvier-Avril (**Quezel et Santa, 1962**) (**Figure.2**).
- **Principes actifs de la plante :** Selon **Saleh et al. (1987)**, dix-sept glycosides flavonoïdes ont été isolés et identifiés à partir d'*Artemisia judaica* L. ssp. *sahariensis*. L'analyse des parties aériennes de cette plante a permis de découvrir huit nouvelles lactones sesquiterpéniques, dont deux seco-eudesmanolides, deux eudesmanolides et quatre lactones glucosides, dont les structures ont été élucidées grâce à la RMN à haut champ (**Khafagy et al. 1988**).  
En Algérie, **Charchari (2002)** a étudié la composition chimique de l'huile essentielle d'*Artemisia judaica* L. ssp. *sahariensis*, récoltée lors de la floraison à proximité de Tamanrasset (région de l'Oued Azemzi). Il a identifié 95 % des composants chimiques, parmi lesquels les trois principaux étaient le pipéritone (53,5 %), la chrysanthénone (9,8 %) et l'acétate de cis-chrysanthenyl (7,4 %).
- **Propriétés thérapeutiques :** Selon **Ramdane et al. (2015)**, *Artemisia judaica* L. ssp. *sahariensis* est utilisée par les habitants du Hoggar sous forme d'infusion pour traiter diverses affections. Elle est employée en usage interne pour les helminthiases, les maladies digestives (vomissements, constipation, coliques), les maladies nerveuses, les maladies respiratoires, la fièvre, l'ictère et la dysménorrhée.

L'étude de **Benmansour et al. (2016)** en Algérie a montré que l'huile essentielle d'*Artemisia judaica* L. ssp. *sahariensis* possède un excellent effet inhibiteur contre *Staphylococcus aureus* résistant aux méthicillines (S.A.R.M) et *Bacillus subtilis*.



Figure.2 Présentation d'*Artemisia judaica* (Quezal et al. 1994).

➤ *Artemisia herba alba* : Armoise Blanche

- **Classification botanique :**
  - Règne :** *Plantae*
  - Embranchement :** *Spermatophyta*
  - Classe :** *Magnoliopsida*
  - Sous classe :** *Asteridae*
  - Ordre :** *Asterales*
  - Famille :** *Asteraceae*
  - Genre :** *Artemisia*
  - Espèce :** *Artemisia herba alba*
- **Répartition :** plante steppique très peu rencontrée au Sahara septentrional, dans lits d'oueds.
- **Habitat :** En Algérie présente une vaste répartition géographique, couvrant quatre millions d'hectares, elle est prédominante dans les zones semi-arides à arides autour de bassin méditerranéen (Quezal et Santa, 1962 ; Nabil, 1989). Elle est aussi abondante dans les zones steppiques et les Hauts plateaux et le Sahara (Quezal et Santa, 1962).
- **Période végétation :** Floraison en Avril-Mai (Figure.3).
- **Principes actifs de la plante :** Les constituants de l'armoïse blanche ont été caractérisés, notamment les flavonoïdes (Salah et al. 2005 ; Saleh al. 1987), les sesquiterpènes lactoniques (Ahmed et al. 1990 ; Boriky et al. 1996 ; Laid et al. 2008), ainsi que les mono- et sesquiterpènes présents dans ses huiles essentielles (HE). L'HE d'*Artemisia herba-alba* provenant d'Algérie contient principalement du camphre, de l' $\alpha$ - et  $\beta$ -thujone, de l'eucalyptol et des dérivés chrysanthényles (Vernin et al. 1995 ; Dob et al. 2006).
- **Propriétés thérapeutiques :** En Afrique du Nord, elle est utilisée pour traiter diverses affections, telles que la bronchite, les abcès, les diarrhées, et comme vermifuge (Gharabi et Sand, 2008). Elle facilite la digestion, calme les douleurs abdominales et hépatiques, aide dans le traitement du diabète, et est également vermifuge (Belakhdar,

1997 ; **Baba Aissa, 2000**). Les racines de la plante sont efficaces contre les convulsions (**Baba Aissa, 2000**).

Les extraits aqueux d'armoise blanche possèdent des activités antileishmaniose, antigénotoxiques, antidiabétiques, antibactériennes et antispasmodiques (**Bakkali et al. 2006 ; Hatimi et al. 2000 ; Marrif et al. 1995 ; Yashphe et al. 2008**). De son côté, l'huile essentielle (HE) de l'armoise blanche présente des activités antimicrobiennes et antifongiques (**Charchari et al. 1996**).



## 2. Actinomycètes endophytes

### 2.1. Définition des endophytes

Les bactéries endophytes sont définies comme des bactéries qui colonisent le tissu interne des plantes, mais ne présentent aucun signe externe d'infection ou d'effet négatif sur leur hôte.

Les endophytes sont des espèces microbiennes vivant en symbiose ou relation mutualiste entre différentes parties des plantes comme racines, graines, fleurs, fruits, tiges et feuilles sans provoquer d'effets négatifs (**Abdel Razek et al. 2019; Alanzi et al. 2023, Abdel Razek et al. 2023**).

Les endophytes ont co-évolué avec les plantes depuis le début de leur existence et participe dans la production de métabolites secondaires et la lutte contre les stress environnementaux et les agents pathogènes attaquants (**Kealey et al. 2017**).

Quelques endophytes produisent des enzymes comme les acylases et les lactonases ; d'autres ont évolué pour produire des produits chimiques, qui agissent par quorum sensing pour supprimer la pathogénèse microbienne (**Pellissier et al. 2021**).

L'opportunité de trouver des micro-organismes endophytes nouveaux et bénéfiques parmi la diversité des plantes dans différents écosystèmes est considérable (**Ryan et al. 2008**).

## 2.2. Les Actinomycètes

### 2.2.1. Historique

Les actinomycètes ont été isolés pour la première fois par **Cohn en 1875 (Williams et al. 1984)**. Leur présence a été observée pour la première fois dans l'eau en 1879.

En 1898, les premiers actinomycètes thermophiles ont été décrits comme des microorganismes présentant des caractéristiques intermédiaires entre les champignons et les bactéries.

En 1943, Waksman a réussi à isoler un genre d'actinomycètes à partir du sol.

- **1943** : Waksman et Henrici créent le genre *Streptomyces*.
- **1944** : Découverte de la streptomycine produite par *Streptomyces griseus* par le microbiologiste **Selman Waksman**.
- **À partir des années 1960** : L'introduction de méthodes génétiques par Hopwood (**Chater, 1999 ; Hopwood, 1973**) et l'avènement de la génomique (**Hopwood, 2003**) ont modifié la classification des espèces (**Ventura et al. 2007**).

Les actinomycètes se caractérisaient par la présence d'une vraie ramification et par la formation de spores à l'extrémité des filaments.

Les actinomycètes sont considérés comme des microorganismes intermédiaires entre le règne des champignons et celui des bactéries. (**Williams, 1986**).

### 2.2.2. Définition des Actinomycètes

Les actinomycètes sont des bactéries à Gram positif avec un pourcentage élevé de bases (G+C) variant de 65 à 75 %, elles sont également connues sous le nom d'actinobactéries (**Perry et al. 2004**).

Les actinomycètes présentent une croissance filamenteuse qui se développe dans la gélose, créant un mycélium végétatif, tandis qu'à la surface, elles génèrent un mycélium aérien. Ce dernier produit des conidies ou conidiospores.

La différenciation des spores, leur agencement, ainsi que la composition en sucres de la paroi du mycélium, constituent des critères de classification des différents genres de ce groupe (**Larpen Gourgaud et al. 1997**).

La majorité des actinomycètes sont non mobiles. Cependant, la mobilité est observée chez les spores libérées par les sporanges, qui sont flagellées, une caractéristique que l'on retrouve chez les *Actinoplanes* (**Locci, 2005**).

Elles se caractérisent par une croissance plus lente que celle des autres bactéries, pouvant varier de quelques jours à plusieurs semaines, en fonction des espèces et des conditions de culture (**De Jager et al. 2009 ; Saurav et Kannabiran, 2010**).

Sur milieu solide, les actinomycètes se distinguent par une couleur spécifique, tant au niveau du mycélium aérien que de celui du substrat, ces deux couleurs n'étant pas nécessairement identiques. Les teintes courantes incluent le blanc, le gris et le beige. De plus, une pigmentation diffusible dans la gélose, connue sous le nom de pigmentation mélanolide, peut également être observée.

En milieu liquide, le développement des actinomycètes se fait uniquement sous leur

forme primaire. La production de pigments demeure constante pour un type de milieu donné, et la différenciation physiologique y est mieux exprimée, notamment en ce qui concerne la production d'antibiotiques (**Keulen et al. 2003**).

Elles se rencontrent largement dans les écosystèmes terrestres et aquatiques, où elles jouent un rôle crucial dans la décomposition de matériaux complexes provenant de plantes, d'animaux, d'algues et de champignons morts. Ce processus contribue également au recyclage des nutriments et à la formation d'humus (**Sharma, 2014**).

### 2.2.3. Actinomycètes endophytes

Les actinobactéries endophytes ont été isolées à partir d'une large gamme de plantes. Elles peuvent persister à l'intérieur de l'hôte végétal pendant de longues périodes sans provoquer de symptômes visibles de désordre.

Les espèces les plus couramment identifiées appartiennent aux genres *Microbispora*, *Nocardia*, *Micromonospora* et *Streptomyces*.

De nombreuses actinobactéries endophytes, en particulier celles issues de plantes médicinales, démontrent la capacité d'inhiber ou de tuer divers microorganismes pathogènes nuisibles (**Qin et al. 2011**).

La plupart des actinomycètes se trouvent dans des environnements tels que le sol, la rhizosphère et les sédiments des étangs et des lacs, où ils agissent comme saprophytes en dégradant les matières organiques pour se nourrir.

Les actinomycètes endophytes représentent une source prometteuse de nouveaux composés bioactifs. De ce fait, de nombreux chercheurs se consacrent à l'étude de leurs bioactivités et de leurs applications industrielles.

Certains actinomycètes endophytes d'*Artemisia* sont répertoriés dans le **Tableau.1**.

**Tableau.1** Actinomycètes endophyte d'*Artemisia* spp.

Plantes	Régions	Actinomycètes endophytes	Références
<i>Artemisia herba alba</i>	Egypte	<i>Streptomyces</i> sp <i>Kitasatospora</i> sp	(El Shatoury et al. 2006)
<i>Artemisia judaica</i>	Egypte	<i>Nocardia</i> sp	(Moussa et al. 2011)
<i>Artemisia annua</i>	Chine	<i>Streptomyces endophytica</i> sp.nov	(Li et al. 2013)
		<i>Nonomuraea endophyticus</i> sp.nov	(Li et al. 2011)
		<i>Pseudonocardia xishanensis</i> sp.nov	(Zhao et al. 2012a)
		<i>Rhodococcus artemisiae</i> sp.nov	(Zhao et al. 2012b)
		<i>Sphingomonas endophytica</i> sp.nov	(Huang et al. 2012)
<i>Artemisia judaica</i>	Égypte	<i>Streptomyces</i> sp	(El-Shatoury et al. 2013)
		<i>Kitasatospora</i> sp	
		<i>Nocardioides</i> sp	
		<i>Nocardia</i> sp	

		<i>Nocardiopsis</i> <i>Actinomadura</i> <i>Streptoalloeichus</i> sp <i>Promicromonospora</i> sp	
<i>Artemisia argyi</i>	Chine	<i>Glycomyces artemisiae</i> sp	(Zhang et al. 2014)

## 2.2.4. Taxonomie et critères de classification des actinomycètes

Le phylum des Actinobactéries représente l'un des les plus grands groupes taxonomiques dans le domaine des bactéries.

La classification des actinomycètes a évolué au fil du temps, passant par plusieurs phases. Elle a pris de l'ampleur et continue d'être clarifiée et révisée.

### 2.2.4.1. Critères de classification

#### ➤ Critères morphologiques

**Pridham et al. (1948)** ont souligné l'importance de la morphologie des chaînes de spores des *Streptomyces*, regroupant ces espèces en sections morphologiques primaires selon ce critère.

En **1961**, les travaux de **Tresner** et de ses collaborateurs, associés au développement des techniques de microscopie électronique, ont permis d'établir une classification morphologique fondée sur le réarrangement des chaînes de spores et la texture de leur surface, qu'elle soit rugueuse ou lisse.

En **1965**, **Pridham** et ses collaborateurs ont développé un nouveau système de caractérisation des actinomycètes, s'appuyant sur la couleur du mycélium, tant du substrat que de l'aérien. Ils ont proposé une nomenclature pour chaque code de couleur, dans le cadre d'un effort considérable visant à établir une classification morphologique de ces microorganismes.

#### ➤ Critères physiologiques et biochimiques

Une classification fondée sur les similarités des caractères morphologiques, physiologiques et biochimiques des souches cultivées dans des conditions identiques a été proposée, connue sous le nom de taxonomie numérique.

Les résultats obtenus ont permis de regrouper les actinomycètes en plusieurs « clusters » (**Williams et al. 1983**). Cependant, cette technique, moins sensible, est sujette à des erreurs d'interprétation. Avec l'expansion remarquable, en particulier des espèces du genre *Streptomyces*, des investigations intensives ont permis de mettre en évidence la composition chimique de la paroi cellulaire de ces microorganismes. Cette approche, qui se concentre sur l'analyse chimique des constituants cellulaires, est encore utilisée aujourd'hui (**Becker et al. 1965**).

Analyse chimique de la composition cellulaire en :

- les acides aminés : deux acides aminés pariétaux l'acides diaminoprilmilique (DAP) et

lysine et la glycine.

- les sucres : ayant une importance taxonomique : arabinose-galactose ; xylose-arabinose ; et modurose.
- les lipides : qui intervient dans la chimio-taxonomie sont : les phospholipides, les acides mycoliques partiels ainsi les ménoquinones membranaires.

Analyse physiologique consiste à deux tests :

- Des tests de dégradation organique (glucidique, lipidique et protidique, polymères .....etc).
- Des tests de résistance aux différents agents chimique (antibiotiques, divers autre agents), ainsi que la tolérance aux agents physiques (température, pH, salinité...etc).

### ➤ Critères moléculaires

Des techniques moléculaires plus récentes, notamment celles basées sur la PCR et l'étude de l'ARN ribosomique 16S, ont été développées, pour les actinomycètes.

L'analyse des séquences de l'ARNr 16S s'avère être une méthode rapide et fiable. Cette approche consiste à comparer les séquences après alignement avec celles déjà connues et à construire un arbre phylogénétique, mettant en évidence les distances phylogénétiques entre les espèces (**Prescott, 2010**).

À cela s'ajoute l'étude des génomes par des techniques d'hybridation ADN-ADN. Un pourcentage d'homologie élevé, égal ou supérieur à 97 %, permet de considérer deux souches comme appartenant à la même espèce (**Madigan et al. 2011**).

Le développement d'outils d'identification moléculaire, tels que les techniques de PCR et le séquençage de l'ADNr 16S chez les bactéries, a considérablement facilité l'identification des espèces (**Prescott et al. 2010**).

L'identification des actinomycètes demeure un processus complexe, ce groupe microbien présente des séquences d'ADN hautement conservées, même entre espèces différentes.

De plus, les découvertes incessantes de nouvelles espèces soulignent la nécessité d'une approche complémentaire intégrant diverses techniques d'identification.

**Kumar et Goodfellow (2010)** ne soulignent qu'une étude taxonomique polyphasique, qui combine l'analyse des caractères morphologiques, biochimiques et physiologiques ainsi que l'étude phylogénétique, est essentielle pour une classification adéquate des espèces similaires.

Un progrès significatif dans la taxonomie des espèces du genre *Streptomyces* a été réalisé grâce à l'analyse des séquences multilocus (MLSA). Cette méthode repose sur l'étude de gènes domestiques (house keeping genes) spécifiques (tels que *atpD*, *gyrB*, *recA*, *rpoB* et *trpB*), en plus des séquences de l'ARNr 16S et des résultats d'hybridation ADN-ADN. (**Rong et Huang, 2012**).

#### 2.2.4.2. Evolution de la classification des actinomycètes

Selon le **Goodfellow et al. (2012)** le phylum Actinobacteria renferme 6 classes, 23 ordres, 53 familles (**Tableau.2**) et 223 genres.

**Tableau.2** Classes, ordres et familles du phylum des actinobactéries (Goodfellow et al. 2012).

<b>Classes</b>	<b>Ordres</b>	<b>Familles</b>
<b>Actinobacteria</b>	<i>Actinomycetales</i> <i>Actinopolysporales</i> <i>Bifidobacteriales</i> <i>Catenulisporales</i> <i>Corynebacteriales</i>  <i>Frankiales</i>  <i>Glycomycetales</i> <i>Jiangellales</i> <i>Kineosporales</i> <i>Micrococcales</i>  <i>Micromonosporales</i> <i>Propionibacteriales</i> <i>Pseudonocardiales</i> <i>Streptomycetales</i> <i>Streptosporangiales</i>  <i>Incertaesedis</i>	<i>Actinomycetaceae</i> <i>Actinopolysporaceae</i> <i>Bifidobacteriaceae</i> <i>Catenulisporaceae, Actinospicaceae</i> <i>Corynebacteriaceae, Dietziaceae,</i> <i>Mycobacteriaceae, Nocardiaceae,</i> <i>Segniliparaceae, Tsukamerullaceae</i> <i>Frankiaceae, Acidothermaceae,</i> <i>Cryptosporangiaceae,</i> <i>Geodermatophilaceae,</i> <i>Nokamurellaceae</i> <i>Glycomycetaceae</i> <i>Jiangellaceae</i> <i>Kineosporaceae</i> <i>Micrococcaceae, Beutenbergiaceae,</i> <i>Bogoriellaceae, Brevibacteriaceae,</i> <i>Cellulomonadaceae, Dermabacteriaceae,</i> <i>Dermacoccaceae, Dermatophilaceae,</i> <i>Intrasporangiaceae, Jonesiaceae,</i> <i>Micobacteriaceae,</i> <i>Promicomonosporaceae,</i> <i>Rarobacteriaceae, Ruaniaceae,</i> <i>Sanguibacteraceae</i> <i>Micromonosporaceae</i> <i>Propionibacteriaceae, Nocardidoidaceae</i> <i>Pseudonocardiaceae</i> <i>Streptomycetaceae</i> <i>Streptosporangiaceae, Nocardiopticaceae,</i> <i>Thermomonosporaceae</i>
<b>Acidimicrobiia</b>	<i>Acidimicrobiales</i>	<i>Actinomicrobiaceae, Lamiaceae</i>
<b>Coriobacteriia</b>	<i>Coriobacteriales</i>	<i>Coriobacteriaceae</i>
<b>Nitriliruptoria</b>	<i>Nitriliruptorales</i> <i>Euzebyales</i>	<i>Nitriliruptoraceae</i> <i>Euzebyaceae</i>
<b>Rubroacteria</b>	<i>Rubroacterales</i>	<i>Rubroacteraceae</i>
<b>Thermoleophilia</b>	<i>Thermoleophilales</i> <i>Solirubroacterales</i>	

## 2.2.5. Morphologie et cycle de vie des actinomycètes

### 2.2.5.1. Morphologie des actinomycètes

#### ➤ Le mycélium des actinomycètes

Le mycélium aérien est plus ramifié et épais que le mycélium de substrat qu'est hydrophobe. Le mycélium de substrat est aérobic facultatif par contre le mycélium aérien est aérobic strict (**Silvy et Roach, 1975**).

#### ➤ Types de spores

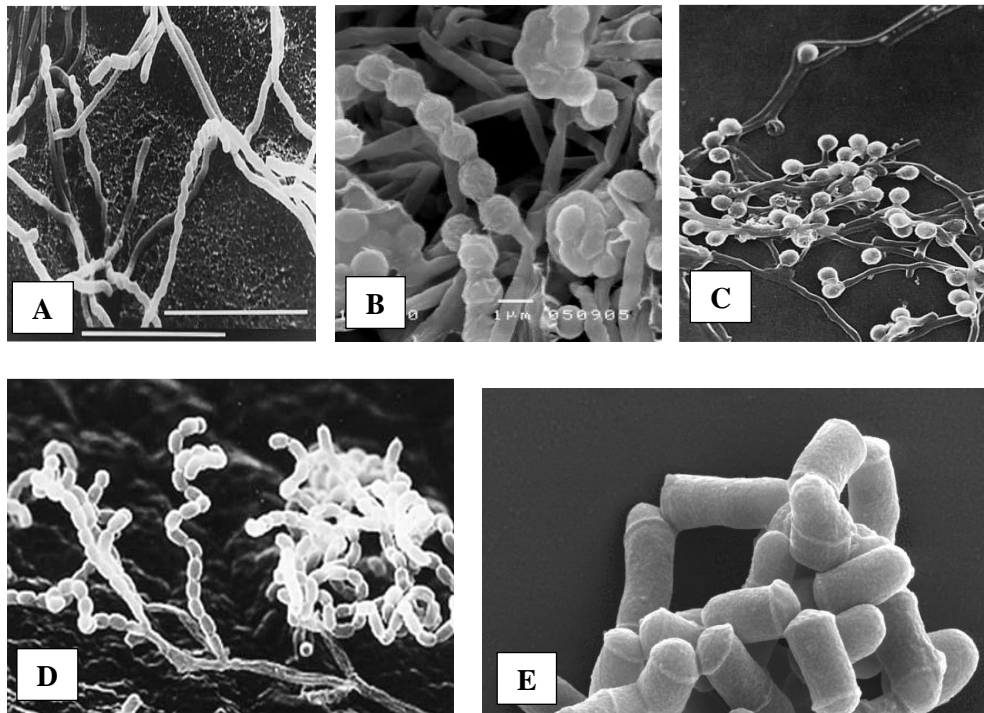
Les actinomycètes se distinguent par la formation de divers types de spores, dont les caractéristiques jouent un rôle important dans leur classification.

Pour les *Streptomyces* filamenteux, les spores se trouvent sur le mycélium aérien, formant des chaînes qui peuvent être droites, flexueuses ou en spirale.

Ces spores peuvent être libres ou reliées entre elles, atteignant jusqu'à 50 spores sur une seule hyphes, ou encore se regrouper dans des sacs appelés sporanges. Cette formation résulte souvent de la segmentation ou de la désarticulation des hyphes (**Hopwood, 2007**).

La surface des spores peut varier de lisse, verruqueuse, épineuse, rugueuse ou poilue (**Dietz et Mathews, 1971**).

La majorité de ces spores sont ovoïdes, sphériques et non mobiles. (**Figure.4**).



**Figure.4** Micromorphologie de quelques espèces d'actinomycètes appartenant à différents genres. (Observations au microscope électronique à balayage).

**A.** *Nocardiosis lucentensis* ATCC 51300 (Yassin et al. 1993) Bar, 1µm.

**B.** *Nonomuraea phyllanthi* sp. (Klykleung et al. 2020) Bar, 1µm.

**C.** *Micromonospora* sp. SF2259 (Miyadoh et al. 2002) Bar, 1µm.

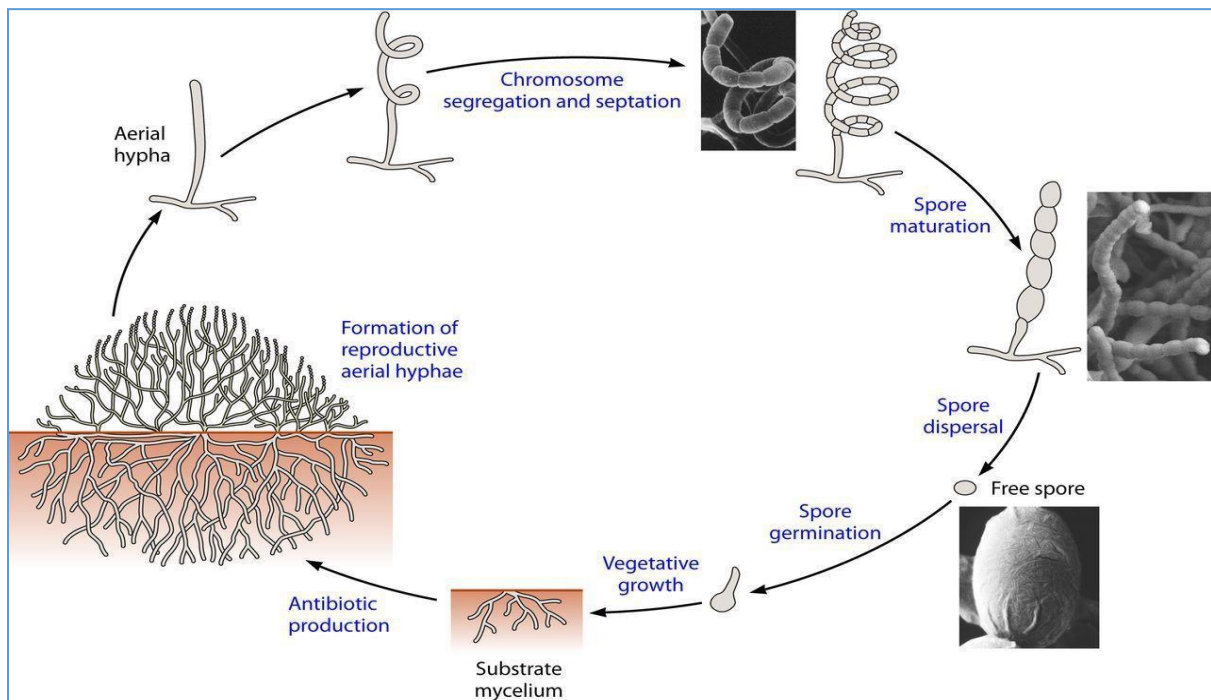
**D.** *Streptomyces* sp. SF2587 (Miyadoh et al. 2002) Bar, 1µm.

**E.** *Gordonia bronchialis* type strain (3410<sup>T</sup>) (Ivanova et al. 2010) Bar, 1µm.

### 2.2.5.2. Le cycle de vie

Les actinomycètes présentent un cycle de vie complexe, résultant de trois processus physiologiques principaux : la croissance végétative, la différenciation cellulaire et la mort (Ait Barka et al. 2016 ; Danilenko et al. 2005).

Ce cycle débute par la germination des spores, donnant naissance à un mycélium primaire constitué de hyphes ramifiés, non fragmentés et ancrés dans le milieu solide. Par la suite, le mycélium de substrat se développe vers la surface, formant le mycélium secondaire ou mycélium aérien. Les extrémités des hyphes aériens se différencient ensuite pour produire des spores qui peuvent avoir des formes très différentes (Prescott et al. 2018) (Figure.5).



**Figure.5** Développement du cycle de vie du genre *Streptomyces* dans un milieu solide (Ait Barka et al. 2016)

Comme les bactéries sporulées, les spores d'actinomycètes présentent une grande résistance à la température. Cette thermo-résistance, ainsi que leur capacité à résister au froid, varie selon les souches et dépend de la synthèse du dipicolinate de calcium. Ce composé joue un rôle crucial en conférant à la cellule son imperméabilité et en favorisant son état de déshydratation (Leclerc et al. 1994).

### 2.2.6. Ecologie et Habitats

Les actinobactéries sont des microorganismes présents dans la plupart des niches écologiques (On les trouve également dans les sols et les milieux aquatiques). Bien qu'elles puissent être des agents pathogènes pour les végétaux, les animaux ou des symbiotes végétaux, leur présence est particulièrement élevée dans le sol, surtout dans les sols alcalins et riches en matière organique, où elles constituent une part significative de la population microbienne. Les actinobactéries peuvent se retrouver à la surface du sol et à plus de 2 mètres de profondeur (Ait Barka et al. 2016).

La plupart des actinomycètes se trouvent dans des environnements tels que le sol, la rhizosphère et les sédiments des étangs et des lacs, où ils agissent comme saprophytes en dégradant les matières organiques pour se nourrir.

Les actinobactéries endophytes ont été isolées à partir d'une large gamme de plantes. Elles peuvent persister à l'intérieur de l'hôte végétal pendant de longues périodes sans provoquer de symptômes visibles de désordre. Les espèces les plus couramment identifiées appartiennent aux genres *Microbispora*, *Nocardia*, *Micromonospora* et *Streptomyces*.

Les actinomycètes jouent un rôle essentiel tant en écologie qu'en médecine ; le sol constitue leur biotope naturel, où ils ont la capacité de dégrader diverses molécules, telles que

la pectine, la kératine et certaines substances aromatiques. Grâce à ces capacités, ils contribuent à la minéralisation et à la fertilisation des sols (**Prescott et al. 2010**).

Le genre *Streptomyces*, est le plus abondant ; les sols des oasis du Sahara algérien, se sont révélés riches en actinomycètes (**Boudemagh, 2005**).

La distribution des actinomycètes dans des écosystèmes extrêmes a été documentée par plusieurs auteurs, qui ont étudié leurs métabolismes secondaires. Ces recherches suggèrent que ces niches abiotiques rares pourraient abriter de nouvelles souches et/ou des molécules d'intérêt pharmaceutique (**Gurielidze et al. 2010 ; Rojas et al. 2009 ; Lazzarini et al. 2000**).

En Algérie, le désert saharien abrite de nouvelles espèces d'actinobactéries liées aux sols et aux palmeraies. Les régions d'Adrar, de Ghardaïa et de Tamanrasset ont révélé l'existence de plusieurs nouvelles espèces d'actinomycètes : *Saccharothrix algeriensis* sp. nov., (**Zitouni et al. 2004**), *Saccharothrix saharensis* sp. nov.,(**Boubetra et al. 2013a**), *Actinopolyspora saharensis* sp. nov.,(**Meklat et al. 2012**), *Saccharothrix hoggarensis* sp. nov.,(**Boubetra et al. 2013b**), *Saccharopolyspora ghardaiensis* sp. nov.,( **Meklat et al. 2014**), *Nocardiosis algeriensis* sp. nov., (**Bouras et al. 2015**), *Saccharothrix tamanrassetensis* sp. nov.,(**Boubetra et al. 2015**), *Actinomadura adrarensis* sp. nov., (**Lahoum et al. 2016**) *Streptosporangium algeriense* sp. nov.,(**Boubetra et al. 2016**) et *Saccharothrix ghardaiensis* sp. nov.,(**Bouznada, et al. 2017**).

### 2.2.7. Halotolérance

**Tresner et al. (1968)** ainsi que **Gottlieb (1973)** ont été les premiers à isoler des actinomycètes à partir d'échantillons salins et à établir une méthode appropriée pour la recherche d'actinomycètes halotolérants.

Dans le monde microbien, on distingue plusieurs catégories d'organismes en fonction de leur tolérance au NaCl : ceux qui ne supportent que de faibles concentrations (environ 1 %), les halotolérants modérés qui croissent en présence de 6 à 8 % de NaCl, et les halotolérants extrêmes capables de résister à de fortes concentrations de NaCl (**Tiquia, 2007**).

Les halophiles nécessitent la présence de NaCl pour leur croissance. Notons que l'espèce *Streptomonospora alba*, étudiée par **Li et al. (2003c)**, a été cultivée sur milieu ISP2 gélosé contenant 15 % de NaCl.

Plus de 70 espèces d'actinomycètes halophiles et halotolérants ont été isolées, et leur métabolisme secondaire ; potentiellement intéressant ; a été étudié dans divers écosystèmes extrêmes, tels que les sols sahariens désertiques d'Algérie (**Kitouni et al. 2005**) et des écosystèmes marins en Chine (**Cai et al. 2009**).

### 2. 2.8. Intérêt des Actinomycètes

Les actinomycètes, produisent une grande variété de composés bioactifs d'une valeur commerciale élevée et sont régulièrement explorées pour la découverte de nouvelles substances bioactives utilisées dans les secteurs industriels, biotechnologiques, pharmaceutiques et alimentaires (**Vijayakumar et al. 2007**).

Les actinomycètes jouent un rôle essentiel dans la dégradation de polymères complexes tels que la lignocellulose, l'hémicellulose, les pectines et la chitine (**Abou-Elela et Ghanem, 2005 ; Vijayakumar et al. 2007**).

Les actinobactéries ont le potentiel de produire divers métabolites tels que les antibiotiques, antifongiques, antitumoraux et antiinflammatoires, ainsi que des substances et des régulateurs favorisant la croissance des plantes. Ces substances trouvent différentes

applications, notamment en médecine, en biotechnologie et en agriculture (**Donadio et al. 2002**) en plus des enzymes tels que les cellulases, chitinases et xylanases) (**Vrancken et al. 2009**).

Parmi les micro-organismes, la famille des actinomycètes et en particulier le genre *Streptomyces*, reste le plus grand producteur de métabolites secondaires et composés bioactifs (**Barka et al. 2016**).

### 3. Le genre *Streptomyces*

#### 3.1. Historique

Le genre *Streptomyces* a été créé par **Selman Waksman** et **William A. Henrici** en **1943**. Ils ont défini ce genre pour classer certaines bactéries filamenteuses qu'ils étudiaient.

#### 3.2. Définition du genre *Streptomyces*

Le genre *Streptomyces* constitue un groupe important parmi les actinomycètes. Ces espèces sont aérobies, à coloration Gram positive, non acido-résistantes et multicellulaires, formant un mycélium ramifié et aérien durant des cycles de vie complexes. Le mycélium aérien produit des chaînes de spores, qui peuvent varier de trois à plusieurs unités à maturité.

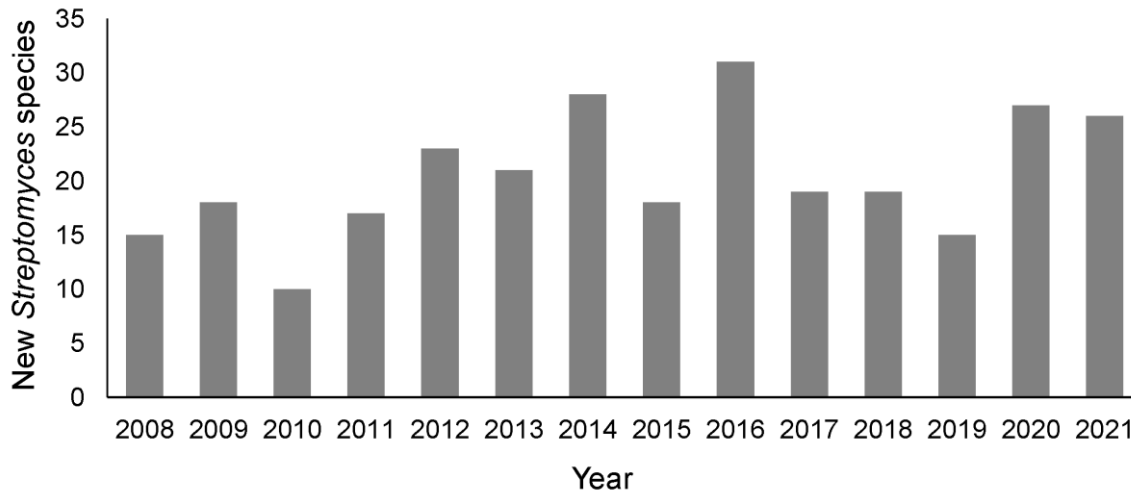
Les streptomycètes se trouvent en forte concentration dans le sol, leur habitat naturel principal, où ils jouent un rôle essentiel dans la décomposition de la matière organique, comme les litières de feuilles, contribuant ainsi à la fertilité du sol. Bien que ce genre inclue des pathogènes végétaux et humains, il est principalement reconnu pour sa capacité à produire une grande variété de métabolites secondaires chimiquement diversifiés, notamment des antibiotiques.

#### 3.3. Classification des *Streptomyces*

Le genre *Streptomyces* est le plus grand groupe parmi les procaryotes. En mars 2005, 487 espèces et 39 sous-espèces avaient été approuvées et validées. Un total de 533 espèces est décrit dans le Manuel de systématique bactérienne de Bergey (Deuxième édition, Volume Cinq, Les Actinobactéries, Partie B), publié en 2012.

Ce nombre augmente chaque année, car plusieurs dizaines d'espèces sont nouvellement proposées chaque année (**Figure.6**). Selon la Liste des noms procaryotiques avec validité en nomenclature (LPSN), le nombre d'espèces avec des noms publiés valides et corrects était de 699 en janvier 2023. Si ce nombre n'est pas limité à celles ayant un nom correct, mais inclut également les synonymes, le total s'élève à 846.

Les espèces de *Streptomyces* sont une riche source de composés bioactifs. Environ deux tiers de tous les antibiotiques connus sont produits par les actinobactéries et principalement par des espèces du genre *Streptomyces* (**Takahashi et al. 2018**).



**Figure.6** Nouvelles espèces de *Streptomyces*. D'après SAJ News of Actinomycetologica (<https://www.actino.jp/journal/index.html>).

### 3.3.1. Critères de classification

La première classification des espèces de *Streptomyces* était fondée essentiellement sur des observations morphologiques (Küster ,1972 ; Nonomura ,1974 ; Shirling et Gottlieb, 1966).

#### 3.3.1.1. Critères morphologiques

Les caractéristiques morphologiques, telles que la couleur des spores, la morphologie des chaînes de spores, la production de pigments mélanoides, l'ornementation des parois des spores et le mode d'utilisation de sucres comme source de carbone, ont été reconnues comme des critères constants et fiables pour la classification.

L'International *Streptomyces* Project (ISP) a publié des descriptions de référence pour des souches types de 458 espèces de *Streptomyces*, basées sur des critères standards pour la détermination des espèces (Shirling et Gottlieb, 1968a ; Shirling et Gottlieb, 1968b ; Shirling et Gottlieb, 1969 ; Shirling et Gottlieb, 1972).

D'autres marqueurs phénotypiques, tels que les propriétés physiologiques et biochimiques, la chimiotaxonomie, ainsi que l'hybridation ADN-ADN (DDH), l'ADN chromosomique total, ont été intégrés dans le processus de classification. Ces méthodes ont permis d'affiner notre compréhension des relations phylogénétiques et de mieux cerner les spécificités des différentes espèces.

### 3.3.1.2. Critères moléculaires

#### ➤ Analyse du gène 16S rRNA

L'analyse phylogénétique basée sur les séquences du gène de l'ARN ribosomal 16S constitue la première étape du processus d'identification des actinomycètes. Cette approche repose sur la comparaison des séquences d'ARNr 16S entre les souches étudiées et les espèces de référence disponibles dans les bases de données. Elle permet d'obtenir une première estimation des affinités phylogénétiques et de proposer une assignation générique.

Cependant, cette méthode présente une résolution limitée pour différencier des espèces étroitement apparentées, en particulier au sein du genre *Streptomyces*. En effet, des espèces distinctes peuvent partager des niveaux de similarité très élevés de séquence 16S rRNA, atteignant parfois 99,9 % voire 100 % (Komaki, 2021). Dans le cas des actinomycètes, une similarité inférieure à 99 % entre deux séquences 16S rRNA peut néanmoins indiquer une distinction au niveau spécifique (Meier-Kolthoff et al. 2013). Ainsi, si le gène 16S rRNA demeure une référence pour une identification préliminaire, il ne suffit pas à lui seul pour une délimitation précise des espèces.

#### ➤ Analyse d'autres gènes conservés (gènes "housekeeping")

Pour pallier les limites du gène 16S rRNA, l'étude de gènes dits "housekeeping" — tels que *gyrB*, *rpoB*, *recA*, *atpD*, *sodA* ou *trpB* — est désormais couramment utilisée dans la taxonomie bactérienne. Ces gènes, impliqués dans des fonctions cellulaires essentielles, évoluent plus rapidement que l'ARNr 16S et offrent une **meilleure résolution phylogénétique** pour différencier des espèces étroitement apparentées (Chun et Bae, 2000 ; Guo et al. 2008).

L'approche **MLSA (Multilocus Sequence Analysis)**, qui combine l'analyse de plusieurs de ces gènes, s'est imposée comme une méthode robuste pour l'identification et la classification des actinomycètes (Rong et Huang, 2010 ; Labeda et al. 2012). Elle permet de distinguer des espèces présentant une similarité quasi identique de séquence 16S rRNA et d'obtenir une phylogénie plus fine, corrélée à la diversité génomique réelle. Cette approche est aujourd'hui largement reconnue comme un outil complémentaire essentiel à la taxonomie moderne des genres tels que *Streptomyces* et *Nonomuraea*.

#### ➤ Analyse du génome entier (Whole Genome Sequencing, WGS)

L'avènement du séquençage à haut débit a profondément transformé la taxonomie microbienne. Les séquences de génome entier (WGS) constituent aujourd'hui la référence la plus précise pour la délimitation des espèces. Depuis 2014, le nombre de génomes complets publiés pour le genre *Streptomyces* a augmenté de façon spectaculaire (Lee et al. 2020).

Les analyses de génomes entiers permettent le calcul d'indices comparatifs tels que : DDH (DNA-DNA hybridization) numérique ou in silico, ANI (Average Nucleotide Identity), dDDH (digital DNA-DNA hybridization), et plus récemment l'OGRI (Overall Genome Relatedness Index) (Chun et al. 2014).

La méthode d'hybridation ADN-ADN (DDH), historiquement utilisée, repose sur un seuil de similarité de 70 %, reconnu comme la limite définissant une espèce bactérienne (Wayne et al. 1987 ; Tindall et al. 2010). Aujourd'hui, son équivalent numérique, le dDDH, et l'ANI (avec un seuil d'environ 95–96 %) sont devenus les standards modernes pour la délimitation des espèces bactériennes.

Malgré la disponibilité croissante des séquences WGS, leur utilisation pour la reclassification systématique des espèces d'actinomycètes, notamment de *Streptomyces*, demeure partielle. Toutefois, plusieurs études récentes rapportent des reclassifications significatives, appuyées sur des données génomiques complètes, renforçant la fiabilité des critères taxonomiques modernes.

### 3.3.1.3. Développements de méthodes d'identification moléculaire

Actuellement, la taxonomie des *Streptomyces* repose sur des approches polyphasiques intégrant des caractéristiques phénotypiques, chimiotaxonomiques et génotypiques.

Dans les années 1980, l'analyse des séquences de l'ARN ribosomal 16S est devenue une méthode standard en systématique bactérienne. Cette analyse consiste à amplifier les gènes de l'ARNr 16S par PCR, suivie du séquençage des amplicons selon la méthode Sanger. La séquence génétique obtenue est ensuite soumise à une recherche par BLAST pour identifier les espèces étroitement apparentées, ce qui permet d'affiner la classification et de mieux comprendre les relations phylogénétiques.

**Labeda et al. (2012)**, ont déterminé les séquences génétiques presque complètes de l'ARNr 16S d'une grande variété de *Streptomyces*, et reconstruit un arbre phylogénétique complet pour clarifier les relations entre les souches types d'espèces de *Streptomyces*.

Cependant, la résolution de l'analyse de la séquence génétique de l'ARNr 16S est trop faible pour identifier les souches au niveau de l'espèce. La valeur de similarité de la séquence du gène de l'ARNr 16S de 99 % est un seuil pour classer comme nouvelle espèce (**Meier-Kolthoff et al. 2013**).

Pour pallier à cela, l'analyse des séquences de gènes codant pour d'autres protéines ont été développées pour obtenir une résolution plus précise.

**Hatano et al. (2003)** ont utilisé les séquences du gène *gyrB* pour réévaluer taxonomiquement les espèces de *Streptomyces*. Ils ont amplifié le gène *gyrB* (1,2 kb) puis séquencé les amplicons. Leur étude a révélé une corrélation entre les similitudes de séquence du gène *gyrB* et la relation ADN-ADN par DDH. Ils ont rapporté que des souches présentant une similarité de séquence *gyrB* de 95,5 à 96,5 % et des phénotypes similaires ont une relation ADN-ADN variant de 59 à 75 %. Ces résultats renforcent l'idée que l'analyse du gène *gyrB* peut offrir des insights précieux pour la classification taxonomique des actinomycètes.

L'analyse de séquence multilocus (MLSA) s'est avérée être un outil précieux pour évaluer les attributions d'espèces dans la taxonomie des procaryotes. La résolution est considérablement améliorée en utilisant plusieurs séquences génétiques par rapport à celles basées sur une seule séquence génétique (**Glaeser et al. 2015**).

**Guo et al. 2008 et Rong, Huang et al. 2012** ont amplifié cinq gènes domestiques, *atpD*, *gyrB*, *recA*, *rpoB* et *trpB*, séquencé les amplicons et utilisé des séquences d'ADN.

La disponibilité des génomes entiers (WGS) nous permet de choisir de nombreux *Housekeeping genes* (gènes de ménage) pour l'analyse phylogénétique multi-locus (MLSA).

De nos jours, il est possible de réaliser des MLSA utilisant de nombreuses séquences de *housekeeping genes* (**Chun et al. 2014**).

### 3.3.1.4. Reclassification du Genre *Streptomyces*

*Streptomyces xinghaiensis* sp. nov. (souche S187<sup>T</sup>) a été isolée d'un sédiment marin de la baie de Xinghai (Dalian, Chine). Elle croît entre 10–45 °C, à pH 6,0–9,0, et supporte jusqu'à 9 % de NaCl. La paroi cellulaire contient LL-diaminopimélique, et les ménaquinones majeures sont MK-9(H<sub>6</sub>), MK-9(H<sub>8</sub>) et MK-9(H<sub>2</sub>). Les principaux acides gras sont iso-C<sub>16:0</sub>, anteiso-C<sub>15:0</sub> et anteiso-C<sub>17:0</sub>. Le taux de G+C du génome est de 72,01 mol %. La séquence du gène 16S rRNA montre une similarité de 98,1 % avec *S. flavofuscus* et de 97,5 % avec *S. albiacialis*. Les valeurs d'ADN–ADN hybridation (31,4 % et 46,9 %) confirment qu'il s'agit d'une espèce distincte. La souche type est S187<sup>T</sup> (= NRRL B-24674<sup>T</sup> = CCTCC AA 208049<sup>T</sup> = KCTC 19546<sup>T</sup>) (Zhao et al. 2009).

*Streptomyces plumbiresistens* sp. nov. (Souche CCNWHX 13-160<sup>T</sup>) a été isolée d'un sol contaminé au plomb dans la province du Gansu (nord-ouest de la Chine). Les caractères morphologiques et chimiques de la souche correspondent à ceux du genre *Streptomyces*. L'analyse de la séquence du gène 16S rRNA place la souche dans une lignée distincte du genre *Streptomyces*, proche de *S. pseudovenezuelae* (98,9 %) et *S. resistomycificus* (98,8 %). Les valeurs d'hybridation ADN–ADN avec ces espèces (49,7 % et 43,2 %) confirment qu'il s'agit d'une espèce nouvelle. La souche présente une résistance élevée au plomb, avec une concentration minimale inhibitrice (CMI) de 4,0 mM Pb<sup>2+</sup>. La souche type est CCNWHX 13-160<sup>T</sup> (= ACCC 41207<sup>T</sup> = HAMBI 2991<sup>T</sup>) Guo et al. 2009).

*Streptomyces hyderabadensis* sp. nov. *Streptomyces hyderabadensis* sp. nov. (souche OU-40<sup>T</sup>) a été isolée d'un sol agricole de la région d'Hyderabad (Andhra Pradesh, Inde). La souche présente les caractères morphologiques et chimiotaxonomiques typiques du genre *Streptomyces*. L'analyse phylogénétique du gène 16S rRNA place *S. hyderabadensis* dans le genre *Streptomyces*, avec une similarité de 99,0 % avec *S. pactum* NBRC 13433<sup>T</sup> et *S. olivaceus* NBRC 12805<sup>T</sup>, et de 98,8 % avec *S. parvulus* NBRC 13193<sup>T</sup>. Les valeurs d'hybridation ADN–ADN et les différences morphologiques et phénotypiques permettent de la distinguer de ces espèces voisines, confirmant qu'il s'agit d'une espèce nouvelle. La souche type est OU-40<sup>T</sup> (= CCTCC AA 204006<sup>T</sup> = DSM 41901<sup>T</sup>) (Reddy et al. 2011).

*Streptomyces qaidamensis* sp. nov. (souche S10<sup>T</sup>) a été isolée d'un échantillon de sable prélevé dans le bassin du Qaidam (province du Qinghai, Chine). La souche présente une activité antibactérienne contre le SARM (*Staphylococcus aureus* résistant à la méthicilline). L'analyse phylogénétique du gène 16S rRNA a montré que la souche appartient au genre *Streptomyces*, avec de fortes similarités de séquence (jusqu'à 99,31 %) avec *S. chartreusis*, *S. phaeoluteigriseus*, *S. variegatus* et *S. flavovariabilis*. Cependant, les valeurs d'identité moyenne de nucléotides (ANI) inférieures à 95 % (83,6–92,6 %) confirment qu'il s'agit d'une espèce distincte. L'analyse phylogénomique a également montré une parenté proche avec *S. variegatus* et *S. flavovariabilis*. La souche contient de l'acide LL-diaminopimélique dans la paroi cellulaire, les ménaquinones prédominantes sont MK-9(H<sub>6</sub>) et MK-9(H<sub>8</sub>), et les principaux acides gras sont iso-C<sub>15:0</sub>, anteiso-C<sub>15:0</sub>, iso-C<sub>16:0</sub> et anteiso-C<sub>17:0</sub>. Les phospholipides détectés comprennent le diphosphatidylglycérol, la phosphatidyléthanolamine, la phosphatidylcholine et plusieurs phospholipides et glycolipides inconnus. Sur la base des données génomiques et phénotypiques, la souche S10<sup>T</sup> (= JCM 31184<sup>T</sup> = CGMCC 4.7315<sup>T</sup>) est proposée comme représentant une nouvelle espèce, *Streptomyces qaidamensis* sp. nov. (Zhang et al. 2018).

*Streptomyces radialis* sp. nov. (souches DS1-2<sup>T</sup> et AZ1-7) a été isolée des racines de plantes. Les cellules sont Gram positives, filamenteuses et contiennent de l'acide LL-diaminopimélique dans le peptidoglycane, ainsi que du glucose et du ribose dans les hydrolysats cellulaires. Les ménaquinones majeures sont MK-9(H<sub>6</sub>), MK-10(H<sub>6</sub>), MK-9(H<sub>8</sub>), MK-10(H<sub>8</sub>) et MK-10(H<sub>4</sub>). Les acides gras dominants sont iso-C<sub>16:0</sub> et iso-C<sub>16:1G</sub>, et les phospholipides principaux comprennent le diphosphatidylglycérol, la phosphatidyléthanoline, la phosphatidylglycérol et le mannoside de phosphatidylinositol. La teneur en G+C du génome est de 73,2 mol %. L'analyse du gène 16S rRNA montre une similarité de 97,6–98,0 % avec *S. specialis* et *S. hoynatensis*, tandis que les valeurs d'ANIb (81,0–82,0 %), d'ANIm (84,8–85,3 %) et de DDH numérique (22,0–23,1 %) confirment qu'il s'agit d'une espèce distincte. Les comparaisons génomiques ont révélé des différences dans les gènes associés aux réponses au stress, aux interactions avec les plantes et à la production de métabolites bioactifs. Sur la base des données phénotypiques, chimiotaxonomiques et génomiques, les souches DS1-2<sup>T</sup> et AZ1-7 représentent une nouvelle espèce, nommée *Streptomyces radialis* sp. nov. La souche type est DS1-2<sup>T</sup> (= JCM 32152<sup>T</sup> = KCTC 39738<sup>T</sup> = TISTR 2403<sup>T</sup>) (Kuncharoen et al. 2021).

En Algérie, Sabaou et al. (1998) ont démontré le grand potentiel de la découverte de nouvelles espèces d'actinobactéries. Un nombre significatif de nouvelles espèces a été découvert, principalement dans l'écosystème saharien, qui représente 85 % de la superficie totale du pays.

#### ➤ Synonymes

Le genre *Streptomyces* est l'un des plus grands taxons bactériens, comprenant à peu près 700 espèces valides à l'heure actuelle. C'est membres ont fait l'objet d'une enquête comme source prometteuse d'une variété de métabolites secondaires bioactifs et étaient classés selon des critères morphologiques, biochimiques et physiologiques caractéristiques avant d'utiliser la séquence du gène de l'ARNr 16S analyse. Mais leurs morphologies et leurs produits sont si divers qu'ils semblent surclassés. On rapporte souvent que espèces distinctes partageant la même séquence génétique de l'ARNr 16S devraient être reclassés comme synonymes (Komaki et al. 2017 ; Nouioui et al. 2018 ; Komaki et al. 2019, 2020a ,2020b, 2020c, 2020d, Madhaiyan et al. 2020).

Selon les distances évolutives de MLSA, les similarités de séquences génomiques et les principaux caractères phénotypiques, les ensembles d'espèces suivants peuvent être classés comme appartenant à la même espèce : (1) *S. enissocaesilis*, *S. geysiriensis*, *S. plicatus*, *S. rochei* et *S. vinaceusdrappus* ; (2) *S. luteus* et *S. mutabilis* ; (3) *S. flavoviridis* et *S. pilosus* ; (4) *S. asterosporus* et *S. calvus* ; (5) *S. erythrogriseus*, *S. griseoincarnatus* et *S. variabilis* ; (6) *S. griseorubens*, *S. matensis* et *S. althioticus* ; (7) *S. albogriseolus* et *S. viridodiastaticus* ; (8) *S. anthocyanicus*, *S. coelescens*, *S. humiferus* et *S. violaceolatus*.

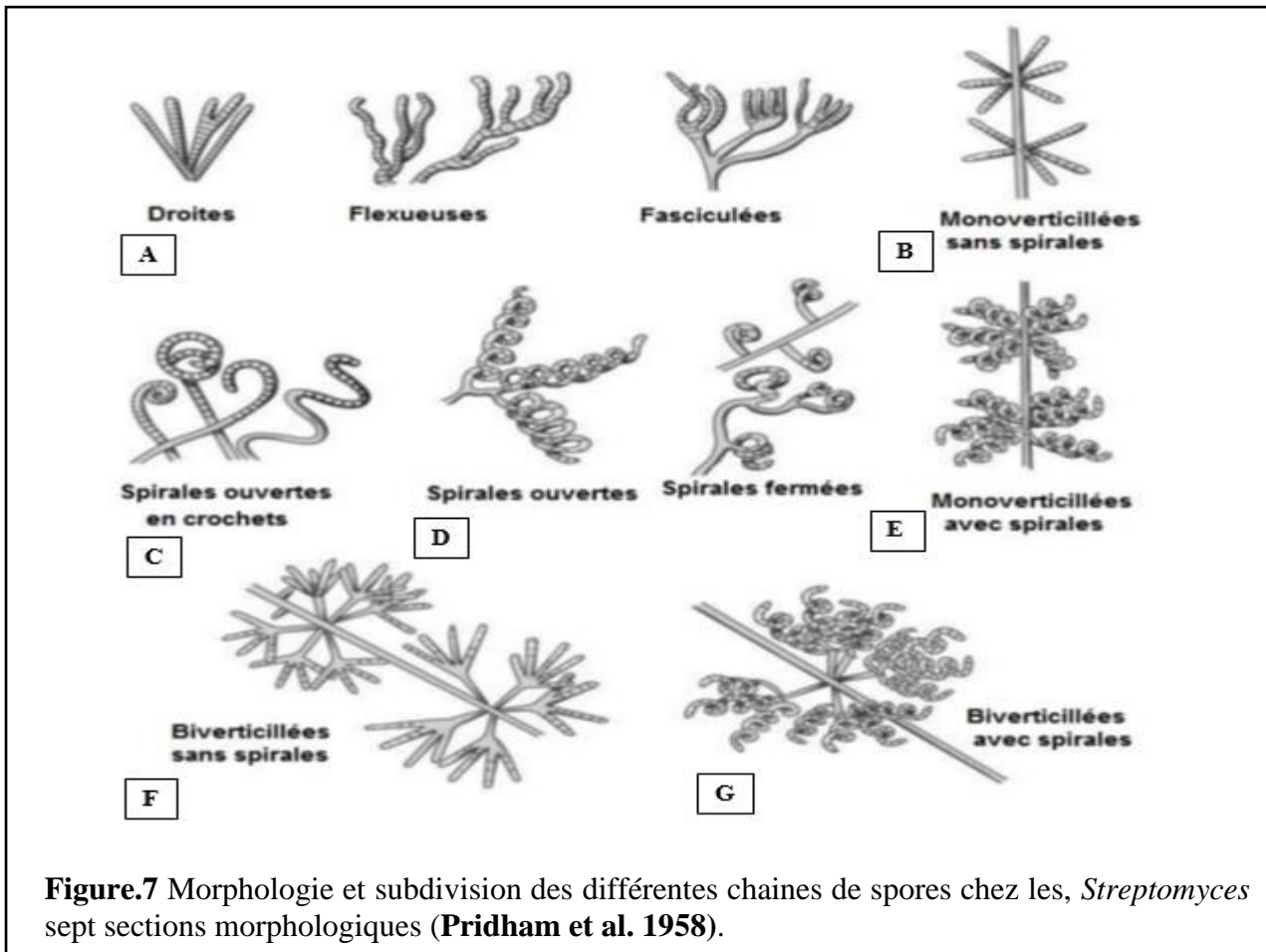
Selon la Règle 24b du Code Bactériologique, il est proposé que *S. enissocaesilis* (ex Krassilnikov 1970) Sveshnikova 1986, *S. geysiriensis* Wallhäuser et al. 1966 (Listes approuvées 1980), *S. plicatus* Pridham et al. 1958 (Listes approuvées 1980) et *S. vinaceusdrappus* Pridham et al. 1958 (Listes approuvées 1980) soient reclassifiés comme synonymes hétérotypiques ultérieurs de *S. rochei* Berger et al. 1953 (Listes approuvées 1980) ; *S. luteus* Luo et al. 2017 comme celui de *S. mutabilis* (Preobrazhenskaya et Ryabova 1957) Pridham et al. 1958 (Listes approuvées 1980) ; *S. flavoviridis* (ex Preobrazhenskaya et al. 1957) Preobrazhenskaya 1986 comme celui de *S. pilosus* Ettliger et al. 1958 (Listes approuvées 1980) ; *S. asterosporus* (ex Krassilnikov 1970) Preobrazhenskaya 1986 comme celui de *S.*

calvus Backus et al. 1957 (Listes approuvées 1980) ; *S. variabilis* (Preobrazhenskaya et al. 1957) Pridham et al. 1958, 70AL (Listes approuvées 1980) et *S. erythrogriseus* Falcão de Morais et Dália Maia 1959 (Listes approuvées 1980) comme celui de *S. griseoincarnatus* (Preobrazhenskaya et al. 1957) Pridham et al. 1958, 69AL (Listes approuvées 1980) ; *S. griseorubens* (Preobrazhenskaya et al. 1957) Pridham et al. 1958 (Listes approuvées 1980) et *S. matensis* Margalith et al. 1959 (Listes approuvées 1980) comme celui de *S. althioticus* Yamaguchi et al. 1957 (Listes approuvées 1980) ; *S. viridodiastaticus* (Baldacci et al. 1955) Pridham et al. 1958 (Listes approuvées 1980) comme celui de *S. albogriseolus* Benedict et al. 1954 (Listes approuvées 1980) ; *S. coelescens* (Krassilnikov et al. 1965) Pridham 1970, 21AL (Listes approuvées 1980), *S. humiferus* Goodfellow et al. 1986 et *S. violaceolatus* (Krassilnikov et al. 1965) Pridham 1970, 28AL (Listes approuvées 1980) comme ceux de *S. anthocyanicus* (Krassilnikov et al. 1965) Pridham 1970, 7AL (Listes approuvées 1980) (**Komaki ,2021**).

### 3.4. Morphologie et type de spores du genre *Streptomyces*

Les différentes entités morphologiques présentes dans le genre *Streptomyces*, cela a suggéré un schéma phylogénétique possible pour l'évolution des différents types à partir d'un ancêtre commun caractérisé par des structures reproductrices extrêmement simples. Le schéma phylogénétique proposé est le résultat de spéculations. La subdivision du genre *Streptomyces* en sept sections morphologiques (**Figure.7**) (**Pridham et al. 1958**).

- **Rectus-Flexibilis** (RF). Streptomycètes avec des sporophores droits, flexueux ou en faisceaux ; sans spirales (**A**).
- **Monoverticillus** (MV). Streptomycètes avec des sporophores sous forme de verticilles ou de couronnes primaires attachés à de longues branches droites ; sans spirales (**B**).
- **Retinaculum-Apertum** (RA). Streptomycètes avec des sporophores en crochets, en boucles ouvertes ou en spirales très étendues (primitives) (**C**).
- **Spira** (S). Streptomycètes avec des sporophores sous forme de spirales courtes, tortueuses ou compactes, ou de spirales longues et ouvertes (**D**).
- **Monoverticillus-Spira** (MV-S). Streptomycètes avec des sporophores sous forme de verticilles ou de couronnes primaires attachés à de longues branches droites ; éléments des verticilles ou couronnes en spirale (**E**).
- **Biverticillus** (BIV). Streptomycètes avec des sporophores sous forme de verticilles ou de couronnes composés attachés à de longues branches droites ; sans spirales (**F**).
- **Biverticillus-Spira** (BIV-S). Streptomycètes avec des sporophores sous forme de verticilles ou de couronnes composés attachés à de longues branches droites ; éléments des verticilles ou couronnes secondaires en spirale (**G**).



### 3.5. Ecologie et Habitats

Les espèces du genre *Streptomyces* ont traditionnellement été considérées comme des bactéries vivant librement dans le sol ; également efficaces pour coloniser la rhizosphère et l'endosphère des plantes (Viaene et al. 2016). Il a même été suggéré que leur croissance filamenteuse aurait évolué pour faciliter cette colonisation des racines, un trait qui est apparu environ 50 millions d'années après la colonisation terrestre par les premières plantes, il y a environ 450 millions d'années (Chater, 2016 ; Viaene et al. 2016). Certes, leur capacité à sporuler constitue un mécanisme efficace pour la transmission verticale entre les générations de plantes via le sol.

### 3.6. Intérêt des *Streptomyces*

Le genre *Streptomyces* comprend plus de 600 espèces identifiées, connues pour leur capacité à produire une large gamme de métabolites. Ces métabolites représentent environ 55 % des antibiotiques actuellement utilisés en médecine humaine (Hutchings et al. 2019).

Les agents antimicrobiens ont été parmi les premiers composés naturels isolés, à commencer par l'actinomycine, extraite de *Streptomyces antibioticus*, en 1940. Cela a été suivi par la découverte d'un grand nombre d'autres antibiotiques, la moitié de tous les antibiotiques connus aux *Streptomyces* (Labeda et al. 2012).

Un certain nombre d'actinobactéries ont été isolées de différents écosystèmes, notamment des plantes sahariennes (Zamoum et al. 2015 ; Goudjal et al. 2013 ; Baoune et al. 2018), des zones hypersalines (Meklat et al. 2013 ; Meklat et al. 2014 ; Sougui et al.

2015b), des sols du désert saharien (Sabaou et al. 1992 ; Sabaou et al. 1998).

### 3.7. Métabolites secondaires dérivés de *Streptomyces*

#### 3.7.1. Production d'antibiotiques et activité antibactérienne

L'utilisation de diverses actinobactéries endophytes isolées de milieux particuliers offre des opportunités uniques pour extraire de nouveaux médicaments (Mohammadipanah et al. 2016). Les propriétés thérapeutiques de certains de ces métabolites secondaires répertoire chimique des actinobactéries endophytes, qui démontrent une protection des plantes et une promotion de leur croissance, et par conséquent, leur importance en agriculture (Singh et al. 2018 ; Musa et al. 2020; Sivalingam et al. 2019) ont rapporté la prépondérance des actinobactéries, en particulier des espèces de *Streptomyces* dérivées de sources extrêmes, comme des sources remarquables de nouveaux clusters de gènes biosynthétiques avec un potentiel pour le développement de médicaments anticancéreux (Sivalingam et al. 2019). Les actinobactéries sont considérées comme une riche source de produits naturels, qui ont de nombreuses fonctions bioactives, y compris des activités phytotoxiques, antimicrobiennes, insecticides, et principalement antiprolifératives et antitumorales (Martinez et al. 2017 ; Rodrigues et al. 2018 ; Ait Assou et al. 2023).

L'anthracycline saquayamycine A(27) et C (28), reconnues pour leurs propriétés antibactériennes, d'une nouvelle souche de *Streptomyces* spp. PAL114, isolée du sol de Ghardaïa (Aouiche et al. 2014).

L'acide hydroxamique (31) a été purifié à partir du bouillon de culture de *Streptomyces* WAB9, une souche isolée du sol saharien collecté dans la région de Béchar. Ce composé a montré une activité antibactérienne contre une gamme de micro-organismes multirésistants, en particulier *Pseudomonas aeruginosa* IPA1 (10 µg/mL = 30 µM) et *E. coli* E52 (20 µg/mL = 60 µM) (Yekkou et al. 2015).

Driche et al. (2015) ont rapporté de di-(2-éthylhexyle) (32) à partir d'une nouvelle souche de *Streptomyces* sp. G60, obtenue à partir d'un échantillon de sol de Ghardaïa. a été testé pour son activité contre différentes souches de *Staphylococcus aureus* (SARM), montrant des effets puissants.

Belghit et al. (2016) ont isolé du 2,4-di-tert-butylphénol (33) à partir d'une culture de *Streptomyces mutabilis*, souche provenant d'un sol saharien récolté à Metlili, dans la région de Ghardaïa.

Par ailleurs, à partir de culture en bouillon de la nouvelle souche *Streptomyces* sp. AT37, obtenue d'un sol saharien d'Adrar (sud-ouest algérien). Ce composé a montré une activité modérée contre *Staphylococcus aureus* multirésistant et a inhibé la formation de biofilm (Driche et al. 2017).

Les oligomycines A (38) et E (39) ont été produites en tant que métabolites majeurs par *Streptomyces* sp. HG29, une souche isolée d'un sol saharien collecté au Hoggar (Tamanrasset, sud de l'Algérie) (Khebizi et al. 2018).

Une série d'antibiotiques polyéthers, comprenant la nigéricine (40), l'épinigéricine (41), l'abiérixine (42) et de nouveaux esters méthyliques de grisorixine (43), ont été produits par *Streptomyces youssoufiensis* SF10, collectée dans la montagne Chélia, à Khenchela (nord-est de l'Algérie) (Leulmi et al. 2019)

Toumatia et al. (2015), ainsi que récemment Djinni et al. (2019a) ont isolé de

nouvelles souches produisant de l'actinomycine D (49). Ils ont montré que les genres *Streptomyces* isolés du sol saharien d'Aïn Aménas (*Streptomyces* sp. IA1) et de Béni Abbes-Bechar (*Streptomyces* sp. GSBNT10) possédaient de puissantes activités antibactériennes et antifongiques contre un large éventail de champignons phytopathogènes.

### 3.7.2 Production d'enzymes

Les actinobactéries ont une grande capacité de biodégradation de différents substrats complexes présents dans leurs habitats naturels (McCarthy et Stanley, 1992 ; Tuomela et al. 2000), ce qui indique la variété et de leur organisation génomique (Bentley et al. 2002) (en particulier pour le genre *Streptomyces*) (Narayana et al. 2007).

Les actinomycètes produisent certains enzymes (Pectinases, Amylases, Cellulases, Protéases, Xylanases, Lipases et Estérases) dont certains sont utilisés industriellement (Mukhtar et al. 2017).

#### ➤ Pectinases

Les pectinases sont produites par plusieurs espèces de *Streptomyces* (Abdelwahed et al. 2014). Ces enzymes sont utilisées dans l'industrie alimentaire pour l'extraction et la clarification des vins, des jus, des huiles et des composés aromatiques, ainsi que dans l'industrie textile pour la préparation de tissus en lin et la fabrication de chanvre (Kaur et al. 2021). La polygalacturonase est l'une des pectinases les plus importantes, largement utilisée dans différentes industries.

#### ➤ Amylases

Les amylases sont des enzymes essentielles qui hydrolysent l'amidon en sucres simples comme le glucose et le maltose. Plusieurs espèces de *Streptomyces*, notamment *S. erumpens*, produisent des amylases extracellulaires thermostables présentant un fort potentiel industriel (Kar et Ray, 2008). Des souches marines telles que *Streptomyces* sp. D1 et d'autres actinomycètes ont également montré une production efficace d' $\alpha$ -amylases à haute stabilité (Chakraborty et al. 2009 ; Al-Agamy et al. 2021). Ces enzymes sont largement utilisées en boulangerie, l'industrie pharmaceutique, du papier et des détergents, représentant environ 25 % du marché mondial des enzymes.

#### ➤ Cellulases

Les cellulases convertissent la cellulose en sucres fermentescibles. Les cellulases provenant de *Streptomyces* spp., comme *S. ruber*, *S. lividans* et *S. rutgersensis*, sont très thermostables (Kar et Ray, 2008). Ces enzymes sont principalement utilisées comme complément dans les détergents, le textile, les additifs pour animaux, ainsi que dans l'industrie du papier et de la pâte (Prasad et al. 2013).

#### ➤ Protéases

Plusieurs études ont rapporté la production de protéases par des actinobactéries comme le genre *Streptomyces* (Wietzorrek et al. 1997). Les protéases provenant de *Streptomyces* spp. peuvent être utilisées dans le traitement de différents déchets agroindustriels tels que les plumes,

les ongles, les cheveux et les déchets végétaux (**Bentley et al. 2002**).

Les protéases sont aussi parmi les enzymes les plus importantes, elles constituent plus de 65% des applications industrielles totales comme agents blanchisseurs dans les détergents ou dans la synthèse des peptides (**Thumar et Singh, 2007**).

#### ➤ Xylanases

Le genre *Streptomyces* est le principal producteur de xylanase parmi les actinobactéries. Le xylane est le composant le plus dominant des hémicelluloses (**Coman et Bahrim, 2012**). Certaines espèces de *Streptomyces* sont capables d'hydrolyser divers résidus agricoles, comme les déchets de paille et les tourteaux d'huile, (**Celaya et al. 2021**).

#### ➤ Lipases et Estérases

Des espèces de *Streptomyces* produisent des lipases qui hydrolysent les liaisons ester dans les triglycérides pour former du glycérol et des acides gras (**Panyachanakul et al. 2024**). Les lipases ont un potentiel d'utilisation dans le traitement des huiles et des graisses, les cosmétiques, et les détergents (**Suganya et al. 2022**).

### 3.7.3. Solubilisation du phosphate

Dans la littérature, de nombreuses études ont été réalisées sur les espèces de *Streptomyces* capables de solubiliser le phosphate et de favoriser la croissance des plantes (**Jog et al. 2014 ; Boubekri et al. 2021**).

**Nafis et al. (2019)** ont rapporté que les *Streptomyces* isolés des sols désertiques et montagneux solubilisent le phosphate.

## 4. Le genre *Micromonospora*

### 4.1. Historique

**Ørskov (1923)** a décrit le genre *Micromonospora* pour la première fois. Initialement considéré comme intermédiaire entre champignons et bactéries en raison de sa morphologie filamenteuse, il a ensuite été rattaché aux actinomycètes. Avec l'évolution des techniques de biologie moléculaire, aujourd'hui il est classé dans le phylum *Actinomycetota*, ordre *Micromonosporales*, famille *Micromonosporaceae* (**Thompson et al. 2024 ; Oren et al. 2025**).

### 4.2. Définition

Le genre *Micromonospora* regroupe des bactéries Gram positives, filamenteuses et sporulantes, capables de former un mycélium qui se fragmente en spores isolées. Elles se distinguent des genres proches comme *Streptomyces* par la production de spores uniques (et non en chaînes), ainsi que par certaines signatures moléculaires au niveau de l'ARNr 16S (**Qiu et al. 2008**).

### 4.3. Classification

Le genre *Micromonospora* appartient au domaine **Bacteria**. Son classement taxonomique a beaucoup évolué au fil du temps, notamment grâce aux analyses moléculaires modernes.

#### 4.3.1. Critères de classification

##### 4.3.1.1. Critères morphologiques

*Micromonospora* forme un mycélium de substrat et aérien, qui se fragmente en éléments sporifères. Les spores sont **isolées** généralement sphériques ou ovoïdes, avec des parois épaisses et parfois ornées. Les colonies présentent souvent des pigments caractéristiques (rougeâtre, brun, orange) (Qiu et al. 2008 ; Hayakawa et Nonomura, 1991a).

##### 4.3.1.2. Critères moléculaires

L'identification repose principalement sur le séquençage de l'ARN ribosomal 16S, qui distingue *Micromonospora* des autres genres proches. Des marqueurs génétiques supplémentaires (*gyrB*, *rpoB*, *atpD*) sont utilisés pour affiner la classification. Le séquençage génomique complet permet aujourd'hui de corriger et de stabiliser la phylogénie du groupe (Thompson et al. 2024 ; Carro et al. 2024).

##### 4.3.1.3. Développements de méthodes d'identification moléculaire

Les approches récentes combinent la génomique et la métabolomique pour relier phylogénie et biosynthèse de métabolites secondaires (Arini et al. 2025). Ces méthodes permettent non seulement d'identifier les espèces, mais aussi de prédire leur potentiel biotechnologique.

### 4.4. Isolement du genre *Micromonospora* en Algérie

En Algérie, *Micromonospora* a été isolé pour la première fois dans des sols rocheux de l'Est du pays, notamment *Micromonospora echinospora*, étudiée pour son potentiel biotechnologique (Kara Ali et al. 2022). D'autres travaux sur les sédiments et eaux de la côte méditerranéenne algérienne ont confirmé la diversité des actinobactéries, incluant *Micromonospora* (Matmoura et al. 2023 ; Benhadj et al. 2019).

### 4.5. Morphologie et type de spores

*Micromonospora* produit des spores isolées, sphériques à ovoïdes, portées sur des hyphes fragmentés. Ces spores, souvent ornementées et à paroi épaisse, leur confèrent une résistance importante dans les environnements extrêmes. Contrairement à *Streptomyces*, elles ne forment pas de chaînes (Qiu et al. 2008).

### 4.6. Écologie et habitats

Le genre est ubiquiste : sols, sédiments marins, eaux douces et comme endophyte dans les racines de plantes (ex. *Alnus glutinosa*). Certaines espèces proviennent de milieux extrêmes

(fonds marins, déserts), montrant une adaptation remarquable (**Thompson et al. 2024 ; Trujillo et al. 2015 ; Matmoura et al. 2023**).

## 4.7. Intérêt

### 4.7.1. Métabolites secondaires

#### 4.7.1.1. Production d'antibiotiques et activité antibactérienne

*Micromonospora* est producteur de nombreux antibiotiques : gentamicine, netilmicine, sisomicine, ainsi que de nouveaux analogues de l'everninomicine, actifs contre des bactéries multirésistantes (**Arini et al. 2025**).

#### 4.7.1.2. Production d'enzymes

Plusieurs souches produisent des enzymes extracellulaires (cellulases, chitinases, lipases, xylanases) d'intérêt pour l'industrie agroalimentaire, pharmaceutique et environnementale (**Arini et al. 2025 ; Boukhatem et al. 2022**).

#### 4.7.1.3. Solubilisation du phosphate

Certaines espèces de *Micromonospora* peuvent solubiliser le phosphate minéral, augmentant sa disponibilité pour les plantes. Cette propriété les rend intéressantes comme biofertilisants dans l'agriculture durable (**Boubekri et al. 2021 ; Boukhatem et al. 2022**).

## 5. Le genre *Nonomuraea*

### 5.1. Historique

Le genre *Nonomuraea* a été proposé pour la première fois par **Zhang et al. (1998)** à la suite d'une révision taxonomique des genres *Thermomonospora* et *Microtetraspora*. L'analyse morphologique et chimiotaxonomique a montré que plusieurs espèces jusque-là incluses dans ces genres constituaient un groupe distinct, rattaché à la famille *Streptosporangiaceae*. Par la suite, la validité taxonomique du genre a été confirmée par **Chiba et al. (1999)**, qui ont transféré la souche '*Nocardioopsis*' K-252T dans ce nouveau taxon en tant que *Nonomuraea longicatena* sp. nov., consolidant ainsi la description initiale.

### 5.2. Définition

*Nonomuraea* regroupe des actinobactéries **Gram positives, aérobies et filamenteuses**, formant un mycélium bien développé, substrat et aérien. Les spores sont produites isolément ou en chaînes courtes, souvent spiralées et parfois ornées. Elles se distinguent des genres voisins par la combinaison des caractères morphologiques, la composition chimique de la paroi et les signatures moléculaires du gène 16S rRNA (**Zhang et al. 1998 ; Chiba et al. 1999 ; Topkara et al. 2025**).

### 5.3. Classification

#### 5.3.1. Critères de classification

##### 5.3.1.1. Critères morphologiques

Le genre se caractérise par un mycélium abondant et ramifié, la formation de spores ovales ou cylindriques, parfois disposées en chaînes spiralées. Les colonies présentent une pigmentation allant du blanc au jaune-orangé (Zhang et al. 1998 ; Nouioui et al. 2018).

##### 5.3.1.2. Critères chimiotaxonomiques et moléculaires

Les parois contiennent l'acide méso-diaminopimélique, la madurose comme sucre diagnostique, et des quinones majeures MK-9(H4, H6). La teneur en G+C est élevée (70–72 mol %). L'identification repose principalement sur le **séquençage du 16S rRNA** et des marqueurs génétiques complémentaires (gyrB, rpoB, atpD). Plus récemment, le **séquençage génomique complet** et l'analyse des indices ANI et dDDH ont permis d'affiner la phylogénie et de décrire de nouvelles espèces (Topkara et al. 2025 ; Aryal et al. 2019 ; Duangupama et al. 2024).

##### 5.3.1.3. Développements récents

L'approche combinant génomique **et métabolomique** permet de relier la phylogénie à la biosynthèse de métabolites secondaires, ouvrant la voie à la découverte de nouvelles molécules bioactives (Duangupama et al. 2024).

### 5.4. Isolement du genre *Nonomuraea*

*Nonomuraea* a été isolé dans différents environnements : sols agricoles, sédiments marins, composts, et comme endophyte chez les plantes.

- En Chine, **Lin et al. (2022)** ont rapporté *Nonomuraea aurantiaca* sp. nov., isolée de sols, productrice de cellulases.
- En Thaïlande, (**Ngamcharungchit et al. (2023)**) ont décrit *Nonomuraea corallina* sp. nov. à partir de sédiments marins, présentant une activité anticancéreuse.
- En Thaïlande, **Duangupama et al. (2024)** ont décrit *Nonomuraea composti* sp. nov., productrice de pradimicine U.

Le genre *Nonomuraea* a été signalé pour la première fois en Algérie à partir de sols sahariens, avec l'isolement de la souche *Nonomuraea* sp. NM94 dans la région de Beni-Abbès. Son identification a reposé sur des analyses morphologiques, physiologiques et moléculaires (séquençage du gène 16S rRNA), confirmant son appartenance à ce genre rare d'actinobactéries (**Badji et al. 2007**). Cette souche a montré un potentiel biotechnologique notable en produisant divers métabolites secondaires bioactifs, actifs contre des bactéries à Gram positif, des levures et des champignons (**Djinni et al. 2019b**). Par ailleurs, *Nonomuraea* a été isolée à partir d'échantillons du lac Fetzara (nord-est de l'Algérie), démontrant que ce genre est également présent dans les écosystèmes humides du pays (**Benhadj et al. 2018**). Ces travaux confirment

que les environnements algériens, arides comme humides, représentent une source prometteuse d'actinobactéries rares capables de produire de nouvelles molécules d'intérêt pharmaceutique.

## 5.5. Morphologie et types de spores

Les spores de *Nonomuraea* sont ovales ou cylindriques, parfois rugueuses, disposées isolément ou en chaînes spirales. Leur morphologie est un critère distinctif essentiel vis-à-vis des genres proches comme *Micromonospora* (Zhang et al. 1998 ; Chiba et al. 1999 ; Aryal et al. 2019).

## 5.6. Écologie et habitats

Le genre est ubiquiste : sols fertiles et désertiques, composts, sédiments marins et eaux douces, ainsi que comme endophyte de plantes. Ces bactéries participent activement à la **dégradation de polymères complexes** (cellulose, chitine, lignine) et au **cycle des nutriments** (Nouioui et al. 2018 ; Ngamcharungchit et al. 2023 ; Duangupama et al. 2024).

## 5.7. Intérêt

### 5.7.1. Métabolites secondaires

- Production d'antibiotiques glycopeptidiques tels que l'A40926 (précurseur de la dalbavancine) (Chiba et al. 1999 ; Topkara et al. 2025).
- Découverte récente de **pradimicine U**, molécule à activité antimicrobienne, antipaludique et anticancéreuse (Duangupama et al. 2024).
- Production de molécules cytotoxiques telles que **brartemicin** (Ngamcharungchit et al. 2023).

### 5.7.2. Production d'enzymes

Certaines espèces produisent des enzymes extracellulaires (cellulases, chitinases, lipases), d'intérêt pour les industries agroalimentaires, pharmaceutiques et environnementales (Lin et al. 2022).

### 5.7.3. Applications agronomiques

Le rôle dans la **solubilisation de substrats complexes** et la **production de métabolites bénéfiques pour les plantes** confère à *Nonomuraea* un potentiel comme biofertilisant en agriculture durable (Nouioui et al. 2018 ; Aryal et al. 2019).

## 6. Le genre *Nocardiopsis*

### 6.1. Historique

Le genre *Nocardiopsis* a été décrit pour la première fois par Meyer (1976), lors de la révision de certaines actinobactéries présentant des caractéristiques morphologiques proches de celles des genres *Nocardia* et *Streptomyces*. Les premières espèces décrites appartenaient à des actinobactéries halotolérantes isolées de sols et de sédiments marins. Depuis, la classification du genre a été affinée grâce à des analyses chimiotaxonomiques et moléculaires, confirmant son appartenance à la famille *Nocardiopsaceae* (Yassin et al. 1997 ; Li et al. 2004).

### 6.2. Définition

*Nocardiopsis* regroupe des actinobactéries **Gram positives, aérobies, filamenteuses**, formant un mycélium bien développé. Le mycélium aérien est abondant et porte des spores formées en longues chaînes rectilignes ou légèrement spiralées. Le genre se distingue des voisins par la composition de la paroi cellulaire (acide méso-diaminopimélique, absence de madurose) et des signatures moléculaires du gène 16S rRNA (Meyer, 1976 ; Li et al. 2004).

### 6.3. Classification

#### 6.3.1. Critères de classification

##### 6.3.1.1. Critères morphologiques

Le genre se caractérise par la formation d'un mycélium aérien abondant, de chaînes de spores cylindriques ou ovoïdes, et d'une pigmentation variant du blanc au jaune pâle. Ces traits morphologiques permettent de le différencier d'autres genres apparentés comme *Streptomyces* ou *Nocardia* (Yassin et al. 1997).

##### 6.3.1.2. Critères chimiotaxonomiques et moléculaires

Les parois contiennent l'acide **méso-diaminopimélique** mais pas de madurose. Les quinones dominantes sont de type **MK-10(H6, H8)**. Le rapport G+C de l'ADN est élevé (65–72 mol %). L'identification repose sur le séquençage du gène **16S rRNA**, ainsi que sur des marqueurs complémentaires tels que **gyrB** et **rpoB**. Plus récemment, le séquençage génomique complet et l'analyse d'indices ANI/dDDH ont permis de clarifier la phylogénie du genre et de décrire de nouvelles espèces (Li et al. 2004 ; Shi et al. 2022).

##### 6.3.1.3. Développements récents

L'approche combinant génomique et métabolomique met en évidence le potentiel de *Nocardiopsis* dans la biosynthèse de métabolites secondaires rares, notamment des peptides cycliques et des antibiotiques à structure originale (Shi et al. 2022).

### 6.4. Isolement du genre *Nocardiopsis*

Les espèces du genre ont été isolées dans des habitats variés :

- Sols désertiques (Yassin et al. 1997 ; Zitouni et al. 2005).
- Sédiments marins et halophiles, souvent associés à des environnements hypersalés (Li et al. 2004).
- Composts et matières organiques en décomposition.
- En Algérie, plusieurs souches de *Nocardioopsis* ont été isolées à partir de sols sahariens et ont montré une production d'antibiotiques et d'enzymes extracellulaires (Zitouni et al. 2005 ; Djinni et al. 2019b).

## 6.5. Morphologie et types de spores

Les spores sont généralement cylindriques ou ovoïdes, lisses ou rugueuses, produites en chaînes rectilignes portées par le mycélium aérien. Cette morphologie constitue un critère distinctif majeur par rapport aux genres voisins comme *Nocardia* (Meyer, 1976 ; Yassin et al. 1997).

## 6.6. Écologie et habitats

*Nocardioopsis* est ubiquiste et présent dans des environnements extrêmes :

- sols arides et désertiques,
- sédiments marins et hypersalés,
- composts et matières organiques,
- certains isolats endophytes chez les plantes.

Ces bactéries participent activement à la dégradation de composés complexes (cellulose, chitine, kératine) et jouent un rôle écologique dans les cycles biogéochimiques (Li et al. 2004 ; Shi et al. 2022).

## 6.7. Intérêt

### 6.7.1. Métabolites secondaires

- Production de peptides cycliques antimicrobiens et d'antibiotiques macrolactames (Li et al. 2004).

- Découverte de molécules cytotoxiques et antifongiques (Shi et al. 2022).

- Production de **nocardicines** et autres métabolites d'intérêt pharmaceutique.

### 6.7.2. Production d'enzymes

*Nocardioopsis* est une source reconnue de protéases, kératinases, cellulases et chitinases, utiles dans l'industrie pharmaceutique, agroalimentaire et environnementale (Zitouni et al. 2005 ; Djinni et al. 2019b).

### 6.7.3. Applications biotechnologiques et agronomiques

Grâce à leur capacité à dégrader les substrats complexes et à produire des métabolites bioactifs, les espèces de *Nocardioopsis* sont étudiées pour leurs applications potentielles comme agents de biocontrôle et biofertilisants (Djinni et al. 2019b).

## 7. Le genre *Gordonia*

### 7.1. Historique

Le genre *Gordonia* a été proposé par **Tsukamura (1971)** à la suite de travaux taxonomiques portant sur des actinobactéries apparentées aux genres *Rhodococcus* et *Nocardia*. Ces bactéries, initialement classées parmi les mycobactéries atypiques, ont été révisées sur la base de caractéristiques morphologiques, biochimiques et de la composition de leur paroi cellulaire. Par la suite, les analyses phylogénétiques fondées sur le gène 16S rRNA ont confirmé leur appartenance à un taxon distinct, aujourd'hui inclus dans la famille des Gordoniaceae (**Tsukamura, 1971 ; Arenskötter et al. 2004**).

### 7.2. Définition

*Gordonia* regroupe des actinobactéries Gram positives, aérobies, non sporulées, à croissance relativement lente, produisant un mycélium fragmenté en bâtonnets ou coccoïdes. Elles se distinguent des genres voisins par la présence d'acide méso-diaminopimélique et d'arabinogalactane dans la paroi cellulaire, ainsi que par la composition spécifique de leurs acides mycoliques. L'analyse moléculaire (16S rRNA) permet de les distinguer clairement de *Rhodococcus* et *Nocardia* (**Arenskötter et al. 2004 ; Nouioui et al. 2018**).

### 7.3. Classification

#### 7.3.1. Critères de classification

##### 7.3.1.1. Critères morphologiques

Les bactéries du genre *Gordonia* présentent des colonies lisses à rugueuses, pigmentées en jaune, orange ou crème. Au microscope, elles apparaissent sous forme de bâtonnets pléomorphes ou de fragments coccoïdes issus de la fragmentation du mycélium.

##### 7.3.1.2. Critères chimiotaxonomiques et moléculaires

La paroi cellulaire contient de l'acide méso-diaminopimélique et des acides mycoliques de longueur intermédiaire (34–66 atomes de carbone). Les quinones prédominantes sont de type MK-9(H2). Le taux de G+C de l'ADN est compris entre 63 et 67 mol %. L'identification repose sur l'analyse du gène 16S rRNA, complétée par des marqueurs comme *gyrB*, *hsp65* et *secA1*, ainsi que par le séquençage génomique complet pour la résolution phylogénétique fine (**Arenskötter et al. 2004 ; Nouioui et al. 2018**).

##### 7.3.1.3 Développements récents

Les approches génomiques et métabolomiques ont révélé la diversité métabolique du genre, notamment dans la dégradation des hydrocarbures et la biosynthèse de métabolites secondaires à potentiel thérapeutique (**Nouioui et al. 2018**).

### 7.4. Isolement du genre *Gordonia*

*Gordonia* est isolé à partir d'environnements variés :

- Sols contaminés par des hydrocarbures et solvants organiques (**Arenskötter et al. 2004**).
- Boues activées et milieux aquatiques riches en composés aromatiques.
- Sites pollués aux hydrocarbures en Algérie, où plusieurs souches ont été identifiées comme capables de dégrader des hydrocarbures aromatiques polycycliques (**Djinni et al. 2019b**).
- Cas cliniques : certaines espèces sont opportunistes et ont été isolées chez des patients immunodéprimés.

## 7.5. Morphologie et types de spores

Contrairement à d'autres genres d'actinobactéries, *Gordonia* ne produit pas de spores véritables. Le mode de reproduction repose sur la fragmentation du mycélium en éléments bacillaires ou coccoïdes, assurant la dissémination bactérienne (**Tsukamura, 1971**).

## 7.6. Écologie et habitats

Le genre est ubiquiste et retrouvé dans :

- sols, eaux douces et marines,
- milieux riches en hydrocarbures ou solvants,
- environnements extrêmes contaminés,
- hôtes humains ou animaux (opportuniste).

Ces bactéries jouent un rôle écologique important dans la biodégradation de composés organiques complexes et polluants, notamment les hydrocarbures aromatiques polycycliques et les composés sulfurés (**Arenskötter et al. 2004**).

## 7.7. Intérêt

### 7.7.1. Métabolites secondaires

- Production de molécules bioactives aux propriétés antimicrobiennes et anticancéreuses.
- Synthèse de composés tensioactifs et de dérivés lipidiques à activité biologique.

### 7.7.2. Production d'enzymes

*Gordonia* produit de nombreuses enzymes extracellulaires (lipases, amidases, monoxygénases, nitrilases) impliquées dans la dégradation des hydrocarbures et autres polluants organiques (**Arenskötter et al. 2004**).

### 7.7.3. Applications biotechnologiques et agronomiques

- Biodépollution (bioremédiation des hydrocarbures, solvants chlorés, plastiques biodégradables).
- Production de biosurfactants utiles en industrie pétrochimique et pharmaceutique.
- Applications potentielles en agriculture durable grâce à la dégradation de composés toxiques dans les sols (**Nouioui et al. 2018**).

# **MATERIEL ET METHODES**

## 1. Site d'étude

Les actinomycètes endophytes sont recherchées dans une plante du genre *Artemisia* provenant des régions de Sahara (Tamanrasset, Djanet, Ghardaïa et M'sila), Sebkhia (Oum el Bouaghi) et les montagnes de (Naâma et Batna).

La localisation géographique des plantes prélevées est indiquée dans le **Tableau .3, 4** et la **Figure.8**.

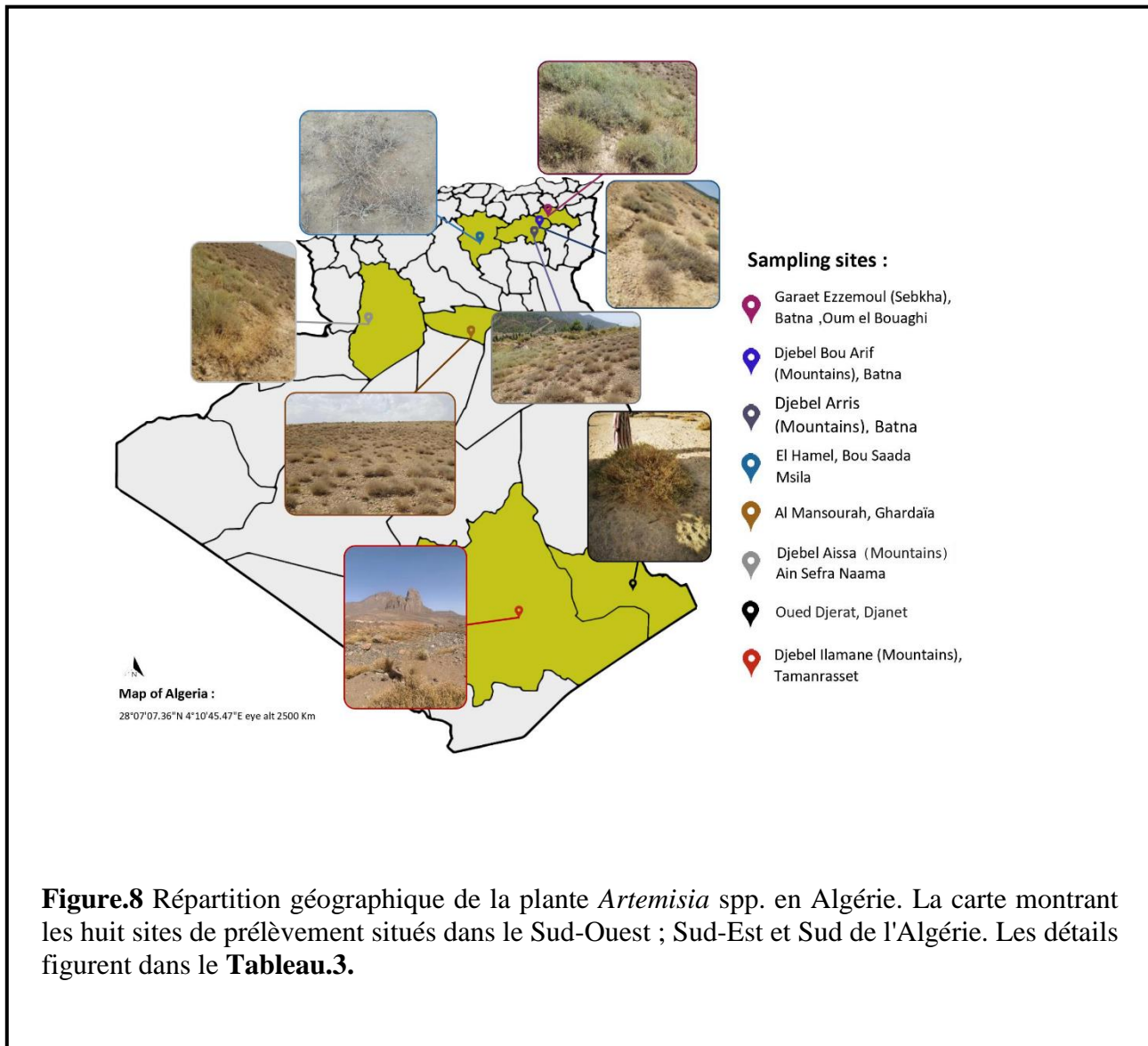
**Tableau .3** Répartition géographique de la plante *Artemisia* dans le Sud-Est ; Sud-ouest et sud de l'Algérie.

Plantes	Dates de récolte	Sites de récolte	Coordonnées géographiques
<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Décembre 2017	Djebel BouArif (Montagnes), Batna, Algérie.	35°36'49" N ; 6° 26' 19" E
<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Mars 2017	Garaet Ezzemoul (Sebkhia), Oum el Bouaghi, Algérie.	35 ° 52 '30 " N ; 6 ° 32' 50" E
<i>Artemisia judaica</i> L.ssp. <i>sahariensis</i>	Décembre 2017		
	Mars 2018	Oued Djerat, Djanet, Algérie.	24 ° 33 '18 " N ; 9 ° 29' 06" E
<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Mars 2018	Djebel Arris (Montagnes), Batna, Algérie.	35 ° 15 '30 " N ; 6 ° 20' 40" E
<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Décembre 2020	Al Mansourah, Ghardaïa, Algérie.	31°58'46" N ; 3°44'46" E
<i>Artemisia campestris</i>	Janvier 2021	El Hamel, Bou Saada M'sila, Algérie.	35°08'00" N ; 4°05'00" E
<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Mars 2021	Djebel Aissa (Montagnes), Ain Sefra Naâma, Algérie.	32°52'23" N ; 0°29'10" E
<i>Artemisia judaica</i> L. ssp. <i>sahariensis</i>	Mars 2022	Djebel Ilamane (Montagnes), Tamanrasset, Algérie.	23°11'59" N ; 05° 27' 0" E

**Tableau .4** Caractéristiques des sites d'échantillonnages localisés dans le Sud-Est ; Sud-ouest et sud de l'Algérie.

Paramètres	Djebel Bou Arif (Batna)	Sebkha Ezzemoul (Oum el Bouaghi)	Djebel Arris (Batna)	El Hamel (M'Sila)	Al Mansourah (Ghardaïa)	Djebel Aïssa (Naâma)	Oued Djerat (Djanet)	Djebel Ilamane (Tamanrasset)
<b>Altitude / Relief</b>	≈1500 m, montagne	≈800–900 m, dépression	≈900–1100 m, montagne	≈850 m, vallée	≈450–550 m, désert	≈2236 m, montagne	≈1240–574 m, canyon	≈2270 m, montagne
<b>Climat</b>	Semi-aride, été modéré, hiver froid	Semi-aride, forte évaporation	Semi-aride continental	Semi-aride sec	Désertique chaud	Montagnard, hiver neige	Désertique chaud	Saharo-montagnard
<b>Sol / Roches</b>	Calcaires, dolomies, marnes	Argiles, limons, croûtes salines	Calcaires, argiles locales	Alluvions sable-argile	Sableux, sable-argileux	Roches sédimentaires	Grès (Tassili)	Roches volcaniques
<b>Hydrologie</b>	Infiltration karstique	Eaux temporaires	Sources locales	Oued + sources	Nappe souterraine, oasis	Oueds saisonniers	Oued intermittent	Ruissellements temporaires
<b>Salinité</b>	Faible	Très élevée (≈25–49%, (Ramsar))	Faible	Modérée	Modérée	Faible	Modérée	Modérée

- Ramsar Site Information Sheet : Sebkha Ezzemoul (salinité mesurée)
- Études géologiques et climatiques locales (Aurès, Hoggar, Tassili, Atlas saharien)
- Sources : Wikipedia, MapCarta, CNES Geoimage, DB-City, Accuweather, CRSTRA



## 2. Échantillonnage

### 2.1. Récolte des plants d'*Artemisia*

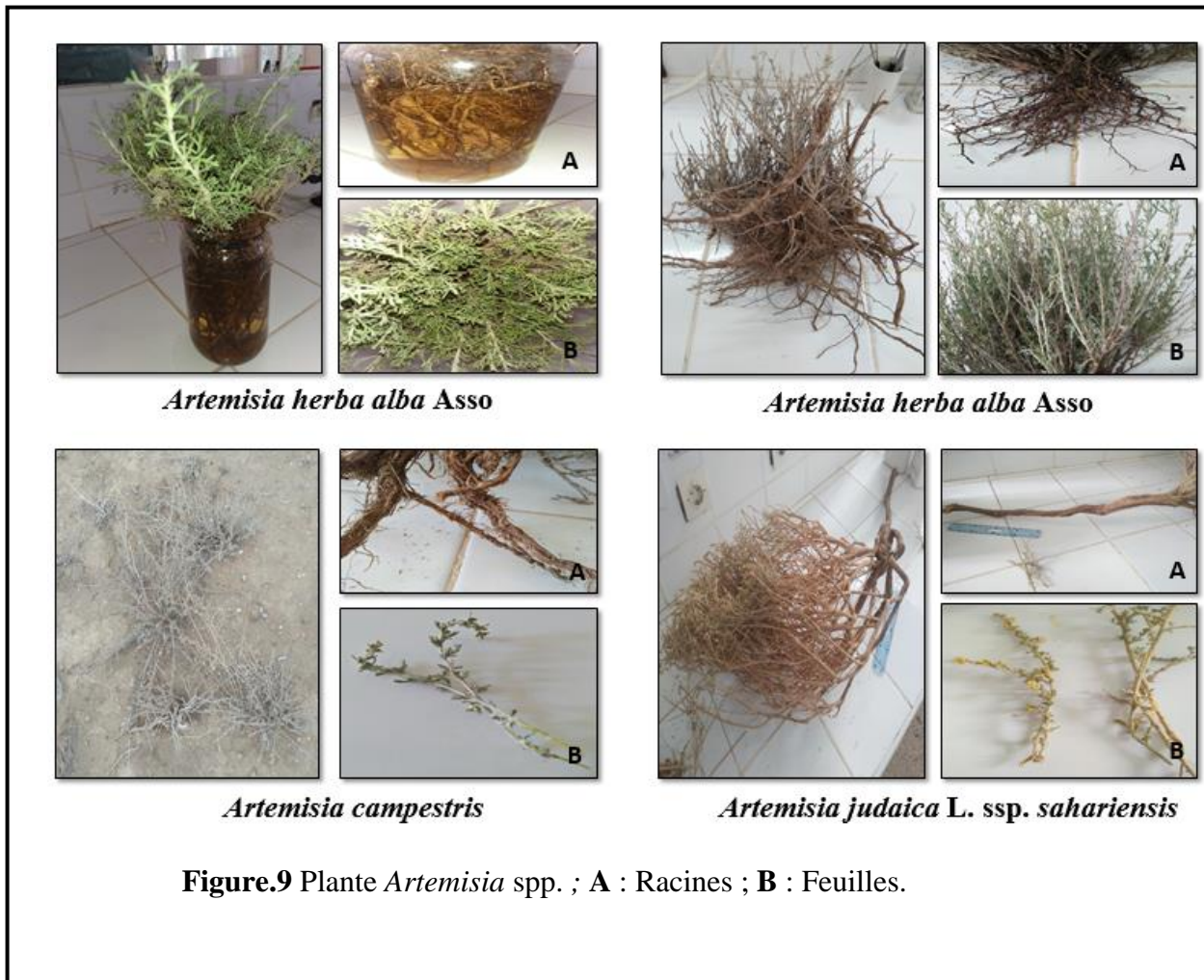
Trente et un (31) échantillons de plantes d'*Artemisia* spp. ont été collectés entre décembre et mai, durant les années 2017, 2018, 2020, 2021 et 2022, sur huit sites répartis dans le sud-ouest, le sud-est et le sud de l'Algérie (**Tableau 3**). Les échantillons ont été placés dans des sacs plastiques stériles, transférés au Laboratoire de Microbiologie de l'Université Badji Mokhtar (Annaba), puis utilisés pour l'isolement des actinomycètes endophytes et traités dans un délai de 48 heures (**Figure.9**). Ces échantillons de plantes ont été observés avant le processus de stérilisation. L'état général de la plante a été évalué et les racines ont été mesurées. Cette étape permet de conserver une trace de l'état initial de l'échantillon avant toute manipulation (**Tableau .5**).

**Tableau .5** Différentes parties de la plante avant stérilisation

Sites de récolte	Plantes	Tailles des racines	Etat de santé	Remarques
Garaet Ezzemoul (Sebkha), Oum el Bouaghi	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	15 cm	Très Bonne	Bonne odeur aromatique Présence de fleurs
Djebel BouArif (Montagnes), Batna	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	18 cm	Très bonne	Bonne odeur aromatique
Djebel Arris (Montagnes), Batna	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	23 cm	Très bonne	Présence de fleurs
El Hamel, Bou Saada M'sila	<i>Artemisia campestris</i>	25 cm	Bonne	Bonne odeur aromatique
Al Mansourah, Ghardaïa	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	24 cm	Bonne	Bonne odeur aromatique
Djebel Aïssa (Montagnes), Ain Sefra Naâma	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	27 cm	Très bonne	Bonne odeur aromatique Présence de fleurs
Oued Djerat, Djanet	<i>Artemisia judaica</i> L. ssp. <i>sahariensis</i>	65 cm	Très bonne	Odeur forte Présence de fleurs
Djebel Ilamane (Montagnes) Tamanrasset,	<i>Artemisia judaica</i> L. ssp. <i>sahariensis</i>	80 cm	Très bonne	Odeur forte Présence de fleurs

**Bonne** : globalement saine, feuilles vertes avec peu de défauts, croissance normale.

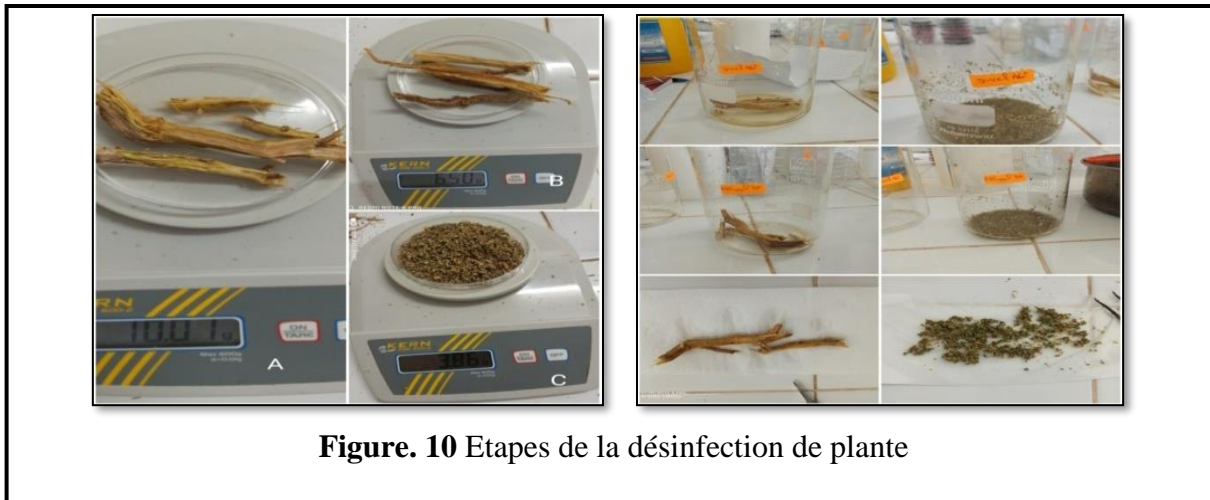
**Très bonne** : excellente santé, feuilles bien vertes, sans taches ni jaunissement, croissance rapide et régulière, pas de maladies ni de parasites visibles.



## 2.2. Préparation des échantillons

### 2.2.1. Désinfection de la surface des plants

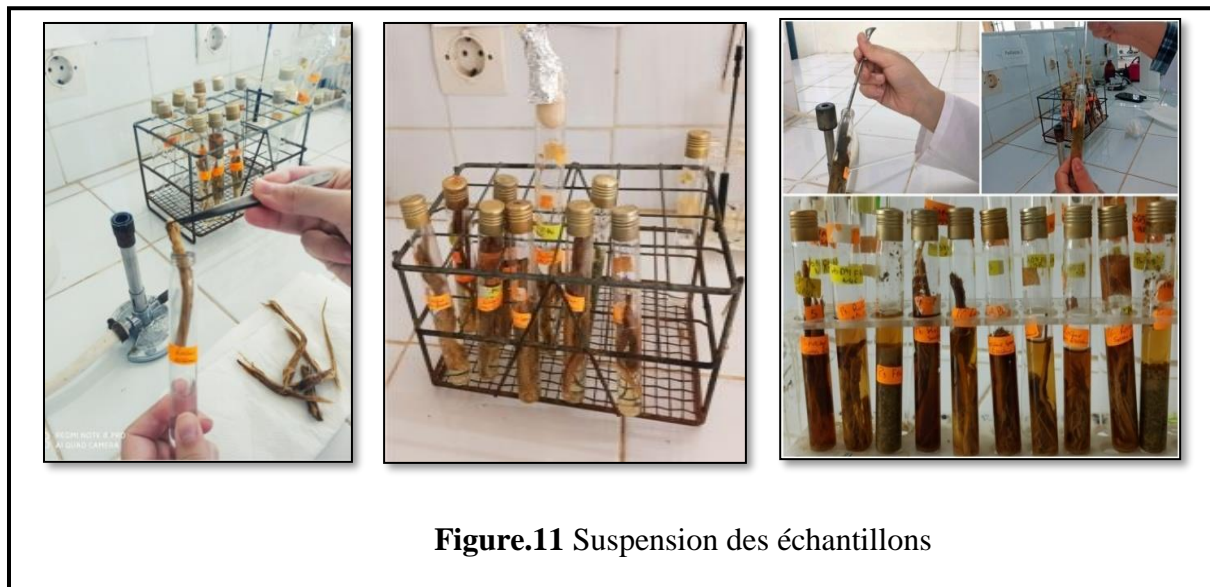
Les échantillons frais d'*Artemisia* ont été lavés à l'eau courante pour éliminer le sol, la matière organique et les micro-organismes épiphytes, puis séchés à température ambiante (Coombs et Franco, 2003). Les racines et les feuilles ont été séparées et soumises à une stérilisation de surface selon une méthode adaptée de Qin et al. (2011). Le protocole comprenait une immersion dans du Tween 20 (0,1 %, 1 min), suivie d'un traitement à l'hypochlorite de sodium (NaClO, 5 % ; 4 min pour les feuilles et 6 min pour les racines), puis d'un bain de thiosulfate de sodium (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2,5 %, 10 min) pour neutraliser le chlore résiduel (Miche et Balandreau, 2001 ; Qin et al. 2009). Les tissus ont ensuite été rincés trois fois à l'eau stérile, immergés dans de l'éthanol (70 % ; 4 min pour les feuilles et 6 min pour les racines), puis lavés à l'eau distillée stérile. Après séchage à l'air, les racines et les feuilles ont été aseptiquement broyées. L'efficacité de la désinfection de surface a été vérifiée en étalant 0,2 ml de la dernière eau de rinçage sur un milieu solide ISP2 (Shirling et Gottlieb, 1966), puis en incubant les boîtes à 28 ± 2 °C (Figure. 10).



**Figure. 10** Etapes de la désinfection de plante

### 2.3. Préparation des suspensions des échantillons

La suspension mère a été préparée en ajoutant 10 g d'échantillon (racines ou feuilles) à 9 ml d'eau physiologique stérile. À partir de cette suspension, des dilutions en série ont été réalisées en transférant 1 ml dans 9 ml d'eau stérile, permettant d'obtenir des dilutions successives ( $10^{-1}$  à  $10^{-4}$ ). Les tissus stérilisés de racines et de feuilles, préalablement homogénéisés et macérés, ont ainsi été soumis à ces dilutions dans une solution saline physiologique de NaCl à 0,9 % en vue de l'isolement microbien (**Figure.11**).



**Figure.11** Suspension des échantillons

### 3. Isolement des actinomycètes endophytes

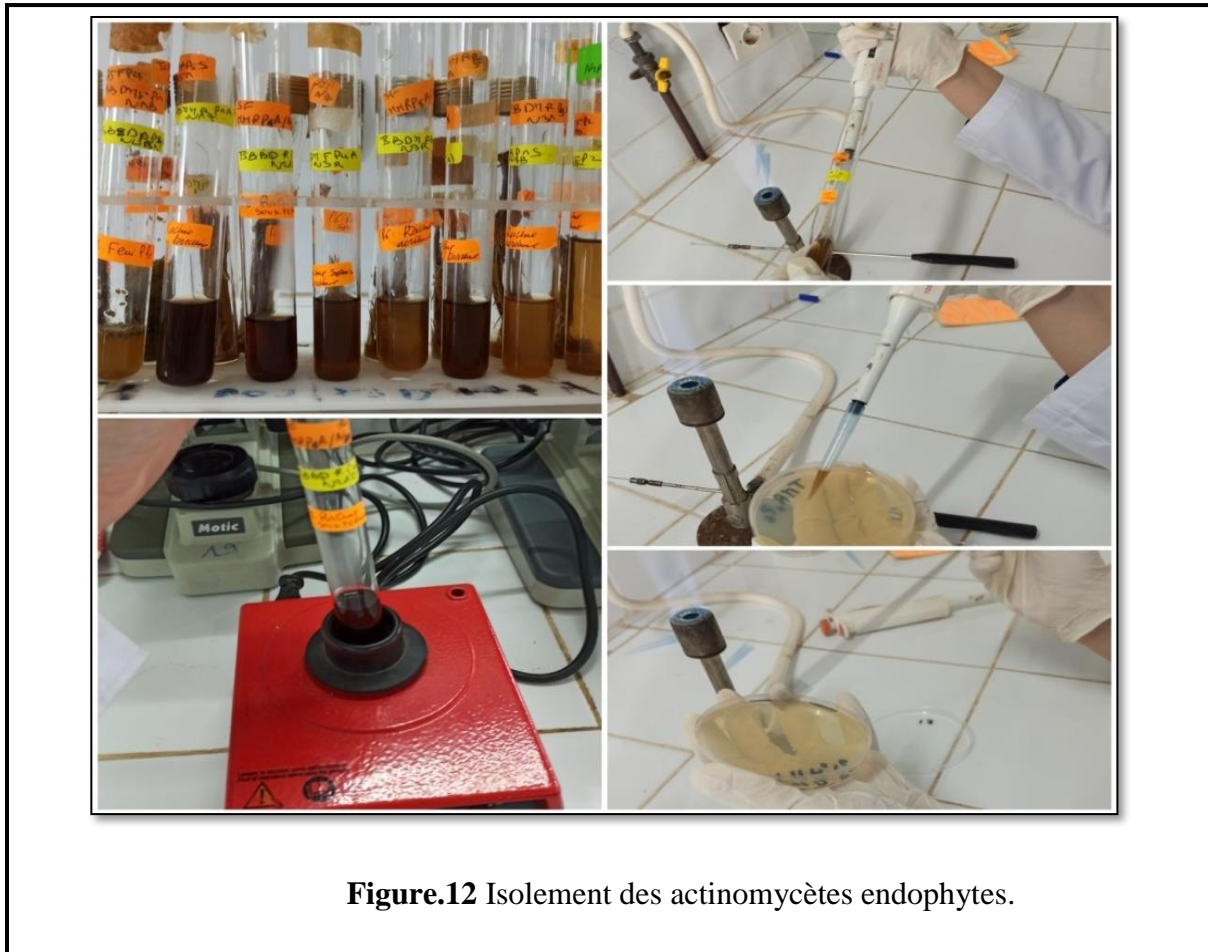
Une solution de base a été préparée avec 10 g de feuilles d'*Artemisia* dans 1 L d'eau distillée. Différents milieux de culture sélectifs ont ensuite été utilisés pour l'isolement des actinomycètes endophytes, notamment le FSA (farine de soja agar), le FAA (farine d'avoine agar), le MPA (minerai de phosphate naturel de Djebel Onk, Tébessa, agar, proposé dans cette étude), ainsi que le milieu sélectif (TSB), également supplémentés par une infusion de feuilles d'*Artemisia*, ont été employés spécifiquement pour l'isolement des actinobactéries. Les

compositions détaillées de ces milieux sont présentées dans le **Tableau.6**. Le pH variait de 6,8 à 7,2 et les cultures ont été observées après quatre semaines d'incubation à  $28 \pm 2$  °C (**Figure 12**).

**Tableau.6** Compositions des différents milieux de cultures utilisés (1litre)

Compositions	Milieux	FSA	FAA	MPA	TSB
<b>Farine de soja</b>		20g	/	/	/
<b>Farine d'avoine</b>		/	60g	/	/
<b>Caséine tryptique</b>		/	/	/	17g
<b>Hydrolysate papaique de soja</b>		/	/	/	3g
<b>Tryptone</b>		/	/	/	/
<b>Extrait de malt</b>		/	/	/	/
<b>Fe SO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O</b>		/	/	0.002g	/
<b>Minerai de Phosphate (roche)</b>		/	/	15g	/
<b>Extrait de levure</b>		/	/	0.5g	/
<b>Glucose</b>		/	/	10g	2.5g
<b>KCl</b>		/	/	0.2g	/
<b>Mg SO<sub>4</sub>. 7H<sub>2</sub>O</b>		/	/	0.1g	/
<b>(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>		/	/	0.5g	/
<b>NaCl</b>		/	/	0.2g	0.5g
<b>K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub></b>		/	/	/	2.5g
<b>MnSO<sub>4</sub>. 7H<sub>2</sub>O</b>		/	/	0.002g	/
<b>feuilles d'Artemisia</b>		10g	10g	10g	10g
<b>Eau distillée</b>		1L	1L	1L	1L
<b>Agar</b>		20g	20g	15g	15g
<b>pH</b>		7.2	7.2	6.8	7.2

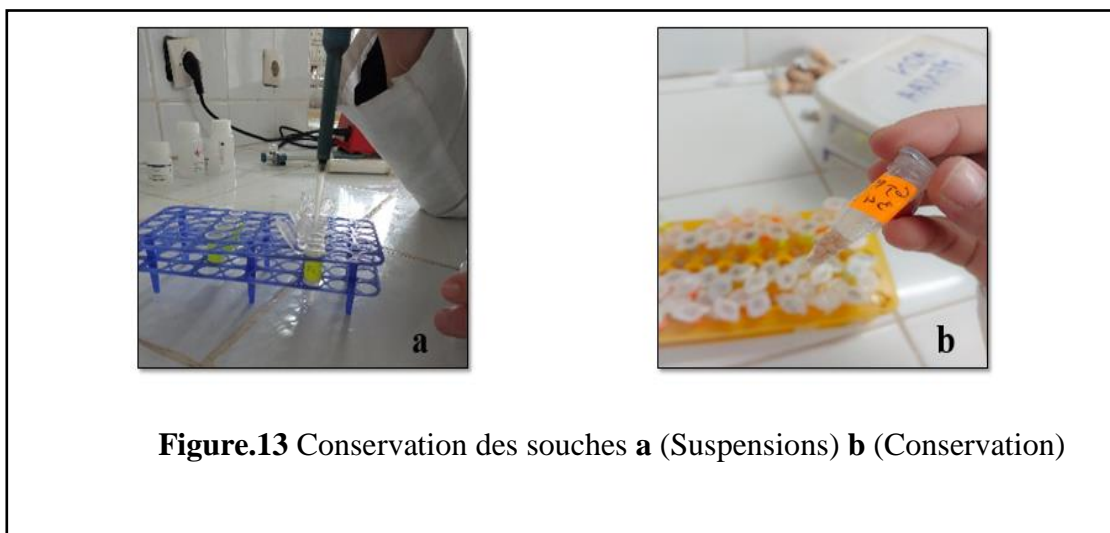
FSA (farine de soja agar), FAA (farine d'avoine agar), MPA (minerai de Phosphate naturel récolté de Djebel Onk de Tebessa agar) et TSB (Bouillon trypticase-soja).



**Figure.12** Isolement des actinomycètes endophytes.

#### 4. Purification et conservation des souches

Une série de repiquages sur les milieux FSA, FAA, MPA et TSB a été réalisée. Les colonies pures obtenues ont été ensemencées dans des tubes de gélose inclinés contenant les mêmes milieux de culture et incubées pendant 7 à 14 jours à  $28 \pm 2$  °C, puis conservées à 4 °C pour une utilisation à court terme. Pour une conservation à long terme, elles ont été stockées à  $-20$  °C dans des suspensions de glycérol à 30 % (v/v), conformément à la méthode décrite par **Passari et al. (2017) (Figure 13)**.



**Figure.13** Conservation des souches **a** (Suspensions) **b** (Conservation)

## 5. Etude de la diversité des actinomycètes endophytes.

### 5.1. Etude macroscopique

La sélection des isolats appartenant aux actinomycètes a été réalisée sur les caractères phénotypique des colonies, incluant la morphologie, la couleur du mycélium aérien et du mycélium substrat, ainsi que la présence ou l'absence de pigments diffusibles (**Basavaraj et al. 2010**). Les observations ont été effectuées sur différents milieux solides (FSA, FAA, MPA, ISP1, ISP2, ISP4, ISP5 et TSB) après incubation à  $28 \pm 2$  °C pendant 7, 14 et 21 jours (**Shirling et Gottlieb, 1966**). Les couleurs ont été déterminées à l'aide des cartes **ISCC-NBS** (échantillons standards, n° 2106) (**Kelly, 1964**). Les milieux ISP ont été utilisés exclusivement pour la caractérisation morphologique, et leurs compositions sont fournies dans le **Tableau 7**.

Parmi l'ensemble des colonies récupérées, environ 82 isolats représentatifs ont été retenus, couvrant une large diversité morphologique et présentant des traits typiques d'actinomycètes (colonies filamenteuses, production de pigments mélanoïdes). Cette sélection a été renforcée par des tests fonctionnels (tolérance au sel, activité antibactérienne, production d'enzymes extracellulaires et solubilisation du phosphate), afin d'identifier des candidats prometteurs adaptés à des environnements extrêmes et dotés d'un potentiel bioactif.

**Tableau.7** Composition des milieux ISP (ISP1 à ISP5) utilisés pour la caractérisation morphologique des actinobactéries endophytes.

Composition des milieux de culture	ISP1	ISP2	ISP4	ISP5
Amidon soluble	/	/	10g	/
Glycérol	/	/	/	10g
L-Asparagine	/	/	/	0.1g
Extrait de levure	3g	4g	/	/
Glucose	/	4g	/	/
Tryptone (Digestat pancréatique de caséine)	5g	/	/	/
Extrait de malt	/	10g	/	/
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	/	/	1g	0.5g
CaCO <sub>3</sub>	/	/	2g	/
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	/	/	2g	/
NaCl	5g	/	1g	0.5g
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	/	/	1g	0.5g
FeSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	/	/	0.001g	0.001g
MnCl <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	/	/	0.001g	/
ZnSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	/	/	0.001g	/
Eau distillée	1L	1L	1L	1L
Agar	15g	15g	15g	15g

### 5.2. Etude microscopique

L'observation microscopique des isolats (objectif ×100) après coloration de Gram permet d'apprécier l'aspect filamenteux des actinomycètes, la disposition des chaînes de spores et la présence ou l'absence de spores isolées (**Kieser et al. 2000**).

## 6. Caractéristiques physiologiques

Les isolats ont été ensemencés sur milieu ISP2 supplémenté en NaCl (0 %, 5 %, 10 %, 15 % et 20 %) et incubés à  $28 \pm 2$  °C pendant 7 jours, afin d'évaluer l'effet de la salinité sur la croissance, la sporulation et la production de pigments (Li et al., 2003a, b, c ; Saurav et Kannabiran, 2010 ; Thumar et Singh, 2007).

Les cultures sont incubées à différentes températures (5°C ; 10°C ; 15°C ; 20°C ; 25°C ; 35°C ; 45°C et 50°C). Enfin, la production de pigments mélanoides a été évaluée sur milieu ISP7 selon la méthode décrite par Shirling et Gottlieb (1966).

## 7. Extraction d'ADN et identification moléculaire des souches endophytes par séquençage du gène de l'ARNr 16S

### 7.1. Extraction de l'ADN génomique

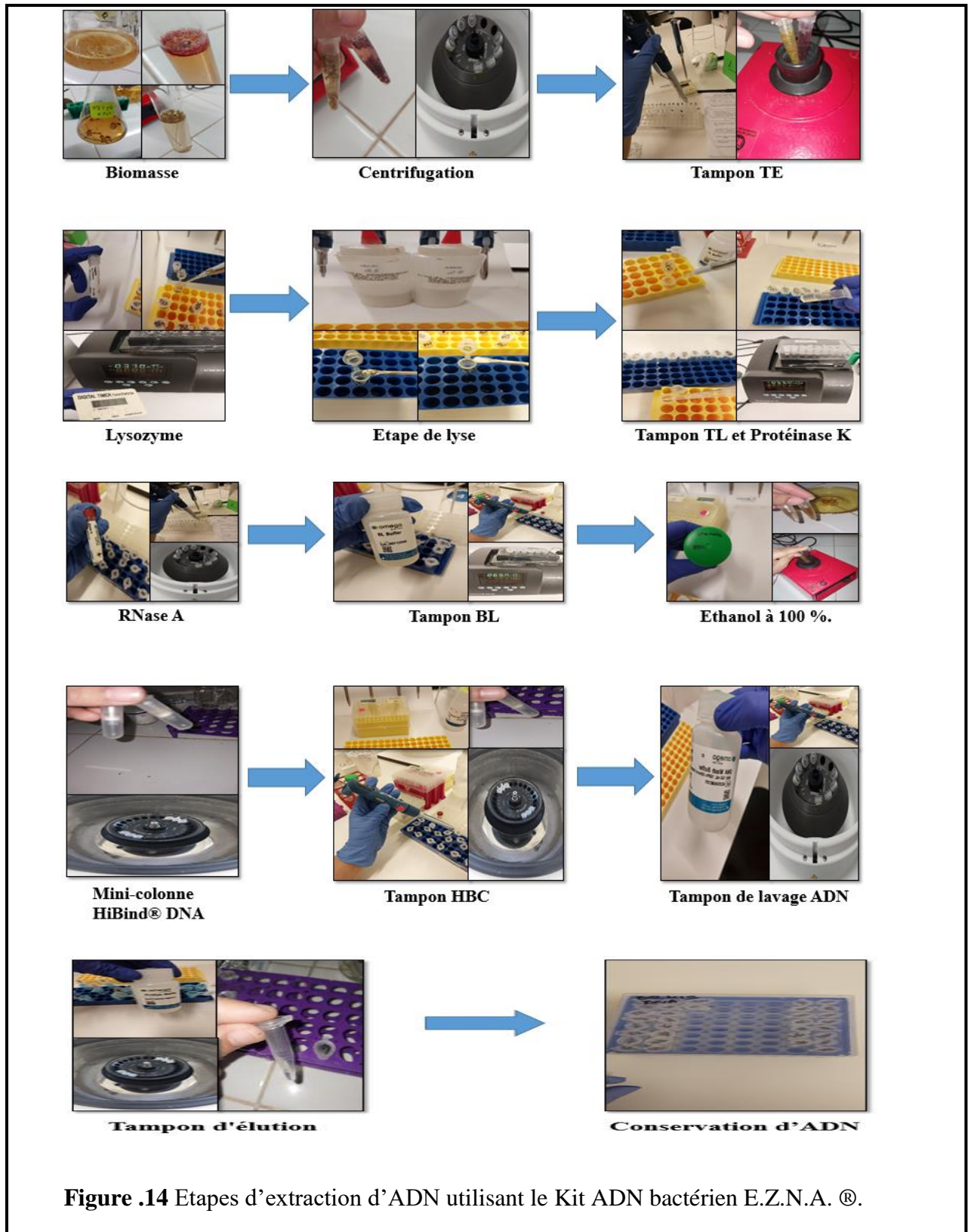
La culture des isolats se fait dans le bouillon Tryptone-Soja TSB (Annexe.1) (2 ml de culture ont été centrifugés pendant 5 min à 7 000 g) ; le culot obtenu est utilisé pour l'extraction de l'ADN génomique.

L'extraction de l'ADN a été réalisée au CIIMAR (Centre Interdisciplinaire de Recherche Marine et Environnementale, Porto ; Portugal) en utilisant E.Z.N.A. Kit ADN bactérien (Omega Bio-Tek, GA, États-Unis), suivant les instructions du fabricant (Figure.14).

#### Protocole d'extraction d'ADN en utilisant Kit bactérien E.Z.N.A. ®

- Culture des isolats dans un milieu TSB liquide.
- Prélever 2 ml de culture liquide et centrifuger pendant 5 min à 7 000 g à température ambiante.
- Ajouter 100 µl de tampon TE puis vortexer pour avoir une suspension homogène.
- Ajouter 10 µL de Lysozyme puis incubé à 37°C pendant 10 minutes.
- Ajouter 25 mg de perles de verre S dans un tube de micro centrifugeuse de 1,5 ml.
- Transférer le surnageant dans un nouveau tube de micro centrifugeuse de 1,5 ml.
- Ajouter 100 µl de tampon TL et 20 µl de solution de protéinase K puis vortexer pour bien mélanger puis incubé à 55°C dans un bain-marie agité pendant 1h.
- Ajouter 5 µl d'ARNase.
- Mélanger (inverser) le tube plusieurs, laisser reposer à température ambiante pendant 5 minutes.
- Centrifuger à 10 000 x g pendant 2 minutes pour sédimenter toute matière non digérée.
- Transférer le surnageant dans un nouveau tube de micro centrifugeuse de 1,5 ml.
- Ajouter 220 µl de tampon BL puis vortexer pour bien mélanger.
- Incuber à 65°C pendant 10 minutes.
- Ajouter 220 µl d'éthanol à 100 %.
- Vortexer 20 secondes à vitesse maximale pour mélanger soigneusement.
- Insérer une mini-colonne HiBind® DNA dans un tube de prélèvement de 2 ml.
- Transférer l'intégralité de l'échantillon dans la mini-colonne HiBind® DNA, y compris tout précipité qui a pu se former.
- Centrifuger à 10 000 x g pendant 1 minute.
- Jeter le filtrat et le tube de collecte.
- Insérer la mini-colonne HiBind® DNA dans un nouveau tube de prélèvement de 2 ml.
- Ajouter 500 µl de tampon HBC.
- Centrifuger à 10 000 x g pendant 1 minute.

- Jeter le filtrat et réutiliser le tube de collecte.
- Ajouter 700 µl de tampon de lavage ADN.
- Centrifuger à 10 000 x g pendant 1 minute.
- Jeter le filtrat et réutiliser le tube de collecte.
- Faire une deuxième étape de lavage de l'ADN.
- Centrifuger la mini-colonne HiBind® DNA vide à vitesse maximale ( $\geq 13\ 000$  x g) pendant 2 minutes pour libérer l'ADN de la colonne.
- Insérer la mini-colonne HiBind® DNA dans une micro centrifugeuse de 1,5 ml.
- Ajouter 50 à 100 µl de tampon d'élution chauffé à 65°C.
- Laisser reposer 3 à 5 minutes à température ambiante.
- Centrifuger à 10 000 x g pendant 1 minute pour éluer l'ADN.
- Faire une deuxième étape d'élution.
- Conserver l'ADN élué à -20°C.



**Figure .14** Etapes d'extraction d'ADN utilisant le Kit ADN bactérien E.Z.N.A. ®.

## 7.2. Dosage de la quantité d'ADN

Chaque échantillon d'ADN génomique extrait a été dosé en utilisant un nano drop (appareil de quantification). La qualité de l'ADN est évaluée selon le rapport  $RF = \lambda_{260} / \lambda_{280}$ . La

densité optique (DO) est mesurée à 260 nm (longueur d'onde d'absorption des acides nucléiques) et à 280nm (longueur d'onde d'absorption des protéines). Cette quantification nous permet d'établir la quantité d'ADN pure utilisable pour les réactions de la polymérisation en chaînes (PCR). (Desjardins et conklin ,2010) (Figure.15).

### 7.3. Amplification par PCR de l'ARNr 16S

Le gène de l'ARNr 16S a été amplifié par réaction en chaîne par polymérase (PCR) en utilisant les amorces universelles 1492R (5'-GGTTACCTTGTTACGACTT-3 ') et 27F (5'-GAGTTTGATCCTGGCTCAG-3') ; (Stackebrandt et Goodfellow, 1991). Un volume total de 10 µl de mélange PCR contenant (1 µl) de chaque amorce 27F et 1492R (2 µM), 5 µl de Taq PCR Master Mix (Qiagen, Valencia, CA, USA) et 3 µl de matrice d'ADN. Les conditions de PCR sont :

- une étape de dénaturation à 95°C pendant 15 min.
- 30 cycles à 94°C pendant 30 s, 48°C pendant 90 s, 72°C pendant 90 s et une étape finale d'extension à 72°C pendant 10 min (Figure.15).

### 7.4. Electrophorèse sur gel d'agarose et révélation des bandes d'ADN

Les produits de PCR ont été séparés sur un gel d'agarose à 1,5 % contenant SYBR Safe (Thermo Fisher Scientific, NY, USA), à 150 V pendant 30 min (Ribeiro et al. 2020) (Figure.15).

### 7.5. Séquençage des produits de PCR, analyse des séquences et identification des isolats

La purification et le séquençage des fragments amplifiés ont été réalisés à GenCore, i3S (*Instituto de Investigação e Inovação em Saúde, Portugal*).

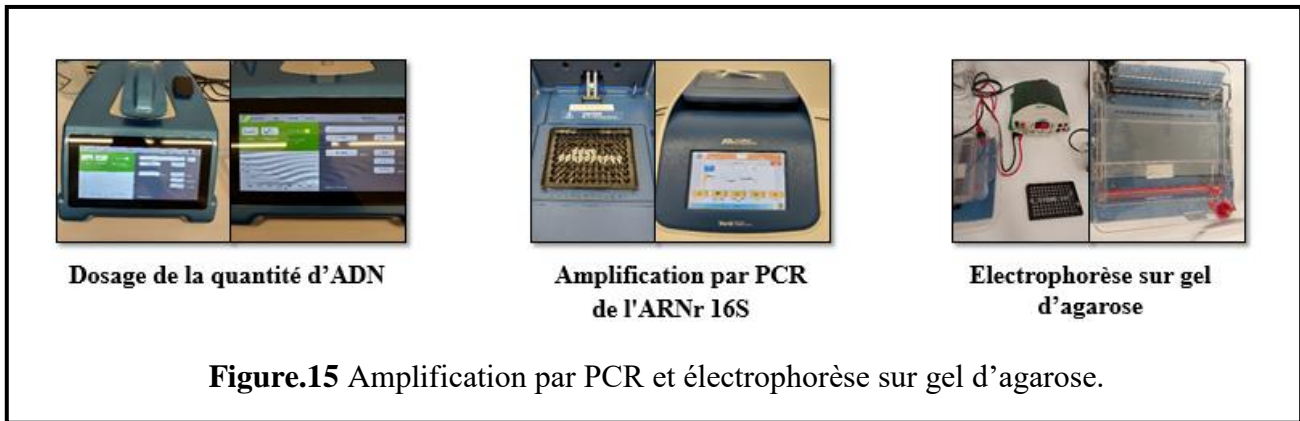
Les séquences ont été analysées à l'aide du logiciel *Geneious Prime* (version 11.1.4) ; (Biomatters, Auckland, Nouvelle-Zélande) et les séquences consensus obtenues ont été comparées à la base de données de collection de nucléotides (nr/nt) de NCBI BLAST en utilisant l'algorithme blastn (<https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>) puis confirmé par une comparaison supplémentaire avec les bases de données EzTaxon (<http://www.ezbiocloud.net/>) (Kim et al. 2012b).

Les séquences génétiques de l'ARNr 16S des isolats endophytes ont été déposées dans GenBank® (NCBI, Maryland, États-Unis) avec les numéros d'accès.

### 7.6. Analyses phylogénétiques des souches endophytes

Des analyses phylogénétiques ont été réalisées à l'aide de l'analyse génétique évolutive moléculaire (MEGA.11).

Quatre arbres phylogénétiques ont été réalisé en alignant les 82 séquences 16S rRNA des isolats endophytes et les séquences voisines les plus proches dans Genbank pour chaque isolat, à l'aide de l'outil d'alignement MUSCLE du logiciel Geneious. L'alignement a été utilisé pour générer un arbre phylogénétique à vraisemblance maximale avec 1000 bootstraps basé sur le modèle Tamura-Nei.



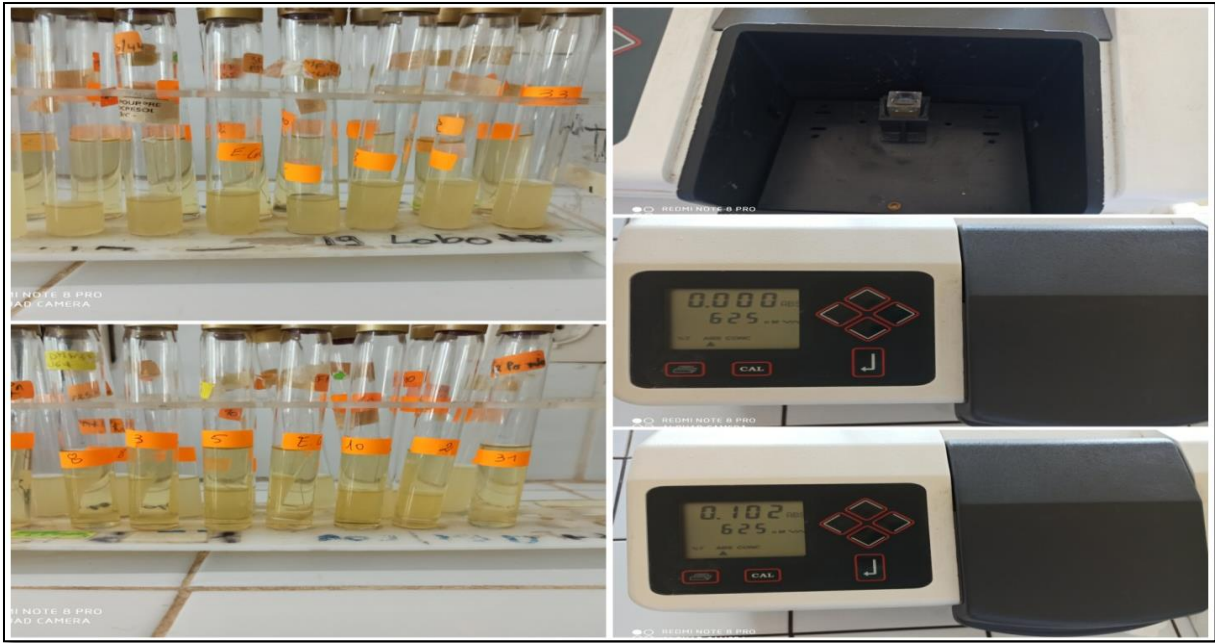
## 9. Recherche de l'activité antibactérienne

L'activité antibactérienne des souches endophytes a été évaluée sur les milieux ISP2 et TSA (gélose tryptone soja) (**Annexe 2**) en utilisant la méthode des stries croisées décrite par **Maciejewska et al. (2017)**. Chaque isolat a été ensemencé en ligne droite au centre de la boîte de Petri et incubé à  $28 \pm 2$  °C pendant 15 jours, puis croisé perpendiculairement avec quatre souches bactériennes de référence, représentatives des bactéries à Gram positif et à Gram négatif, comprennent : *Staphylococcus aureus* (ATCC 29213), *Escherichia coli* (ATCC 25922), *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 29553) et *Salmonella typhimurium* (ATCC 14028). Ces souches ont été obtenues auprès de **l'Institut Pasteur d'Algérie**. L'ensemble des informations complémentaires relatives à leurs caractéristiques phénotypiques et génotypiques est détaillé dans **Amani et al. (2024)** et (**Annexe 6**). Les souches tests ont été préalablement réactivées dans 9 mL de bouillon nutritif et incubées à 37 °C pendant 18 à 24 h, jusqu'à obtention d'une culture jeune standardisée à une densité de 0,5 McFarland (**Figure 16**).

Après 24 h d'incubation à 37 °C, l'activité antibactérienne a été déterminée par mesure des zones d'inhibition formées entre les isolats et les bactéries cibles. Toutes les expériences ont été réalisées en triplicat. Une boîte de TSA et une d'ISP2 ensemencées uniquement avec les souches tests ont servi de témoins négatifs (absence d'inhibition) (**Valan Arasu et al. 2009**), tandis que la gentamicine (10 µg/disque) a été utilisée comme contrôle positif. La production de molécules antimicrobiennes se traduisait par une inhibition partielle ou totale de la croissance des souches testées.

Cette technique présente l'avantage de permettre l'évaluation de plusieurs microorganismes tests sur une même souche d'actinomycète et sur une seule boîte, augmentant ainsi la robustesse et la comparabilité des résultats.

La Concentration Minimale Inhibitrice (CMI) a été déterminée par microdilution en bouillon (0,5–1000 µg/mL) dans des plaques de 96 puits. Après 18 h d'incubation à 37 °C, la croissance a été évaluée à 625 nm. La CMI a été définie comme la plus faible concentration provoquant une inhibition complète de la croissance. Chaque essai a été réalisé en triplicat et répété deux fois (**Girão et al. 2019**).



**Figure.16** Préparation des suspensions

## 10. Tests de sensibilité aux antibiotiques des souches endophytes

La sensibilité aux antibiotiques des isolats endophytes a été estimée en utilisant 24 antibiotiques : l'oxaciline ; pénicilline G ; l'ampicilline ; amoxicilline (pénicilline) ; l'imipénème (carbapénème); céfixime; la ceftazidime; céfalexine; céfotaxime; céfazoline (céphalosporine),vancomycine (glycopeptide), polymyxine (polymyxine), gentamicine, amikacine ; la tobramycine ; streptomycine ; kanamycine (aminoglycoside), érythromycine ; clindamycine (macrolide), tétracycline (tétracycline), chloramphénicol (amphionicol), rifampicine (macrolactam) ; le cotrimoxazole (sulfonamide) et l'acide nalidixique (quinolone) (Passari et al. 2015).

L'analyse a été réalisée en considérant l'isolat résistant (**R**), si la zone d'inhibition est comprise entre 0,0 et 9,9 mm, intermédiaire (**I**) avec une zone d'inhibition de 10 à 19,9 mm et sensible (**S**) avec une zone d'inhibition > 20 mm (Williams et al. 1989). Les antibiotiques utilisés sont présentés dans le (Tableau.8).

**Tableau .8** Liste des antibiotiques utilisés pour le profil des actinomycètes.

Famille	Classe	Génération	Antibiotiques	Abrévi- ation	Concentr- ation	
<b>Béta-lactamines</b>	Pénicillines	Pénicilline du groupe A	Ampicilline	AMP	10µg	
			Amoxicilline	AX	25µg	
			Oxaciline	OX	05µg	
	Carbapénèmes	Benzylpénicilline	Pénicilline G	P	10µg	
			Imipénème	IPM	10µg	
	Céphalosporines	Céphalosporines de 1ère génération (C1G)	Céfazoline	KZ	30µg	
			Céfalexine	CN	30µg	
		Céphalosporines de 3ème génération (C3G)	C3G orales	Céfixime	CFM	5µg
			C3G injectables	Céftazidime	CAZ	30µg
	<b>Aminoglycoside</b>		Céftaxime	CTX	30µg	
Gentamicine			GEN	10µg		
Streptomycine			S	10 µg		
Tobramycine			TOB	10µg		
Kanamycine			K	30 µg		
Amikacine			AK	30µg		
<b>Macrolides</b>			<b>Macrolides vrais</b>	Érythromycine	E	15µg
	<b>Lincosamides</b>	Clindamycine	CD	2µg		
<b>Tetracyclines</b>	Cyclines naturelles	Tétracycline	TE	30µg		
<b>Quinolones</b>	<b>Fluoroquinolones</b>	Acide nalidixique	NA	30µg		
<b>Phénicolés</b>		Chloramphénicol	C	30µg		
<b>Macrolactam</b>		Rifampicine	RD	30µg		
<b>Glycopeptides</b>		Vancomycine	VA	30µg		
<b>Polymixine</b>		Polymyxine	Pol	300 UI		
<b>Sulfonamide</b>		Cotrimoxazole	COT	25µg		

## 11. Solubilisation du phosphate

La capacité des isolats endophytes à solubiliser le phosphate inorganique a été évaluée sur le milieu gélosé de Pikovskaya, selon la méthode décrite par **Bashan et al. (2013)**. Les isolats ont été incubés à  $28 \pm 2$  °C pendant deux semaines. L'apparition d'un halo clair autour des colonies a été considérée comme un résultat positif. Tous les essais ont été réalisés en triplicat, avec inclusion de témoins positifs et négatifs appropriés pour garantir la fiabilité. Pour chaque souche positive, l'indice de solubilisation (IS) a été calculé à partir de mesures en triplicat et exprimé sous forme de moyenne  $\pm$  écart-type.

## 12. Criblage des souches endophytes pour la production d'enzymes extracellulaires

Les souches endophytes ont été inoculées sur des milieux gélosés solides avec des substrats tels que la caséine (M1), l'amidon soluble (M2), le xylane (M3), la cellulose (M4), la pectine (M5), le tween 20 (M6), tween 20 (M7) et la gélatine (M8) pour la production d'enzymes dont la protéase, l'amylase, xylanase, la cellulase, la pectinase, la lipase, l'estérase et la gélatinase respectivement. Les cultures sont incubées à  $28\pm 2$  °C pendant 5 à 8 jours. Des solutions indicatrices appropriées ont été utilisées pour la mise en évidence de la production d'enzymes.

### 12.1. Activité Protéasique

La production de protéase a été testée en inoculant chaque isolat sur un milieu solide à base de lait écrémé (M1) (**Tableau. 9**) et en incubant à  $28\pm 2$ °C pendant 6 jours. Des zones claires autour des colonies ont indiqué une activité protéolytique positive (**Mamangkey et al. 2021**).

### 12.2. Activité amylolytique

La recherche d'amylase est effectuée par la mise en culture des isolats sur un milieu à base d'amidon (M2) (**Tableau.9**). Après incubation à  $28\pm 2$ °C pendant 5 à 6 jours, les boîtes de Pétri sont inondées par une solution de Lugol et après quelques minutes de contact l'excès est éliminé.

Une réaction positive est marquée par l'apparition d'un halo clair autour des colonies, indiquant une hydrolyse positive de l'amylase (**Mamangkey et al. 2021**).

### 12.3. Recherche de xylanases

L'activité xylanase a été évaluée en utilisant la méthode décrite par **Dogan et al. (2021)** Chaque isolat a été inoculé dans milieu à base de xylane (M3) (**Tableau.9**). Les cultures ont été incubées à  $28\pm 2$ °C pendant 6 à 8 jours. Après incubation, une solution d'iode de Lugol a été appliquée sur la surface de l'agar. La formation d'une zone claire autour des colonies, par opposition à la zone sombre environnante, a indiqué une activité xylanase

### 12.4. Activité cellulolytique

La production de la cellulase est déterminée dans un milieu contenant du Carboxy Méthylcellulose (CMC, Acros Organics, New Jersey, États-Unis) (M4) ; comme source de carbone (**tableau.9**). Après une incubation de 5 à 6 jours à  $28\pm 2$ °C suivi d'une inondation des boîtes de Pétri avec 0,3% (p/v) du rouge Congo (Sigma-Aldrich, Allemagne) (**Annexe. 3**), puis laissée à 25°C pendant 20 minutes et avec 1 M de NaCl (**Annexe. 4**) pour éliminer le colorant non fixé. L'apparition d'un halo clair autour des colonies indique la présence de cellulases (**Mamangkey et al. 2021**).

### 12.5. Activités pectinolytiques

Afin d'évaluer l'activité pectinolytique chez les espèces isolées, nous avons utilisé un milieu de culture (M5), à base de pectine de citrons estérifiée à 67 % (*Sigma* N° 9135) comme seule source de carbone à une concentration de 1g/l (**tableau.9**). Les plaques inoculées par

piqûre ont été incubées à  $28\pm 2^{\circ}\text{C}$  pendant 8 jours.

Les boîtes de Pétri sont inondées par une solution de Lugol et après quelques minutes de contact l'excès est éliminé. La dégradation de la pectine est visualisée par l'apparition d'halos translucides autour des colonies alors que le fond reste opaque (Soares et al. 1999).

### **12.6. Activité lipolytique**

L'activité lipolytique a été testée en utilisant Tween 20 (M6) (Tableau.9). Après incubation à  $28\pm 2^{\circ}\text{C}$  pendant 5 à 6 jours, un précipité blanc autour des colonies indique la production de lipase (Ghodsalavi et al. 2013).

### **12.7. Activité estérolytique**

L'activité esterolytique a été déterminée en utilisant un milieu à base de Tween 20 (M7) (Tableau.9). Les isolats ont été déposés sur le milieu et incubés à  $28\pm 2^{\circ}\text{C}$  pendant 8 jours. La présence d'un précipité blanc autour des colonies a indiqué une activité estérase (Tesch et al. 1996).

### **12.8. Recherche de gélatinases**

L'activité gélatinase a été déterminée en utilisant la méthode de Larpent et al.(1997), avec la gélatine comme substrat (M8) (Tableau.9). Les isolats ont été cultivés sur un milieu à base de gélatine. Après incubation à  $28\pm 2^{\circ}\text{C}$  pendant 5 à 6 jours, la liquéfaction de la gélatine signifie l'hydrolyse.

### **12.9. Recherche de la catalase**

La présence de catalase a été déterminée en mettant en contact une colonie avec quelques gouttes de  $\text{H}_2\text{O}_2$  à 10 volumes. La formation de bulles d'oxygène a indiqué une réaction positive (Smibert et al. 1994).

**Tableau. 9** Composition des milieux de culture pour l'activité enzymatique des souches d'actinomycètes isolés

Milieux Compositions	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Extrait de levure	1g	1g	0.5g	/	/	/	04g	/
Extrait de viande	/	/	/	/	/	/	/	04g
Extrait de malt	/	/	/	/	/	/	10g	/
Peptone	4g	/	/	/	/	10g	/	10g
Lait écrémé	12g	/	/	/	/	/	/	/
Tween20	/	/	/	/	/	10mL	10mL	/
Amidon soluble	/	10g	/	/	/	/	/	/
CMC	/	/	/	10g	/	/	/	/
Pectine	/	/	/	/	1g	/	/	/
Gélatine	/	/	/	/	/	/	/	120g
Xylane	/	/	05g	/	/	/	/	/
Glucose	/	/	01g	/	/	/	04g	/
Fe SO <sub>4</sub> . 7H <sub>2</sub> O	/	/	0.05g	/	/	/	/	/
NaNO <sub>3</sub>	/	/	01g	/	/	/	/	/
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	/	/	04g	01g	/	/	/	/
KCl	/	/	01g	/	/	/	/	/
Mg SO <sub>4</sub> . 7H <sub>2</sub> O	/	/	0.5g	0.2g	0.2g	/	/	/
FeCl <sub>3</sub> 6H <sub>2</sub> O	/	/	/	0.05g	/	/	/	/
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	/	/	01g	01g	02g	/	/	/
NaCl	18g	18g	/	18g	/	05g	/	2.5g
CaCl <sub>2</sub> . 7H <sub>2</sub> O	/	/	/	0.02g	/	0.1g	/	/
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	/	/	/	01g	/	/	/	/
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	/	/	/	/	1.4g	/	/	/
Solution saline	/	/	/	/	1ml	/	/	/
L'eau distillée	1L	1L	1L	1L	1L	1L	1L	1L
Agar	15g	15g	15g	15g	20g	15g	18g	/
pH	7.2	7.2	6.8	6.8	6.8	7.2	7.2	6.8

**M1** : Gélose à caséine, **M2** : Gélose à amidon, **M3** : Gélose à xylane, **M4** : Carboxyméthylcellulose (CMC), **M5** : Gélose à Pectine, **M6** : Milieu pour la mise en évidence de l'hydrolyse de tween 20 (lipase), **M7** : Milieu pour la mise en évidence de l'hydrolyse de tween 20 (estérase), **M8** : Gélose à gélatine. **Solution saline** (Annexe.5)

### 13. Analyse statistique

Toutes les analyses expérimentales, y compris les tests antibactériens, le criblage enzymatique, la solubilisation du phosphate et l'évaluation de la tolérance au sel, ont été réalisées en triplicat afin d'assurer la fiabilité et la reproductibilité des résultats. Les résultats sont présentés sous forme de valeurs moyennes ± écart-type (ET). Afin d'identifier les différences statistiquement significatives entre les isolats, en particulier concernant les diamètres des zones d'inhibition et les tailles des halos dans les différents essais, les données ont été soumises à une analyse de variance à un facteur (ANOVA). Le test post hoc de Tukey a été utilisé pour les comparaisons par paires entre les moyennes des groupes. Une valeur de  $p < 0,05$  a été considérée comme statistiquement significative. Toutes les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel GraphPad Prism.

## **RESULTATS et DISCUSSION**

## 1. Présentation des résultats

### 1.1. Isolement, purification et sélection des actinobactéries endophytes d'*Artemisia* (Identification des actinobactéries endophytes des plantes médicinales du genre *Artemisia*)

Les actinobactéries endophytes ont été isolées à partir des racines et des feuilles de trois espèces d'*Artemisia* ; *Artemisia judaica* L. ssp. *sahariensis*, *Artemisia herba alba* Asso et *Artemisia campestris* ; collectées de différentes régions d'Algérie ; Sebkhâ-Ezzemoul (Oum el Bouaghi), Djebel Bou Arif (Batna), Djebel Arris (Batna), Oued Djerat (Djanet), Djebel Ilamane (Tamanrasset), Djebel Aïssa (Ain Sefra Naâma), Al Mansourah (Ghardaïa) et El Hamel (Bou Saada M'sila) ; couvrant des zones sahariennes, montagneuses et Sebkhâ.

Cent quarante sept (147) isolats sont purifiés et conservés et, parmi lesquels 82 isolats sont sélectionnés sur la base de caractéristiques phénotypiques des actinobactéries ; à savoir une croissance lente, des colonies compactes (1–10 mm) incrustées dans la gélose, un aspect rugueux, cotonneux ou coriace, une pénétration du mycélium de substrat dans le milieu, une formation d'hyphes/spores aériens, ainsi que la production de pigments diffusibles et coloration du milieu environnant.

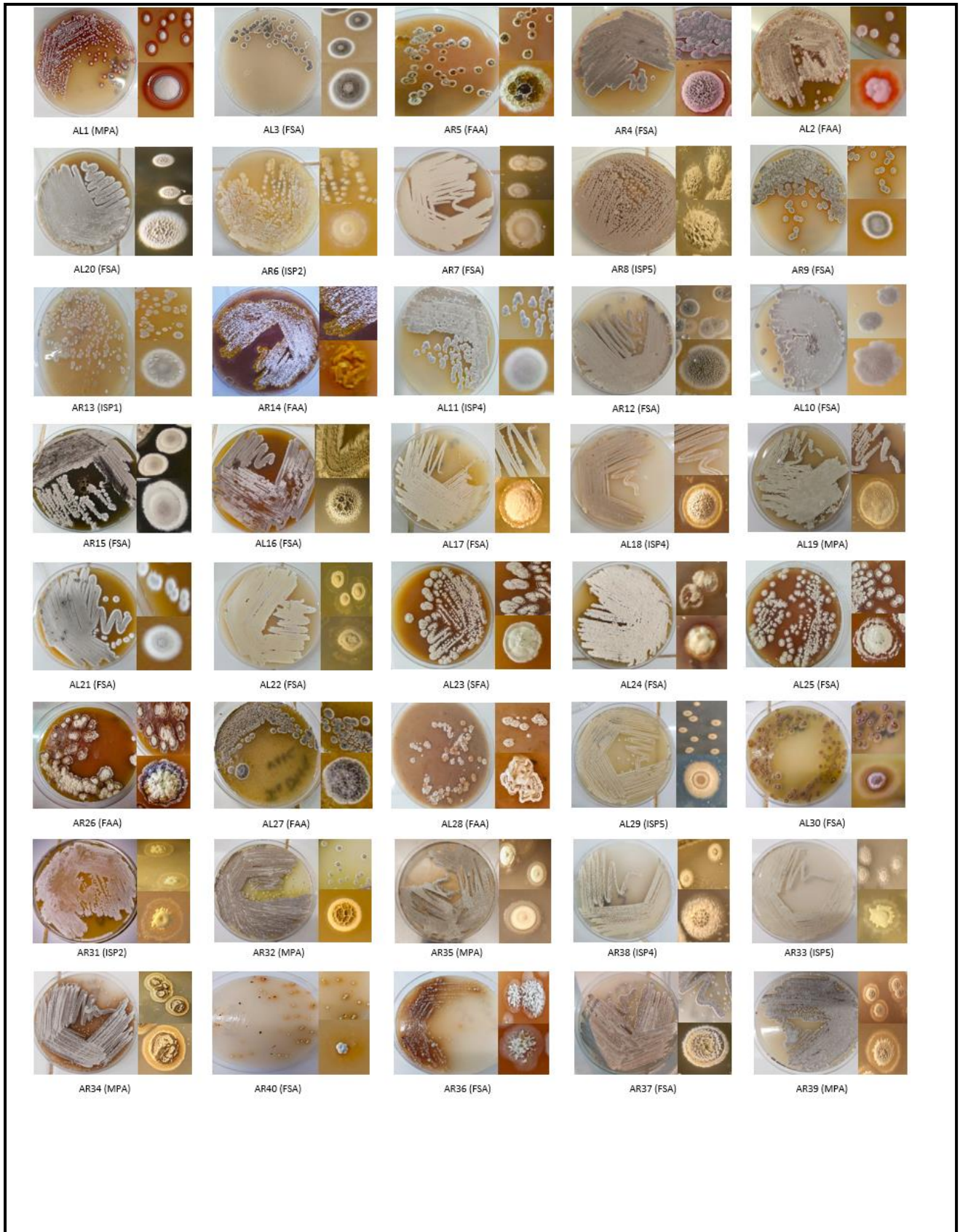
L'évaluation des milieux de culture a montré que le milieu **FSA** s'est révélé le plus performant, fournissant **52,44 %** des isolats, suivi de MPA (25,61 %), FAA (13,41 %) et TSB (8,54 %). Les milieux FSA, FAA, MPA et TSB se sont également révélés efficaces, permettant la sélection de 82 souches après 4 semaines d'incubation à  $28 \pm 2$  °C. À **Tamanrasset**, le milieu **FSA** a fourni le meilleur rendement (19 isolats sur 43) (**Tableau. 10**).

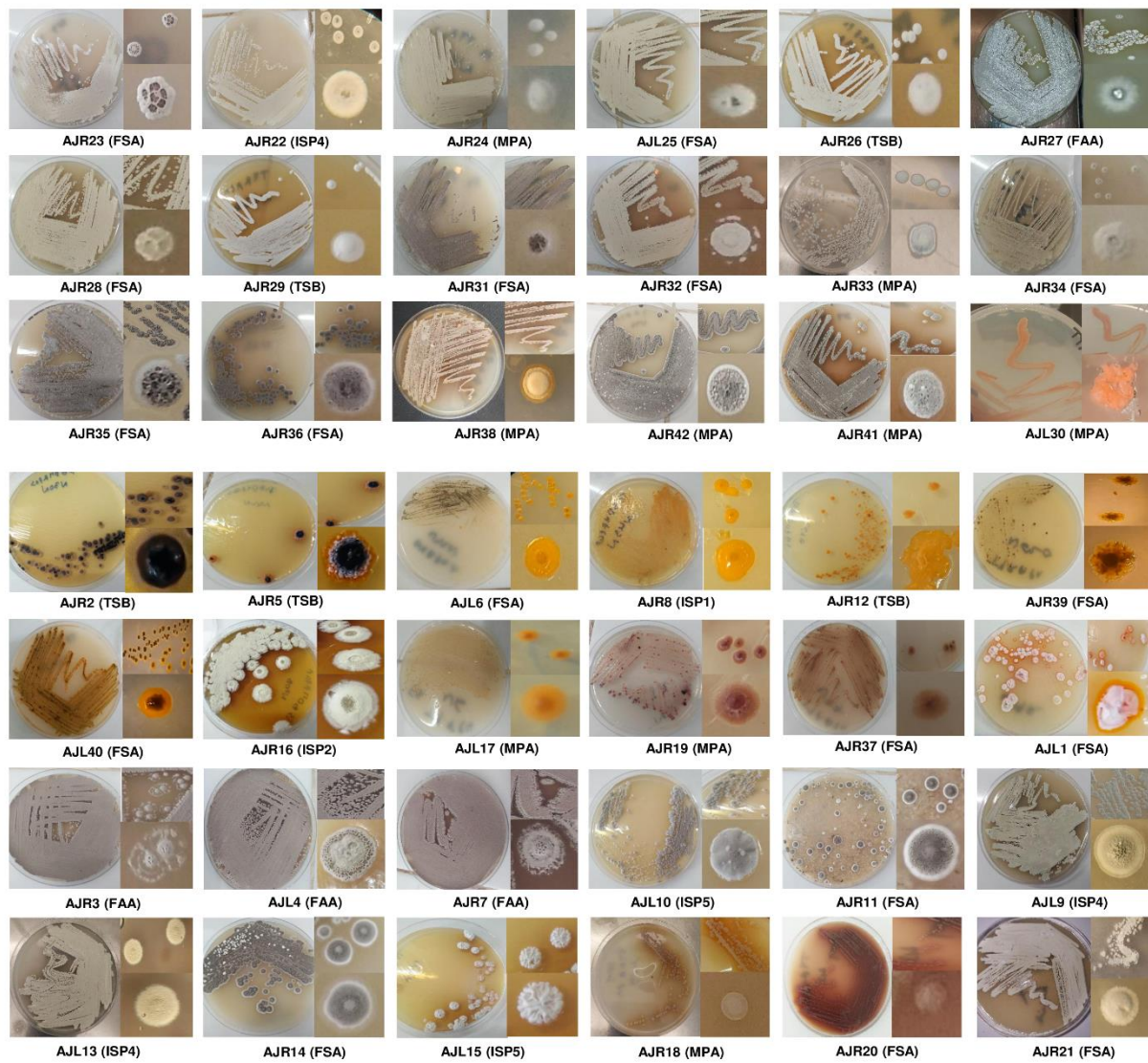
La majorité des isolats présentait un **mycélium aérien floconneux** de consistance poudreuse, poilue ou granuleuse, généralement **gris** ou **blanc**, souvent entouré d'un anneau blanchâtre. Environ **65 %** développaient un mycélium de substrat pigmenté et **70 %** produisaient des pigments diffusibles. La couleur du mycélium (aérien et de substrat) et que la production de pigments solubles varient selon la composition des milieux (ISP1, ISP2, ISP4, ISP5, FSA, FAA, MPA et TSB) (**Figure.17**) et (**Figure.18**) a été déterminée à l'aide du système de référence chromatique **ISCC–NBS** (échantillons standards, n° 2106) (**Tableau. 11**). L'ensemble des isolats de la collection appartiennent aux **groupes Gris et Blancs**.

L'observation microscopique, après coloration de Gram, a confirmé que tous les isolats sont **Gram+** et présentent un aspect filamenteux. Des différences morphologiques ont été relevées ; certaines souches (AR12, AL2, AR4, AL17, AL19, AR38) possédaient des filaments très fins et non ramifiés, tandis que d'autres (AR40, AR36, AL10, AR34, AL1, AL3, AR5, AL30, AR14) montraient de longs filaments ramifiés et enchevêtrés. La disposition des chaînes de spores variait également ; certaines sont **droites** (AR12, AL19), d'autres en **hélice** (AR38) ou regroupées en **amas** (AL2, AL17) (**Figure 19**).

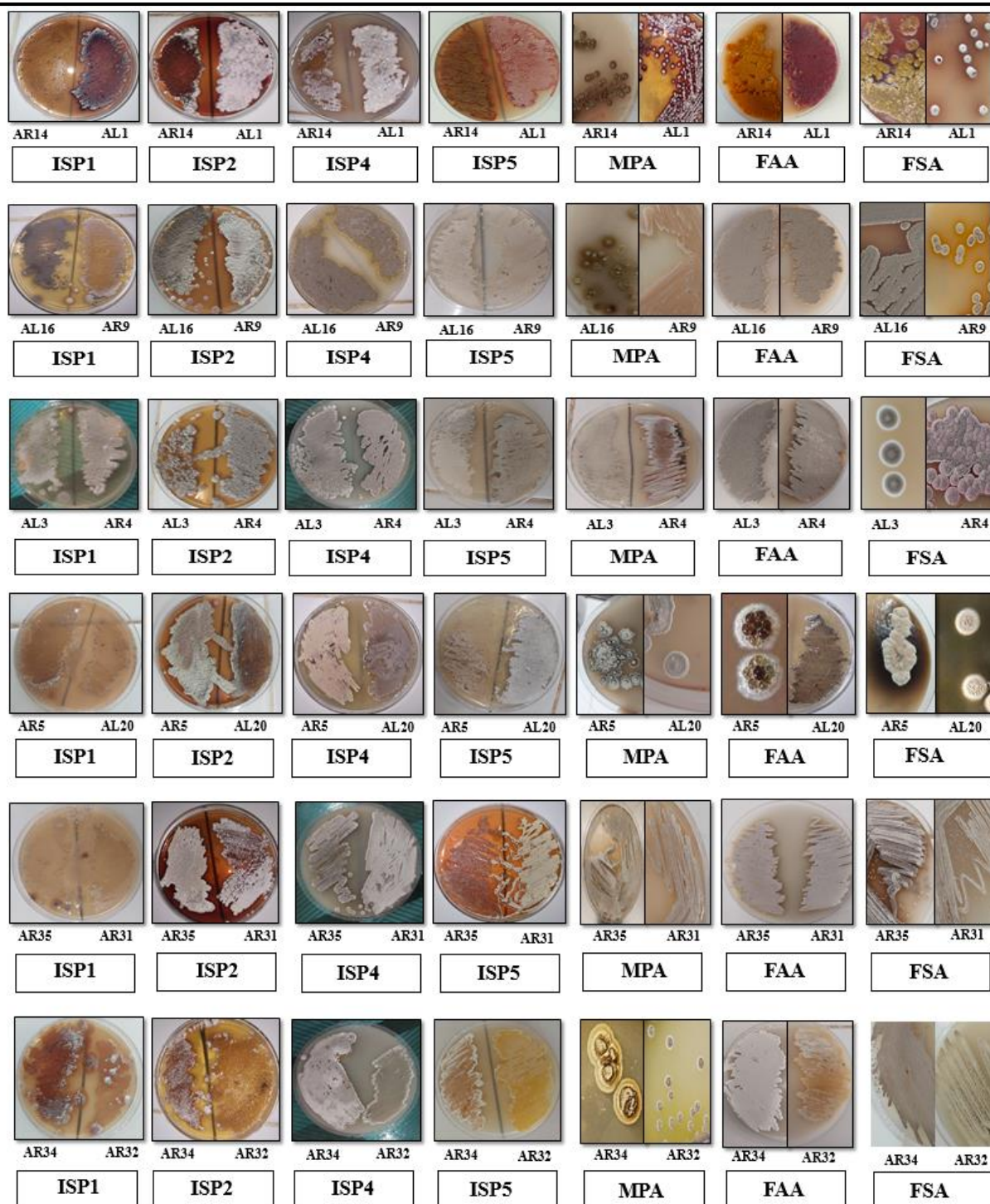
**Tableau.10** Répartition et origine des isolats endophytes par site et par milieu de culture.

<b>Sites Milieux</b>	<b>FSA</b>	<b>FAA</b>	<b>MPA</b>	<b>TSB</b>	<b>Total</b>
<b>Djebel BouArif (Montagnes) Batna</b>	2	1	1	0	4
<b>Djebel Arris (Montagnes) Batna</b>	3	1	1	0	5
<b>Garaet Ezzemoul (Sebkha) Oum el Bouaghi</b>	3	1	1	0	5
<b>El Hamel, Bou Saada M'sila</b>	2	0	0	0	2
<b>Djebel Aissa (Montagnes) Ain Sefra</b>	3	0	0	0	3
<b>Naâma Al</b>	3	2	1	0	6
<b>Mansourah Ghardaïa</b>					
<b>Oued Djerat Djanet</b>	8	4	4	5	21
<b>Djebel Ilamane (Montagnes) Tamanrasset</b>	19	2	13	2	36




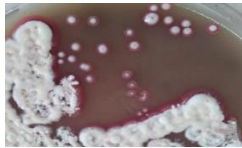

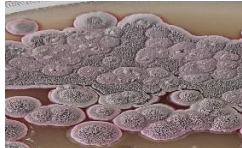
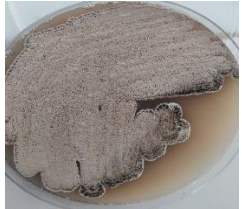





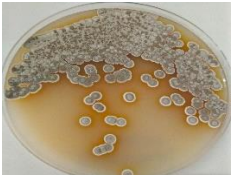
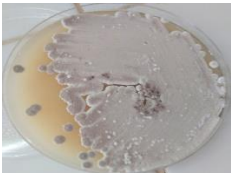





**Figure 17.** Morphologie et couleur du mycélium aérien et de substrat des isolats endophytes d'*Artemisia* spp. récolté de la Sebka-Ezzemoul, du Djebel Bou Arif, du Djebel Arris, d'Oued Djerat, de Djebel Ilamane, de Djebel Aissa, d'Al Mansourah et El Hamel en Algérie.












**Figure.18** Aspect du mycélium (aérien et substrat) des isolats endophytes sur les différents milieux de cultures (ISP1, ISP2, ISP4, ISP5, MPA, FAA, FSA).


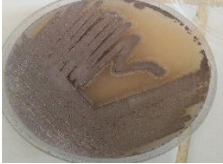
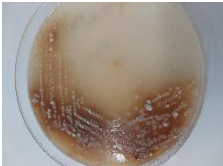




**Tableau.11** Caractérisation morphologique des isolats étudiés après mise en culture sur le milieu FSA.

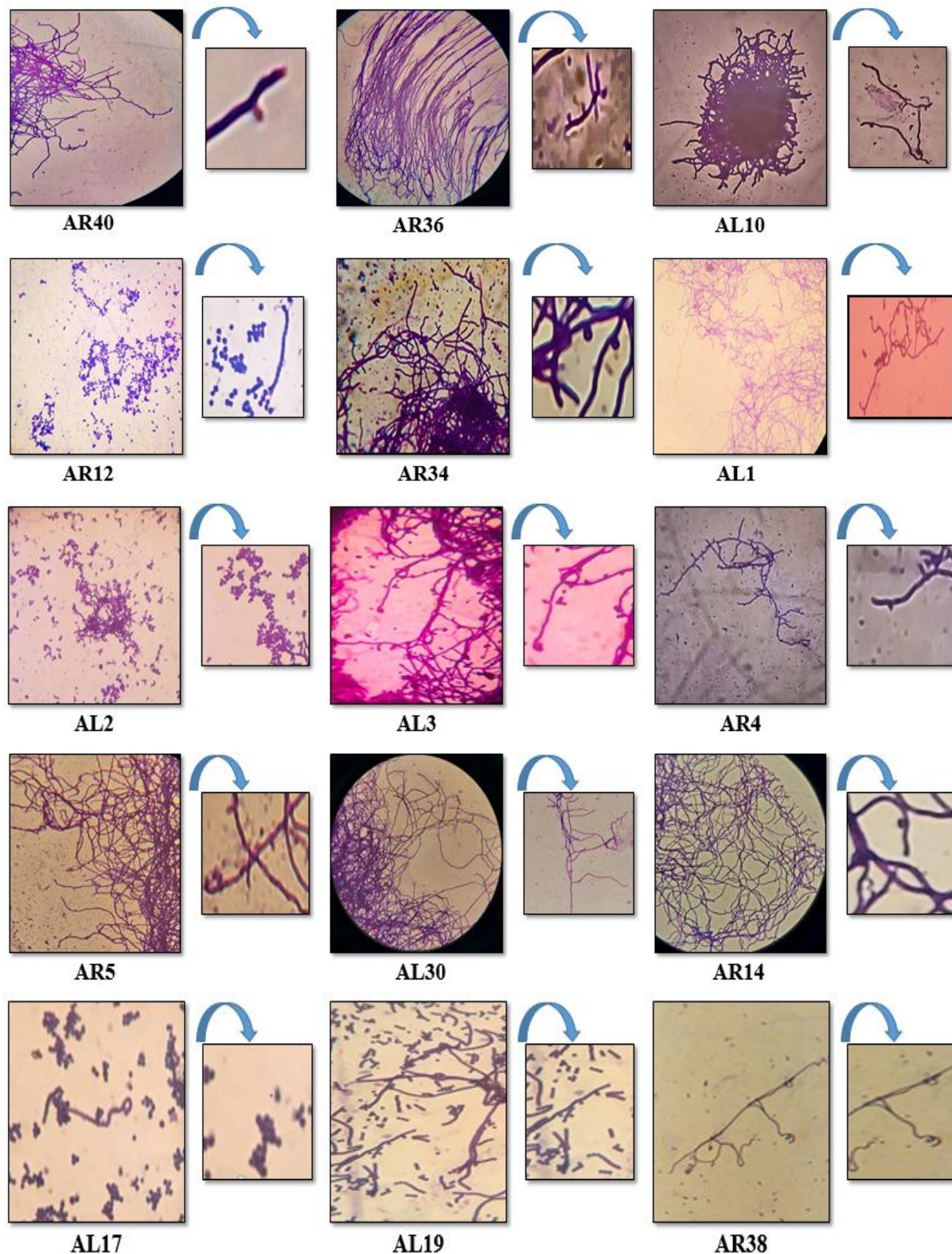
Souches	Couleur de mycélium de substrat	Couleur de mycélium aérien	Inclusion	Pigment diffusible	Couleur de pigment diffusible	Aspect macroscopique
AL1	Rouge noir	Blanc	Présence	Présence	Rouge noir foncé	
AL2	Rouge profond	Blanc aluminium	Absence	Absence	Absence	
AL3	Gris moyen	Gris moyen	Absence	Absence	Absence	
AR4	Rouge très profond	Gris rougeâtre	Absence	Absence	Absence	
AR5	Brun grisâtre foncé	Brun grisâtre clair	Présence	Présence	Noir brunâtre	
AR6	Jaune orange vif	Jaune orangé brillant	Absence	Absence	Absence	

<b>AR7</b>	Jaune pale	Blanc jaunâtre	Présence	Présence	Brun jaunâtre foncé	
<b>AR8</b>	Vert jaune pale	Gris olive clair	Présence	Présence	Brun olive foncé	
<b>AR9</b>	Gris clair	Gris moyen	Présence	Présence	Jaune orangé	
<b>AL10</b>	Blanc violacé	Gris violacé clair	Présence	Absence	Absence	
<b>AL11</b>	Blanc bleuté	Gris bleuté	Présence	Présence	Vert olive grisâtre	
<b>AR12</b>	Gris rouge clair	Gris rougeâtre	Présence	Absence	Absence	
<b>AR13</b>	Blanc verdâtre	Gris verdâtre clair	Présence	Présence	Jaune grisâtre brun	
<b>AR14</b>	brun olive clair	Blanc jaunâtre	Présence	Présence	brun jaunâtre foncé	
<b>AR15</b>	Blanc verdâtre	Gris verdâtre clair	Présence	Présence	Noir verdâtre	

<b>AL16</b>	Blanc verdâtre	Gris verdâtre clair	Présence	Présence	Brun jaunâtre foncé	
<b>AL17</b>	Gris jaunâtre	Blanc jaunâtre	Présence	Présence	Jaune modéré	
<b>AL18</b>	Blanc jaunâtre	rose jaunâtre grisâtre	Présence	Présence	Brun jaune clair	
<b>AL19</b>	Jaune grisâtre	Jaune grisâtre foncé	Absence	Présence	Jaune fort	
<b>AL20</b>	Blanc verdâtre	Gris verdâtre clair	Présence	Présence	Brun jaunâtre intense	
<b>AL21</b>	Blanc bleuté	Gris bleuté	Présence	Présence	Brun jaunâtre intense	
<b>AL22</b>	Blanc rosé	Gris clair brun jaunâtre	Absence	Présence	Brun modéré	
<b>AL23</b>	Blanc verdâtre	Blanc	Présence	Présence	Orange foncé	
<b>AL24</b>	Jaune grisâtre	Blanc jaunâtre	Présence	Présence	Brun olive foncé	

<b>AL25</b>	Gris jaunâtre	Blanc jaunâtre	Présence	Présence	Brun jaunâtre foncé	
<b>AR26</b>	Blanc jaunâtre	Blanc	Absence	Présence	Brun jaunâtre modéré	
<b>AL27</b>	Blanc verdâtre	Gris verdâtre	Présence	Absence	Absence	
<b>AL28</b>	Rouge grisâtre clair	Gris rougeâtre	Présence	Présence	Brun foncé	
<b>AL29</b>	Gris brunâtre clair	Gris brunâtre	Présence	Présence	Brun grisâtre foncé	
<b>AL30</b>	Brun jaunâtre grisâtre clair	Brun jaunâtre grisâtre foncé	Absence	Présence	Jaune verdâtre fort	
<b>AR31</b>	Gris jaunâtre	Gris brunâtre clair	Présence	Présence	Brun foncé	
<b>AR32</b>	Jaune verdâtre vif	Gris jaunâtre	Présence	Présence	Brun olive modéré	
<b>AR33</b>	Blanc jaunâtre	Blanc	Présence	Présence	Brun olive clair	

<b>AR34</b>	Rose jaunâtre grisâtre	Brun rougeâtre grisâtre clair	Présence	Présence	Orange fort	
<b>AR35</b>	Blanc rosé	Gris rougeâtre foncé	Présence	Présence	Brun modéré	
<b>AR36</b>	Brun grisâtre clair	Gris brunâtre clair	Absence	Présence	Marron foncé	
<b>AR37</b>	Rose jaunâtre grisâtre	Gris rougeâtre	Présence	Présence	Brun olive clair	
<b>AR38</b>	Gris jaunâtre	Blanc jaunâtre	Présence	Présence	Brun rougeâtre grisâtre clair	
<b>AR39</b>	Jaune grisâtre	Gris verdâtre	Présence	Présence	Jaune grisâtre foncé	
<b>AR40</b>	Brun grisâtre jaunâtre clair	Gris jaunâtre	Absence	Présence	Orange vif	



**Figure 19.** Aspect microscopique des mycéliums de quelques isolats d'actinobactéries endophytes, structure des filaments et disposition des spores (objectif  $\times 100$ ).

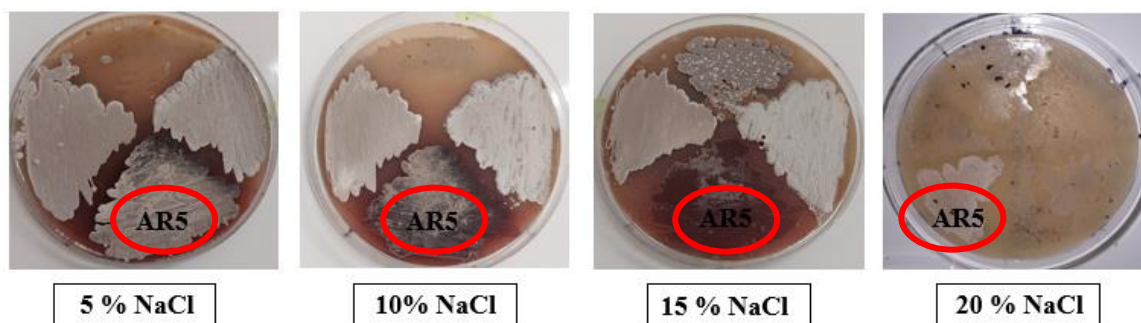
## 2. Caractéristiques physiologiques et biochimiques

Tous les isolats endophytes testés se sont révélés **halotolérants**, capables de croître à une concentration de **5 % de NaCl**. Dix-huit isolats; **AL1, AL3, AL22, AR6, AR31, AR34, AR35, AR36, AR37, AR38, AJL1, AJR3, AJL4, AJR7, AJL10, AJR31, AJR35, et AJR42**; ont résisté à une concentration de **10% de NaCl**. Neuf (09) isolats ; **AR4, AL30, AJR36, AJR38, AJR27, AJR41, AJR11, AJL15 et AJR16** ont résisté à **15%** de NaCl. La souche **AR5**, isolée des racines d'*Artemisia herba-alba* Asso dans la région de **Garaet Ezzemoul (Sebkha), Oum el Bouaghi**, a présenté une **halotolérance** très élevée allant jusqu'à **20 % de NaCl** (**Figure 20**).

Il est à souligner que la majorité des isolats tolérants à **10 et 15 %** de NaCl provenaient des racines d'*Artemisia judaica* L. ssp. *sahariensis* collectée de **Djebel Ilamane (Tamanrasset)**. D'autres souches, issues des **feuilles** d'*Artemisia herba-alba* Asso et d'*Artemisia judaica* L. ssp. *sahariensis* collectées dans divers sites algériens (**Garaet Ezzemoul, Al Mansourah, Ghardaïa et Oued Djerat, Djanet**), ont également présenté une tolérance allant jusqu'à 10 % pour **AJL1, AJL4, AJL10, AL1, AL3 et AL22**, et jusqu'à 15 % pour **AJL15 et AL30**.

Un niveau significativement supérieur à la moyenne de 10 % observée chez les autres isolats ( $p < 0,05$ ), traduisant une résistance importante au NaCl.

Tous les isolats ont poussé dans une gamme de températures allant de **10 °C à 50 °C**, avec une croissance optimale entre **25 et 30 °C**. De plus, plusieurs souches ont produit un **pigment mélanoïde** sur milieu à la tyrosine (ISP7) (**Figure. 21**), notamment **AL1, AL3, AR4, AR5, AR9, AR14, AL22, AL30, AR35, AR38, AJR3, AJR11, AJR36, AJR38, AJR27, AJR41 et AJR42** (voir **Tableau. 12**).



**Figure.20** Croissance de l'isolat **AR5** à différentes concentrations en NaCl

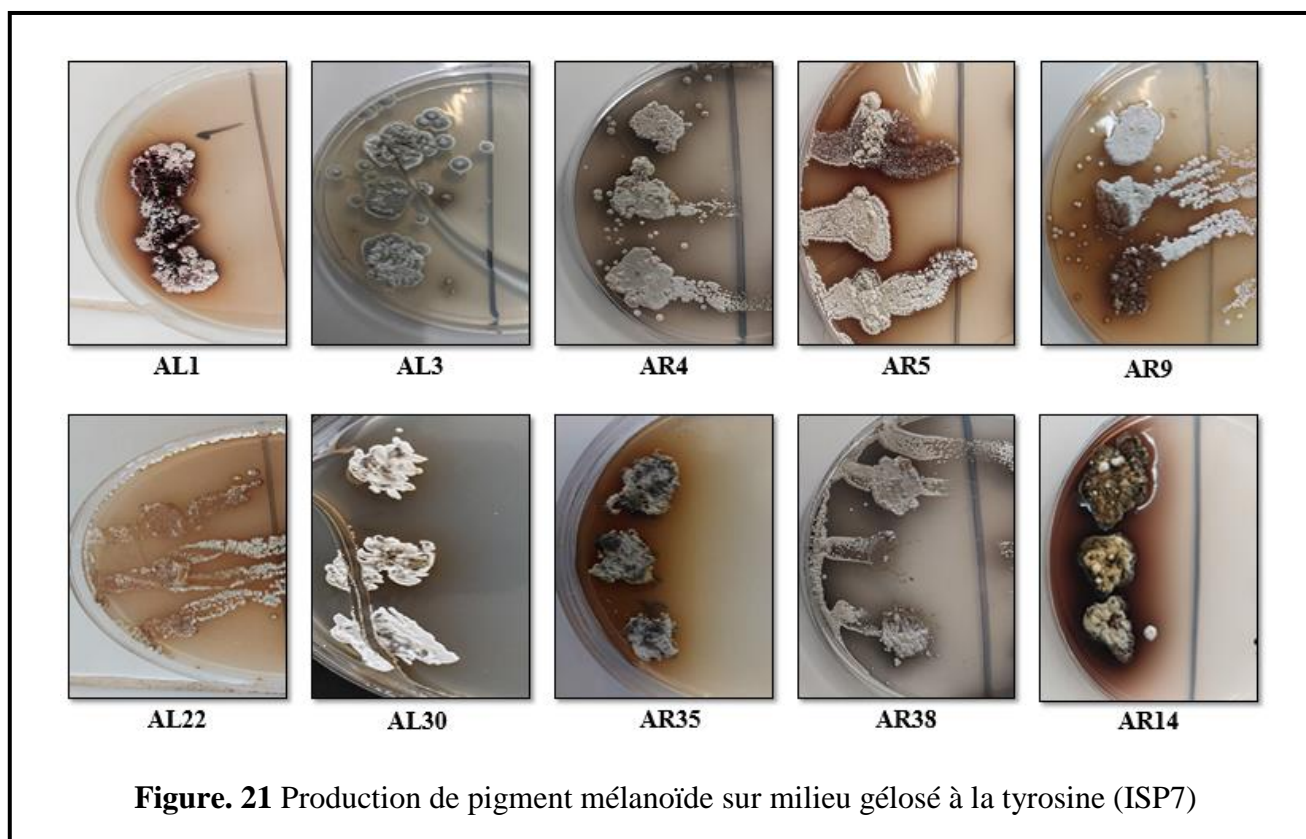
**Tableau. 12** Caractéristiques physiologiques et biochimiques des isolats endophytes associés aux racines et feuilles des espèces d'*Artemisia* collectées dans les régions sud-est, sud-ouest et sud de l'Algérie

Isolats	Pigment Mélanoïde	Température de croissance testée	NaCl tolérance (W/V)	Plante hôte	Organes	Sites d'échantillonnage
AR5	+++	10-50°C	20%± 0.5 d	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Racines	Garaet Ezzemoul (Sebkha), Oum el Bouaghi
AR4	+++	10-50°C	15%± 0.2 a	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Racines	Garaet Ezzemoul (Sebkha), Oum el Bouaghi
AL30	++	10-45°C	15%± 0.4 a	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Feuilles	Oued Djerat, Djanet
AJR36	+++	10-50°C	15%± 0.2 a	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset
AJR38	+++	10-50°C	15%± 0.1 a	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset
AJR27	+++	10-50°C	15%± 0.3 a	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset
AJR41	+++	10-50°C	15%± 0.1 a	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset
AJR11	++	10-50°C	15%± 0.2 a	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Oued Djerat, Djanet
AJL15	-	10-50°C	15%± 0.4 a	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Feuilles	Oued Djerat, Djanet
AJR16	-	10-50°C	15%± 0.2 a	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Oued Djerat, Djanet
AR31	-	10-50°C	10%± 0.2 b	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset
AR34	-	10-50°C	10%± 0.5 b	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset
AR37	-	10-50°C	10%± 0.2 b	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset
AL1	+++	10-45°C	10%± 0.3 b	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Feuilles	Garaet Ezzemoul (Sebkha), Oum el Bouaghi
AR36	-	10-40°C	10%± 0.2 b	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset
AJR31	-	10-50°C	10%± 0.4 b	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset
AJR35	-	10-50°C	10%± 0.3 b	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset
AJR42	+++	10-50°C	10%± 0.1 b	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset
AJR3	+++	10-50°C	10%± 0.5 b	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Oued Djerat, Djanet
AJL4	-	10-50°C	10%± 0.4 b	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Feuilles	Oued Djerat, Djanet
AJL1	-	10-50°C	10%± 0.2 b	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Feuilles	Oued Djerat, Djanet
AJL10	-	10-50°C	10%± 0.3 b	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Feuilles	Oued Djerat, Djanet
AJR7	-	10-50°C	10%± 0.1 b	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Oued Djerat, Djanet
AL20	-	10-45°C	5%± 0.1 c	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Feuilles	Al Mansourah, Ghardaïa
AR32	-	10-45°C	5%± 0.2 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset
AR33	-	10-45°C	5%± 0.3 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset

AR7	-	10-45°C	5%± 0.1 c	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Racines	Djebel Bou Arif , Batna
AR8	-	10-45°C	5%± 0.5 c	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Racines	Djebel Bou Arif , Batna
AL11	-	10-45°C	5%± 0.1 c	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Feuilles	Djebel Arris , Batna
AR13	-	10-45°C	5%± 0.3 c	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Racines	Djebel Arris , Batna
AR26	-	10-45°C	5%± 0.1 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Oued Djerat, Djanet
AL27	-	10-45°C	5%± 0.1 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Feuilles	Oued Djerat, Djanet
AL29	-	10-45°C	5%± 0.4 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Feuilles	Oued Djerat, Djanet
AR39	-	10-45°C	5%± 0.1 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset
AL28	-	10-40°C	5%± 0.3 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Feuilles	Oued Djerat, Djanet
AL23	-	10-35°C	5%± 0.1 c	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Feuilles	Al Mansourah, Ghardaïa
AL24	-	10-35°C	5%± 0.2 c	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Feuilles	Al Mansourah, Ghardaïa
AL25	-	10-35°C	5%± 0.1 c	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Feuilles	Al Mansourah, Ghardaïa
AL21	-	10-35°C	5%± 0.4 c	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Feuilles	Al Mansourah, Ghardaïa
AL10	-	10-35°C	5%± 0.1 c	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Feuilles	Djebel Arris , Batna
AL2	-	10-35°C	5%± 0.2 c	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Feuilles	Garaet Ezzemoul (Sebkha), Oum el Bouaghi
AR12	-	10-35°C	5%± 0.1 c	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Racines	Djebel Arris , Batna
AR40	-	10-35°C	5%± 0.4 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset
AJR21	-	10-50°C	5%± 0.4 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset
AJR32	-	10-50°C	5%± 0.2 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset
AJR24	-	10-50°C	5%± 0.3 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset
AJL25	-	10-50°C	5%± 0.4 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Feuilles	Djebel Ilamane , Tamanrasset
AJR23	-	10-50°C	5%± 0.3 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset
AJR29	-	10-50°C	5%± 0.2 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset
AJR33	-	10-50°C	5%± 0.4 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset
AJR28	-	10-50°C	5%± 0.5 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset
AJR34	-	10-50°C	5%± 0.1 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset
AJR22	-	10-50°C	5%± 0.1 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset
AJR14	-	10-50°C	5%± 0.4 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Oued Djerat, Djanet
AJL9	-	10-45°C	5%± 0.5 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Feuilles	Oued Djerat, Djanet
AJL13	-	10-45°C	5%± 0.4 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Feuilles	Oued Djerat, Djanet

<b>AJR18</b>	-	10-40°C	5% ± 0.3 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset
<b>AJR20</b>	-	10-40°C	5% ± 0.4 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset
<b>AJR2</b>	-	10-40°C	5% ± 0.3 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Oued Djerat, Djanet
<b>AJR5</b>	-	10-40°C	5% ± 0.4 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Oued Djerat, Djanet
<b>AJL6</b>	-	10-40°C	5% ± 0.4 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Feuilles	Oued Djerat, Djanet
<b>AJR8</b>	-	10-40°C	5% ± 0.1 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Oued Djerat, Djanet
<b>AJR12</b>	-	10-40°C	5% ± 0.1 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Oued Djerat, Djanet
<b>AJR39</b>	-	10-40°C	5% ± 0.2 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset
<b>AJL40</b>	-	10-40°C	5% ± 0.4 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Feuilles	Djebel Ilamane , Tamanrasset
<b>AJR37</b>	-	10-40°C	5% ± 0.5 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset
<b>AJR19</b>	-	10-40°C	5% ± 0.3 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	Djebel Ilamane , Tamanrasset
<b>AJL17</b>	-	10-40°C	5% ± 0.4 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Feuilles	Djebel Ilamane , Tamanrasset
<b>AJL30</b>	-	10-40°C	5% ± 0.1 c	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Feuilles	Djebel Ilamane , Tamanrasset

La production de pigments mélanoides est classée comme suit : très élevée (+++), moyenne (++), ou nulle (-). Les valeurs suivies de la même lettre ne présentent pas de différences significatives selon le test HSD de Tukey ( $p < 0,05$ ). Les comparaisons ont été réalisées entre les différentes souches et par rapport à la condition témoin (0 % NaCl). Les données relatives au témoin ne sont pas présentées dans le tableau.



**Figure. 21** Production de pigment mélanoïde sur milieu gélosé à la tyrosine (ISP7)

### 3. Analyse phylogénétique des souches d'actinomycètes endophytes d'*Artemisia* spp. par séquençage du gène de l'ARNr 16S

#### a. Extraction et caractérisation de l'ADN génomique

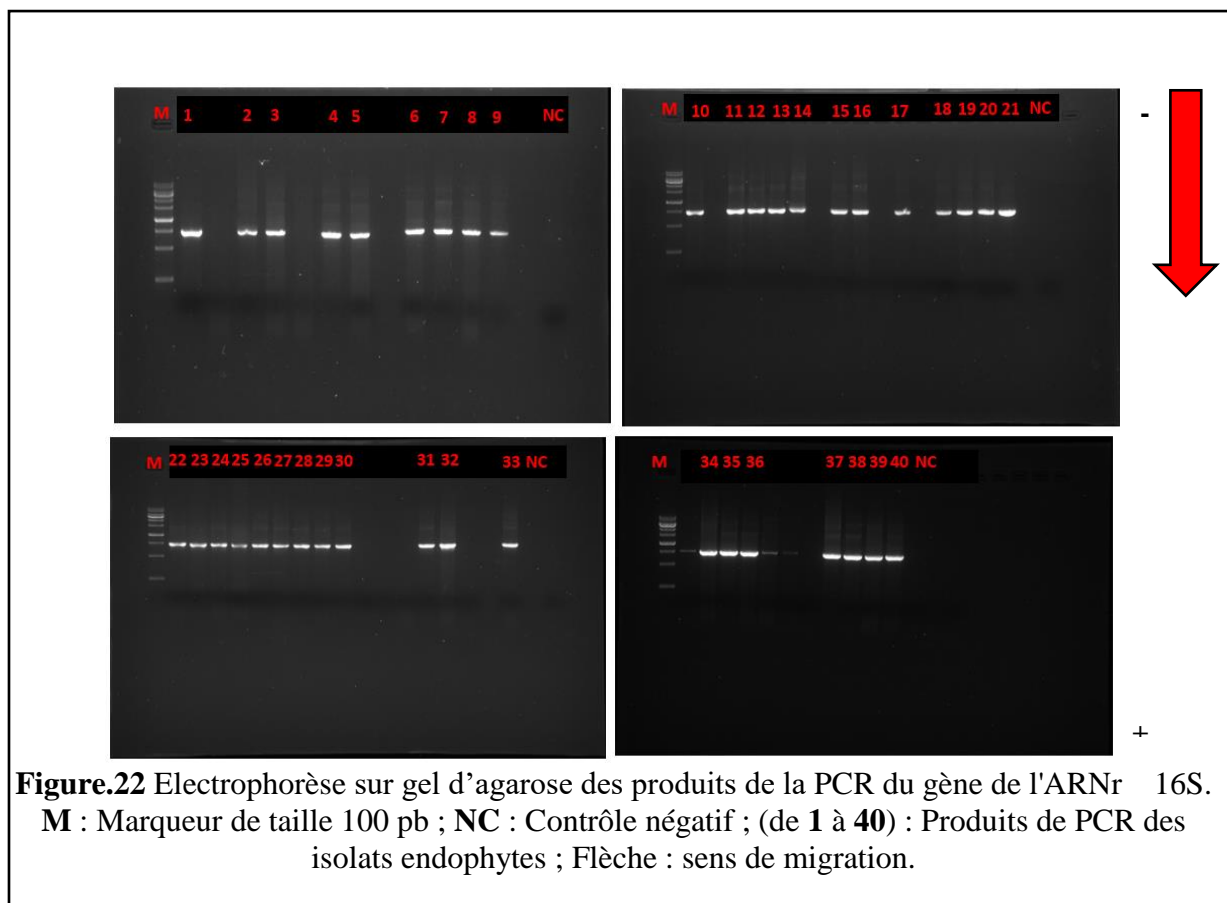
L'ADN génomique de chaque isolat a été extrait en utilisant le kit (E.Z.N.A. Kit ADN bactérien) (**Omega Bio-Tek, GA, États-Unis**). Les concentrations en ADN sont représentées dans le **Tableau.13**.

**Tableau.13** Concentration d'ADN génomique des isolats endophytes

Isolats	Concentration ng/µl	Absorbance à A260 nm	Rapport 260/280	Rapport 260/230
AL1	66.752	1.3350	1.917	2.114
AL2	78.863	1.5773	1.525	1.580
AL3	60.555	1.2111	1.880	2.017
AR4	36.148	0.7230	1.961	2.167
AR5	16.190	0.3238	1.696	1.315
AR6	46.931	0.9386	1.853	1.666
AR7	18.406	0.3681	1.964	2.248
AR8	99.075	1.9815	1.837	1.972
AR9	24.908	0.4982	2.024	2.145
AL10	45.384	0.9077	1.960	1.954
AL11	33.432	0.6686	1.888	1.912
AR12	20.008	0.4002	1.892	2.072
AR13	60.715	1.2143	1.898	2.061
AR14	56.212	1.1242	1.904	1.911
AR15	35.826	0.7165	1.897	1.940
AL16	84.004	1.6801	1.894	2.078
AL17	37.730	0.7546	1.936	2.240
AL18	60.550	1.2110	1.850	1.941
AL19	23.868	0.4774	1.943	2.744
AL20	34.298	0.6860	1.964	1.933
AL21	32.004	0.6401	1.949	2.126
AL22	22.734	0.4547	1.923	1.924
AL23	61.094	1.2219	1.905	1.970
AL24	40.405	0.8081	1.885	2.031
AL25	54.004	1.0801	1.913	1.961
AR26	49.305	0.9861	1.828	2.054
AL27	56.476	1.1295	1.857	2.098
AL28	60.295	1.2059	1.894	2.015
AL29	31.195	0.6239	1.839	2.005
AL30	61.647	1.2329	1.780	1.840
AR31	49.305	0.9861	1.828	2.054
AR32	56.476	1.1295	1.857	2.098
AR33	21.351	0.4270	1.953	2.726
AR34	29.724	0.5945	2.043	2.409
AR35	28.498	0.5700	2.209	0.874
AR36	34.208	0.6842	1.940	1.990
AR37	54.429	1.0886	1.898	2.396
AR38	25.510	0.5102	1.831	1.837
AR39	42.694	0.8539	1.933	2.489
AR40	29.155	0.5831	1.914	2.544

#### 3.1. Caractérisation moléculaire des isolats

L'extraction d'ADN et l'amplification par PCR du gène de l'ARNr 16S a été réalisée pour 40 isolats endophytes. Les résultats de l'électrophorèse sur gel d'agarose montrent la présence de bandes d'ADN d'une taille d'environ 1.5 KB (**Figure.22**).



### 3.2. Séquençage du gène de l'ARNr 16S des isolats endophytes

Les tailles des séquences du gène l'ARNr 16S des 82 souches endophytes sont représentées dans le **Tableau.14**.

**Tableau.14** Taille des séquences de 16S rRNA des isolats endophytes

Isolats	Taille des séquences de 16S rRNA (pb)	Isolats	Taille des séquences de 16S rRNA (pb)
AL1	1364	AJL1	1392
AL2	1392	AJR2	1375
AL3	1397	AJR3	1389
AR4	1392	AJL4	1392
AR5	1393	AJR5	1328
AR6	1393	AJL6	1380
AR7	1394	AJR7	1395
AR8	1392	AJR8	1381
AR9	1395	AJL9	1386
AL10	1279	AJL10	1386
AL11	1394	AJR11	1392
AR12	1388	AJR12	1388
AR13	1393	AJL13	1393
AR14	1381	AJR14	1399
AR15	1376	AJL15	1342
AL16	1393	AJR16	1400
AL17	1359	AJL17	1385
AL18	1392	AJR18	1351
AL19	1363	AJR19	1386
AL20	1391	AJR20	1407

AL21	1391	AJR21	1366
AL22	1392	AJR22	1394
AL23	1391	AJR23	1369
AL24	1339	AJR24	1394
AL25	1392	AJL25	1368
AR26	1392	AJR26	1368
AL27	1395	AJR27	1392
AL28	1341	AJR28	1391
AL29	1398	AJR29	1394
AL30	1402	AJL30	1392
AR31	1387	AJR31	1388
AR32	1390	AJR32	1391
AR33	1391	AJR33	1393
AR34	1366	AJR34	1398
AR35	1391	AJR35	1391
AR36	1396	AJR36	1394
AR37	1392	AJR37	1380
AR38	1392	AJR38	1392
AR39	1368	AJR39	1370
AR40	1408	AJL40	1389
AJR41	1391	AJR42	1389

### 3.3 Analyse phylogénétique

L'arbre phylogénétique basé sur l'analyse comparative des séquences 16S rRNA montre que les isolats sont regroupés en clusters **Tableau.15 et Figure.23, 24 et 25**

L'analyse des séquences du gène 16S rRNA des 82 isolats endophytes a confirmé que ces souches appartiennent à cinq genres. *Streptomyces* était dominant, avec 70 isolats, suivi de sept *Micromonospora*, trois *Nonomuraea*, un *Nocardiopsis* et un *Gordonia* (**Tableau 15 et Figure. 23 ,24 et 25**).

Parmi les isolats de **Tamanrasset**, quatre genres ont été identifiés : *Micromonospora*, *Gordonia*, *Nonomuraea* et *Streptomyces*. L'arbre phylogénétique (**Figure. 24**) a montré que *Streptomyces* était prédominant. L'isolat **AJR42** a formé un groupe distinct de *Streptomyces pilosus* NBRC 12807<sup>T</sup> (AB184161) et présentait une similarité de séquence du gène 16S rRNA inférieure à 98,65 %, ce qui est en dessous du seuil couramment accepté pour la délimitation des espèces chez les procaryotes (**Kim et al. 2014**).

L'analyse des isolats de **Djanet** a identifié trois genres : *Streptomyces*, *Micromonospora* et *Nocardiopsis*. L'inférence phylogénétique (**Figure. 25**) a confirmé la **prédominance de *Streptomyces***, la majorité des isolats se regroupant étroitement avec des espèces connues de *Streptomyces*.

D'autres clusters ont également été observés. Par exemple, les isolats **AR38, AL18 et AR35** formaient un groupe distinct, divergent de la souche type *Streptomyces pilosus* NBRC 12807<sup>T</sup> (AB184161), tandis qu'AR13 se regroupait avec *Streptomyces hyderabadensis* OÙ-40<sup>T</sup> (FM998652).

Fait notable, trois isolats (**AR32, AR37 et AR39**) formaient un clade séparé avec une divergence significative de toutes les souches types connues, suggérant la présence de **nouvelles espèces de *Streptomyces***. Cette observation justifie une évaluation taxonomique plus approfondie par **séquençage du génome complet** afin de confirmer leur nouveauté et leur statut phylogénétique. (**Figure.23**)

**Tableau.15** Identification taxonomique des isolats endophytes associés aux racines et feuilles des espèces d'*Artemisia* collectées dans les régions sud-est, sud-ouest et sud de l'Algérie, et numéro d'accèsion correspondant dans GenBank.

Isolats	Sites d'échantillonnages	Plante hôte	organes	Identification la plus proche *	Similarité %	Taille des Séquences (bp)	NCBI-GenBank accession number
AL1	Garaet Ezzemoul (Sebkha), Oum el Bouaghi, Algeria	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Feuilles	<i>Streptomyces collinus</i>	99.85	1364	PQ870458
AL2	Garaet Ezzemoul (Sebkha), Oum el Bouaghi, Algeria	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Feuilles	<i>Streptomyces apricus</i>	99.21	1392	PQ870459
AL3	Garaet Ezzemoul (Sebkha), Oum el Bouaghi, Algeria	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Feuilles	<i>Streptomyces albogriseolus</i>	99.86	1397	PQ870460
AR4	Garaet Ezzemoul (Sebkha), Oum el Bouaghi, Algeria	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Racines	<i>Streptomyces tendae</i>	99.78	1392	PQ870461
AR5	Garaet Ezzemoul (Sebkha), Oum el Bouaghi, Algeria	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Racines	<i>Streptomyces niveoruber</i>	100	1393	PQ870462
AR6	Djebel Bou Arif (Mountains), Batna, Algeria	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Racines	<i>Streptomyces xinghaiensis</i>	99.93	1393	PQ870463
AR7	Djebel Bou Arif (Mountains), Batna, Algeria	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Racines	<i>Streptomyces intermedius</i>	99.57	1394	PQ870464
AR8	Djebel Bou Arif (Mountains), Batna, Algeria	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Racines	<i>Streptomyces rochei</i>	99.93	1392	PQ870465
AR9	Djebel Bou Arif (Mountains), Batna, Algeria	<i>Artemisia herba alba</i> Asso	Racines	<i>Streptomyces pilosus</i>	99.93	1395	PQ870466
AL10	Djebel Arris (Mountains), Batna, Algeria	<i>herba alba</i> Asso	Feuilles	<i>Streptomyces rochei</i>	100	1279	PQ870467
AL11	Djebel Arris (Mountains), Batna, Algeria	<i>herba alba</i> Asso	Feuilles	<i>Streptomyces rochei</i>	99.93	1394	PQ870468
AR12	Djebel Arris (Mountains), Batna, Algeria	<i>herba alba</i> Asso	Racines	<i>Streptomyces drozdowiczii</i>	99.71	1388	PQ870469
AR13	Djebel Arris (Mountains), Batna, Algeria	<i>herba alba</i> Asso	Racines	<i>Streptomyces hyderabadensis</i>	99.17	1393	PQ870470
AR14	Djebel Arris (Mountains), Batna, Algeria	<i>herba alba</i> Asso	Racines	<i>Streptomyces plumbiresistens</i>	100	1381	PQ870471
AR15	El Hamel, Bou Saada Msila, Algeria	<i>Artemisia campestris</i>	Racines	<i>Streptomyces ambofaciens</i>	99.20	1376	PQ870472
AL16	El Hamel, Bou Saada Msila, Algeria	<i>Artemisia campestris</i>	Feuilles	<i>Streptomyces intermedius</i>	99.86	1393	PQ870473
AL17	Djebel Aissa (Mountains), Ain Sefra Naama, Algeria	<i>herba alba</i> Asso	Feuilles	<i>Streptomyces intermedius</i>	99.27	1359	PQ870474
AL18	Djebel Aissa (Mountains), Ain Sefra Naama, Algeria	<i>herba alba</i> Asso	Feuilles	<i>Streptomyces pilosus</i>	99.14	1392	PQ870475
AL19	Djebel Aissa (Mountains), Ain Sefra Naama, Algeria	<i>herba alba</i> Asso	Feuilles	<i>Streptomyces intermedius</i>	99.85	1363	PQ870476
AL20	Al Mansourah, Ghardaïa, Algeria	<i>herba alba</i> Asso	Feuilles	<i>Streptomyces albogriseolus</i>	99.93	1391	PQ870477
AL21	Al Mansourah, Ghardaïa, Algeria	<i>herba alba</i> Asso	Feuilles	<i>Streptomyces albogriseolus</i>	100	1391	PQ870478
AL22	Al Mansourah, Ghardaïa, Algeria	<i>herba alba</i> Asso	Feuilles	<i>Streptomyces intermedius</i>	99.93	1392	PQ870479

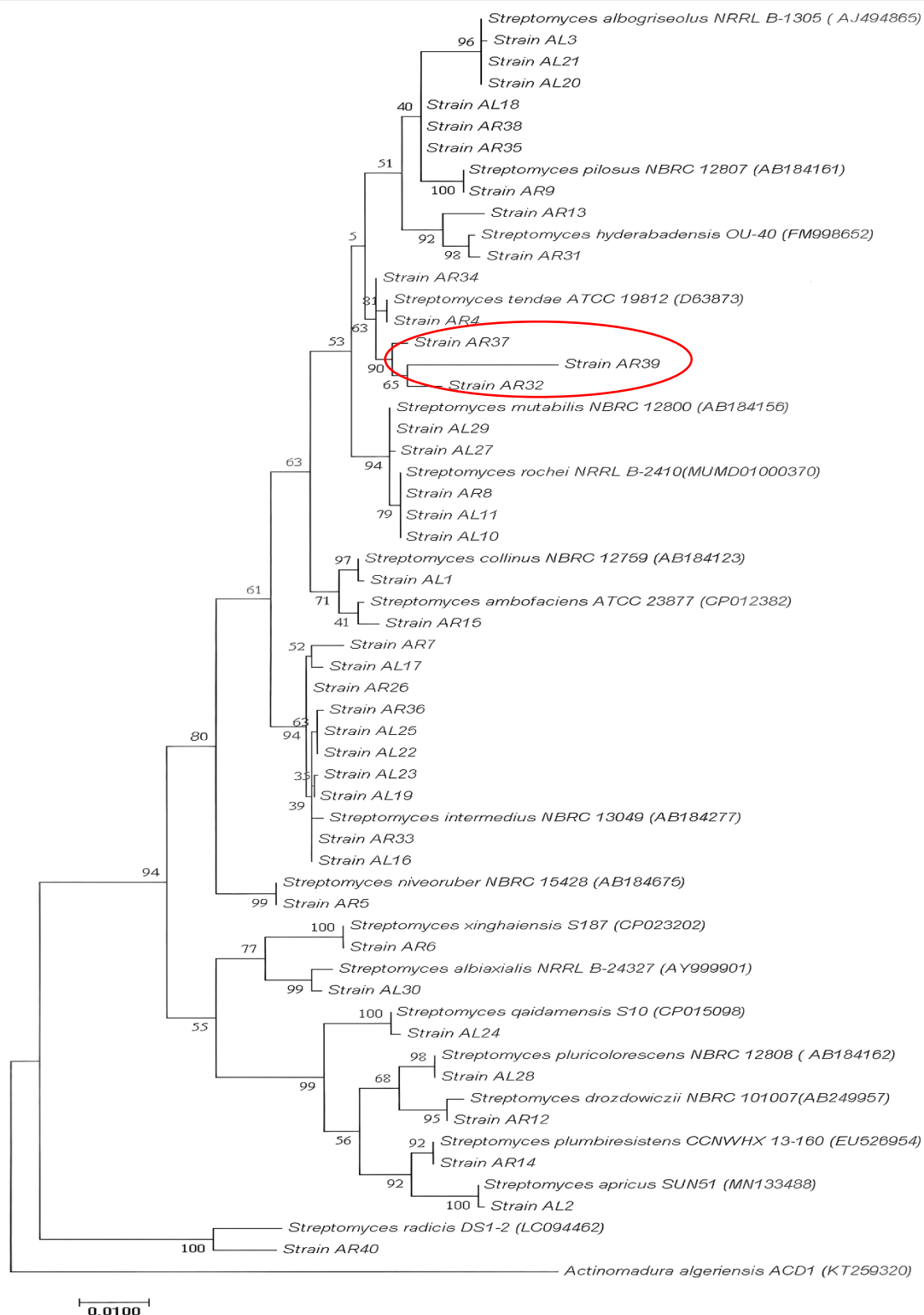
<b>AL23</b>	Al Mansourah, Ghardaïa, Algeria	<i>herba alba</i> Asso	Feuilles	<i>Streptomyces</i> <i>intermedius</i>	99.64	1391	PQ870480
<b>AL24</b>	Al Mansourah, Ghardaïa, Algeria	<i>herba alba</i> Asso	Feuilles	<i>Streptomyces</i> <i>quidamensis</i>	99.25	1339	PQ870481
<b>AL25</b>	Al Mansourah, Ghardaïa, Algeria	<i>herba alba</i> Asso	Feuilles	<i>Streptomyces</i> <i>intermedius</i>	99.78	1392	PQ870482
<b>AR26</b>	Oued Djerat, Djanet, Algeria	<i>Artemisia</i> <i>judaica</i> L. ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	<i>Streptomyces</i> <i>intermedius</i>	99.78	1392	PQ870483
<b>AL27</b>	Oued Djerat, Djanet, Algeria	<i>Artemisia</i> <i>judaica</i> L. ssp. <i>sahariensis</i>	Feuilles	<i>Streptomyces</i> <i>mutabilis</i>	99.78	1395	PQ870484
<b>AL28</b>	Oued Djerat, Djanet, Algeria	<i>Artemisia</i> <i>judaica</i> L. ssp. <i>sahariensis</i>	Feuilles	<i>Streptomyces</i> <i>pluricolorescens</i>	100	1341	PQ870485
<b>AL29</b>	Oued Djerat, Djanet, Algeria	<i>Artemisia</i> <i>judaica</i> L. ssp. <i>sahariensis</i>	Feuilles	<i>Streptomyces</i> <i>mutabilis</i>	99.79	1398	PQ870486
<b>AL30</b>	Oued Djerat, Djanet, Algeria	<i>Artemisia</i> <i>judaica</i> L. ssp. <i>sahariensis</i>	Feuilles	<i>Streptomyces</i> <i>albiacialis</i>	99.29	1402	PQ870487
<b>AR31</b>	Djebel Ilamane (Mountains) , Tamanrasset, Algeria	<i>Artemisia</i> <i>judaica</i> L. ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	<i>Streptomyces</i> <i>hyderabadensis</i>	99.35	1387	PQ870488
<b>AR32</b>	Djebel Ilamane (Mountains) , Tamanrasset, Algeria	<i>Artemisia</i> <i>judaica</i> L. ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	<i>Streptomyces</i> <i>tendae</i>	99.21	1390	PQ870489
<b>AR33</b>	Djebel Ilamane (Mountains) , Tamanrasset, Algeria	<i>Artemisia</i> <i>judaica</i> L. ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	<i>Streptomyces</i> <i>intermedius</i>	99.86	1391	PQ870490
<b>AR34</b>	Djebel Ilamane (Mountains) , Tamanrasset, Algeria	<i>Artemisia</i> <i>judaica</i> L. ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	<i>Streptomyces</i> <i>tendae</i>	99.71	1366	PQ870491
<b>AR35</b>	Djebel Ilamane (Mountains) , Tamanrasset, Algeria	<i>Artemisia</i> <i>judaica</i> L. ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	<i>Streptomyces</i> <i>pilosus</i>	99.42	1391	PQ870492
<b>AR36</b>	Djebel Ilamane (Mountains) , Tamanrasset, Algeria	<i>Artemisia</i> <i>judaica</i> L. ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	<i>Streptomyces</i> <i>intermedius</i>	99.21	1396	PQ870493
<b>AR37</b>	Djebel Ilamane (Mountains) , Tamanrasset, Algeria	<i>Artemisia</i> <i>judaica</i> L. ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	<i>Streptomyces</i> <i>tendae</i>	99.07	1392	PQ870494
<b>AR38</b>	Djebel Ilamane (Mountains) , Tamanrasset, Algeria	<i>Artemisia</i> <i>judaica</i> L. ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	<i>Streptomyces</i> <i>pilosus</i>	99.35	1392	PQ870495
<b>AR39</b>	Djebel Ilamane (Mountains) , Tamanrasset, Algeria	<i>Artemisia</i> <i>judaica</i> L. ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	<i>Streptomyces</i> <i>tendae</i>	97.13	1368	PQ870496
<b>AR40</b>	Djebel Ilamane (Mountains) , Tamanrasset, Algeria	<i>Artemisia</i> <i>judaica</i> L. ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	<i>Streptomyces</i> <i>radicis</i>	100	1408	PQ870497

<b>AJL1</b>	Oued Djerat, Djanet, Algeria.	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Feuilles	<i>Streptomyces aurantiacus</i>	99.64	1392	PV364233
<b>AJR2</b>	Oued Djerat, Djanet, Algeria.	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	<i>Micromonospora echinospora</i>	99.93	1375	PV364234
<b>AJR3</b>	Oued Djerat, Djanet, Algeria.	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	<i>Streptomyces rochei</i>	100	1389	PV364235
<b>AJL4</b>	Oued Djerat, Djanet, Algeria.	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Feuilles	<i>Streptomyces rochei</i>	100	1392	PV364236
<b>AJR5</b>	Oued Djerat, Djanet, Algeria.	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	<i>Micromonospora echinospora</i>	100	1328	PV364237
<b>AJL6</b>	Oued Djerat, Djanet, Algeria.	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Feuilles	<i>Micromonospora echinospora</i>	99.93	1380	PV364238
<b>AJR7</b>	Oued Djerat, Djanet, Algeria.	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	<i>Streptomyces rochei</i>	99.78	1395	PV364239
<b>AJR8</b>	Oued Djerat, Djanet, Algeria.	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	<i>Micromonospora citrea</i>	99.93	1381	PV364240
<b>AJL9</b>	Oued Djerat, Djanet, Algeria.	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Feuilles	<i>Streptomyces olivaceus</i>	99.71	1386	PV364241
<b>AJL10</b>	Oued Djerat, Djanet, Algeria.	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Feuilles	<i>Streptomyces rochei</i>	99.71	1386	PV364242
<b>AJR11</b>	Oued Djerat, Djanet, Algeria.	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	<i>Streptomyces albogriseolus</i>	99.93	1392	PV364243
<b>AJR12</b>	Oued Djerat, Djanet, Algeria.	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	<i>Micromonospora citrea</i>	99.93	1388	PV364244
<b>AJL13</b>	Oued Djerat, Djanet, Algeria.	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Feuilles	<i>Streptomyces kanamyceticus</i>	99.64	1393	PV364245
<b>AJR14</b>	Oued Djerat, Djanet, Algeria.	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	<i>Streptomyces intermedius</i>	99.93	1399	PV364246
<b>AJL15</b>	Oued Djerat, Djanet, Algeria.	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Feuilles	<i>Streptomyces mutabilis</i>	99.93	1342	PV364247
<b>AJR16</b>	Oued Djerat, Djanet, Algeria.	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Racines	<i>Nocardioopsis dassonvillei</i>	100	1400	PV364248
<b>AJL17</b>	Djebel Ilamane (Mountains), Tamanrasset, Algeria.	<i>Artemisia judaica</i> L .ssp. <i>sahariensis</i>	Feuilles	<i>Nonomuraea aridisoli</i>	99.78	1385	PV364249

<b>AJR18</b>	Djebel Ilamane (Mountains), Tamanrasset, Algeria.	<i>sahariensis</i> <i>Artemisia judaica</i> L .ssp.	Racines	<i>Streptomyces specialis</i>	98.52	1351	PV364250
<b>AJR19</b>	Djebel Ilamane (Mountains), Tamanrasset, Algeria.	<i>sahariensis</i> <i>Artemisia judaica</i> L .ssp.	Racines	<i>Nonomuraea salmonea</i>	99.71	1386	PV364251
<b>AJR20</b>	Djebel Ilamane (Mountains), Tamanrasset, Algeria.	<i>sahariensis</i> <i>Artemisia judaica</i> L .ssp.	Racines	<i>Streptomyces specialis</i>	98.51	1407	PV364252
<b>AJR21</b>	Djebel Ilamane (Mountains), Tamanrasset, Algeria.	<i>sahariensis</i> <i>Artemisia judaica</i> L .ssp.	Racines	<i>Streptomyces intermedius</i>	99.85	1366	PV364253
<b>AJR22</b>	Djebel Ilamane (Mountains), Tamanrasset, Algeria.	<i>sahariensis</i> <i>Artemisia judaica</i> L .ssp.	Racines	<i>Streptomyces intermedius</i>	99.86	1394	PV364254
<b>AJR23</b>	Djebel Ilamane (Mountains), Tamanrasset, Algeria.	<i>sahariensis</i> <i>Artemisia judaica</i> L .ssp.	Racines	<i>Streptomyces Intermedius</i>	99.85	1369	PV364255
<b>AJR24</b>	Djebel Ilamane (Mountains), Tamanrasset, Algeria.	<i>sahariensis</i> <i>Artemisia judaica</i> L .ssp.	Racines	<i>Streptomyces intermedius</i>	99.78	1394	PV364256
<b>AJL25</b>	Djebel Ilamane (Mountains), Tamanrasset, Algeria.	<i>sahariensis</i> <i>Artemisia judaica</i> L .ssp.	Feuilles	<i>Streptomyces intermedius</i>	99.71	1368	PV364257
<b>AJR26</b>	Djebel Ilamane (Mountains), Tamanrasset, Algeria.	<i>sahariensis</i> <i>Artemisia judaica</i> L .ssp.	Racines	<i>Streptomyces intermedius</i>	99.78	1368	PV364258
<b>AJR27</b>	Djebel Ilamane (Mountains), Tamanrasset, Algeria.	<i>sahariensis</i> <i>Artemisia judaica</i> L .ssp.	Racines	<i>Streptomyces pilosus</i>	99.78	1392	PV364259
<b>AJR28</b>	Djebel Ilamane (Mountains), Tamanrasset, Algeria.	<i>sahariensis</i> <i>Artemisia judaica</i> L .ssp.	Racines	<i>Streptomyces intermedius</i>	99.86	1391	PV364260
<b>AJR29</b>	Djebel Ilamane (Mountains), Tamanrasset, Algeria.	<i>sahariensis</i> <i>Artemisia judaica</i> L .ssp.	Racines	<i>Streptomyces intermedius</i>	99.93	1394	PV364261
<b>AJL30</b>	Djebel Ilamane (Mountains), Tamanrasset, Algeria.	<i>sahariensis</i> <i>Artemisia judaica</i> L .ssp.	Feuilles	<i>Gordonia terrae</i>	99.93	1392	PV364262
<b>AJR31</b>	Djebel Ilamane (Mountains), Tamanrasset, Algeria.	<i>sahariensis</i> <i>Artemisia judaica</i> L .ssp.	Racines	<i>Streptomyces tendae</i>	99.21	1388	PV364263
<b>AJR32</b>	Djebel Ilamane (Mountains), Tamanrasset, Algeria.	<i>sahariensis</i> <i>Artemisia judaica</i> L .ssp.	Racines	<i>Streptomyces intermedius</i>	99.86	1391	PV364264
<b>AJR33</b>	Djebel Ilamane (Mountains), Tamanrasset, Algeria.	<i>sahariensis</i> <i>Artemisia judaica</i> L .ssp.	Racines	<i>Streptomyces intermedius</i>	99.86	1393	PV364265
<b>AJR34</b>	Djebel Ilamane (Mountains)	<i>sahariensis</i> <i>Artemisia judaica</i> L.	Racines	<i>Streptomyces intermedius</i>	99.71	1398	PV364266

	, Tamanrasset, Algeria.	ssp.					
<b>AJR35</b>	Djebel Ilamane (Mountains) , Tamanrasset, Algeria.	<i>sahariensis</i> <i>Artemisia judaica</i> L.	Racines	<i>Streptomyces tendae</i>	99.28	1391	PV364267
<b>AJR36</b>	Djebel Ilamane (Mountains) , Tamanrasset, Algeria.	ssp. <i>sahariensis</i> <i>Artemisia judaica</i> L.	Racines	<i>Streptomyces pilosus</i>	99.71	1394	PV364268
<b>AJR37</b>	Djebel Ilamane (Mountains) , Tamanrasset, Algeria.	ssp. <i>sahariensis</i> <i>Artemisia judaica</i> L.	Racines	<i>Nonomuraea aridisoli</i>	99.12	1380	PV364269
<b>AJR38</b>	Djebel Ilamane (Mountains) , Tamanrasset, Algeria.	ssp. <i>sahariensis</i> <i>Artemisia judaica</i> L.	Racines	<i>Streptomyces pilosus</i>	99.57	1392	PV364270
<b>AJR39</b>	Djebel Ilamane (Mountains) , Tamanrasset, Algeria.	ssp. <i>sahariensis</i> <i>Artemisia judaica</i> L.	Racines	<i>Micromonospora sagamiensis</i>	99.34	1370	PV364271
<b>AJL40</b>	Djebel Ilamane (Mountains) , Tamanrasset, Algeria.	ssp. <i>sahariensis</i> <i>Artemisia judaica</i> L.	Feuilles	<i>Micromonospora echinospora</i>	99.93	1389	PV364272
<b>AJR41</b>	Djebel Ilamane (Mountains) , Tamanrasset, Algeria.	ssp. <i>sahariensis</i> <i>Artemisia judaica</i> L.	Racines	<i>Streptomyces mutabilis</i>	99.86	1391	PV364273
<b>AJR42</b>	Djebel Ilamane (Mountains) , Tamanrasset, Algeria.	ssp. <i>sahariensis</i> <i>Artemisia judaica</i> L.	Racines	<i>Streptomyces pactum</i>	96.33	1389	PV364274

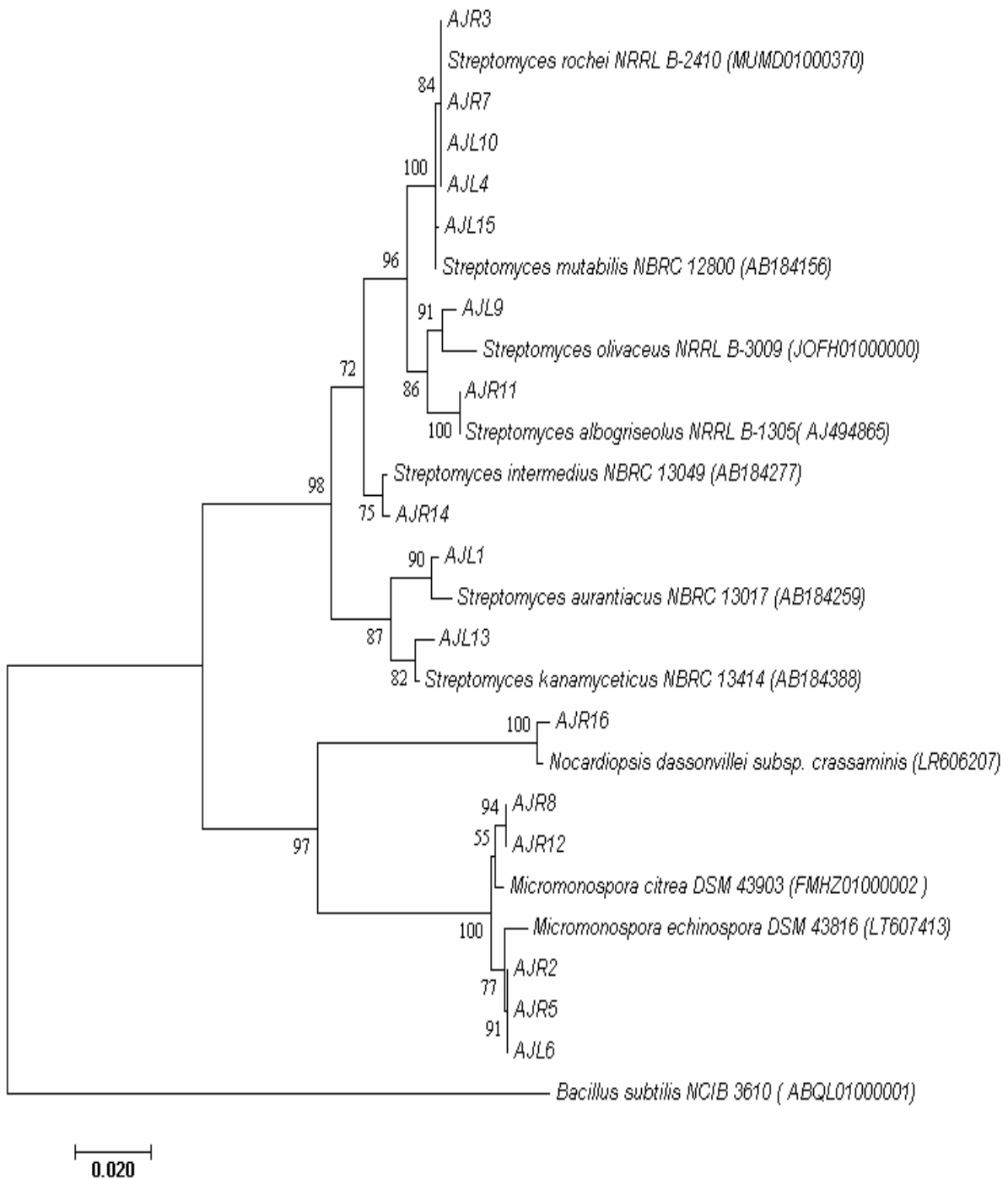
\* Selon la collection de nucléotides (nr/nt) database de NCBI BLAST



**Figure. 23** Arbre phylogénétique des isolats endophytes d'*Artemisia* spp. et de leurs plus proches espèces d'actinobactéries dans GenBank. L'arbre phylogénétique à vraisemblance maximale a été construit à l'aide du logiciel MEGA 11 en utilisant des séquences de 1359 pb. La méthode du bootstrap avec 1000 répliqués a été utilisée. Les valeurs de bootstrap sont indiquées aux nœuds. *Actinomadura Algeriensis* ACD1T (KT259320) a été utilisé comme *outgroup*. La barre d'échelle représente 0,01 substitution par position nucléotidique.



**Figure. 24** Arbre phylogénétique des isolats endophytes d'*Artemisia judaica* L. ssp. *sahariensis* (région de Tamanrasset) et de leurs plus proches espèces d'actinobactéries dans GenBank. L'arbre phylogénétique à vraisemblance maximale a été construit à l'aide du logiciel MEGA 11 en utilisant des séquences de 1399 pb. La méthode du bootstrap avec 1000 répliquats a été utilisée. Les valeurs de bootstrap sont indiquées aux nœuds. *Bacillus subtilis* NCIB 3610T (ABQL01000001) a été utilisé comme *outgroup*. La barre d'échelle représente 0,020 substitution par position nucléotidique.



**Figure. 25** Arbre phylogénétique des isolats endophytes d'*Artemisia judaica* L. ssp. *sahariensis* (région de Djanet) et de leurs plus proches espèces d'actinobactéries dans GenBank. L'arbre phylogénétique à vraisemblance maximale a été construit à l'aide du logiciel MEGA 11 en utilisant des séquences de 1380 pb. La méthode du bootstrap avec 1000 répliquats a été utilisée. Les valeurs de bootstrap sont indiquées aux nœuds. *Bacillus subtilis* NCIB 3610T (ABQL01000001) a été utilisé comme *outgroup*. La barre d'échelle représente 0,020 substitution par position nucléotidique.

#### 4. Activité antibactérienne des isolats endophytes

Les 82 isolats endophytiques ont été évalués pour leur activité antibactérienne vis-à-vis des souches de référence Gram positif et Gram négatif à l'aide de la méthode de strie croisée. Chaque isolat a été ensemencé au centre sur les milieux ISP2 et TSA, puis incubé pendant 15 jours à  $28 \pm 2$  °C. Par la suite, les souches *Staphylococcus aureus* (ATCC 29213), *Escherichia coli* (ATCC 29522), *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 29553), *Salmonella typhimurium* (ATCC 14028), ont été ensemencées en strie et incubés à 37 °C pendant 24 heures.

Les effets antibactériens ont été classés en quatre niveaux : inhibition totale de la croissance, croissance partielle, faible croissance et absence d'inhibition, comme présenté dans le **Tableau 16, 17** et illustré à la **Figure 26**.

Au total, **64 isolats** ont inhibé la croissance de *Staphylococcus aureus* (ATCC 29213), **61** celle de *Escherichia coli* (ATCC 29522), **51** celle de *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 29553), et **43** ont montré une activité contre *Salmonella typhimurium* (ATCC 14028).

Les souches les plus actives appartiennent principalement au genre *Streptomyces*, notamment **AJR23**, qui a donné une zone d'inhibition de **36 mm** vis-à-vis *P. aeruginosa*, et **AJR7**, qui a inhibé tous les pathogènes sur les deux milieux TSA et ISP2, l'isolat **AR15** a présenté la plus forte inhibition d'*E. coli* sur le milieu ISP2, avec une zone d'inhibition de **30 ± 0,1 mm**.

Sur le milieu TSA, les isolats **AL19, AL30, AR34 et AR35** ont démontré une activité antibactérienne marquée vis-à-vis *P. aeruginosa*, produisant des zones d'inhibition respectives de **36 ± 0,1 mm, 30 ± 0,2 mm, 30 ± 0,1 mm et 25 ± 0,2 mm**. Les isolats **AR26 et AR39** ont présenté une activité antibactérienne à large spectre, inhibant les quatre pathogènes testés. Notamment, l'isolat **AL28** a montré la plus forte inhibition vis-à-vis *S. aureus*, avec une zone de **40 ± 0,5 mm**, dépassant significativement la valeur moyenne des zones d'inhibition mesurée chez l'ensemble des isolats testés (**25 mm**,  $p < 0,05$ ).

Certains isolats, tels que **AR5 et AR6**, ont montré une activité antibactérienne spécifique au milieu ; leur inhibition des bactéries pathogènes n'a été observée que sur le milieu **TSA** et non sur ISP2. Cela suggère que l'expression des métabolites secondaires antibactériens chez ces souches est probablement influencée par la composition du milieu de culture, mettant en évidence la nature **dépendante du milieu** de la biosynthèse d'antibiotiques chez les actinomycètes.

Sept isolats **AJR2, AJR5, AJL6, AJR8, AJR12, AJR39 et AJL40** (*Micromonospora*) ; ont montré une activité à large spectre, sur TSA. De plus, l'isolat **AJR16** (*Nocardiosis*) et l'isolat **AJR19** (*Nonomuraea*) étaient actives vis-à-vis tous les pathogènes testés sur TSA. Plusieurs isolats, dont **AJR3, AJR11, AJR14, AJR18, AJR20, AJR35 et AJR41**, ont entraîné une inhibition complète de la croissance d'un ou plusieurs pathogènes, spécifiquement sur TSA, par vis-à-vis aucune activité inhibitrice n'a été observée sur ISP2.

Les isolats affiliés aux genres *Streptomyces* (**AL28, AJL1, AJR3, AJR7, AJR23**), *Micromonospora* (**AJR2, AJR5, AJR8, AJL6, AJL40, AJR39**) et *Nocardiosis* (**AJR16**) ont présenté une activité antibactérienne forte à modérée, certaines affichant des valeurs de concentration minimale inhibitrice (CMI) comprises entre 4 et 8 µg/mL et ce vis-à-vis *S. aureus*, *E. coli* et *P. aeruginosa* (**Tableau.18 et 19**). Les souches *Streptomyces* **AL28 et AJR23** ont produit la plus grande zone d'inhibition (**40 et 36mm**) contre *S. aureus* et *P. aeruginosa*, correspondant à une CMI de 4 µg/mL. D'autres souches ont présenté des CMI allant de 31.25 à 125 µg/mL, tandis que les isolats n'exerçant aucune inhibition à 1000 µg/mL ont été considérés comme inactifs (CMI > 1000 µg/mL).



**Figure.26** Activités antibactériennes des isolats endophytes vis-à-vis *S. aureus* 29213, *E. coli* 29522, *P. aeruginosa* 29553 et *S. typhimurium* 14028.



**Tableau.16** Activités antibactériennes des isolats endophytes vis-à-vis *S. aureus* 29213, *E.coli* 29522, *P.aeruginosa* 29553 et *S. typhimurium* 14028.

Isolats	Identification la plus proche *	Gram -				Gram +			
		<i>P. aeruginosa</i> 29553		<i>E. coli</i> 29522		<i>S. typhimurium</i> 14028		<i>S. aureus</i> 29213	
		Distances mesurées de la zone d'inhibition (Moyenne ± écart-type) (mm)							
		TSA	ISP2	TSA	ISP2	TSA	ISP2	TSA	ISP2
Témoin (négatif)	-	0±0.0m	0±0.0M	0±0.0K	0±0.0R	0±0.0x	0±0.0S	0±0.0f	0±0.0W
AJL1	<i>Streptomyces aurantiacus</i>	22±0.1Δj	0M	35±0.1ΔB	25±0.5ΔP	20±0.1Δt	0S	35±0.5ΔV	0W
AJR2	<i>Micromonospora echinospora</i>	30±0.2Δe	0M	40±0.2ΔA	0R	30±0.2■p	30±0.5ΔO	30±0.5ΔX	0W
AJR3	<i>Streptomyces rochei</i>	27±0.1■f	0M	25±0.1■EF	0R	30±0.7Δp	0S	30±0.2■X	0W
AJL4	<i>Streptomyces rochei</i>	0m	0M	0K	0R	0x	0S	18±0.6Δβ	0W
AJR5	<i>Micromonospora echinospora</i>	40±0.1Δa	0M	40±0.1ΔA	40±0.3ΔL	40 ±0.2Δn	0S	40±0.1ΔT	0W
AJL6	<i>Micromonospora echinospora</i>	40 ±0.1Δa	0M	40±0.1ΔA	0R	40±0.1Δn	0S	40±0.5ΔT	0W
AJR7	<i>Streptomyces rochei</i>	33±0.3■d	25±0.1ΔN	25 ±0.5ΔEF	25±0.1ΔP	30±0.6Δp	30±0.6ΔO	30±0.3ΔX	25±0.1Δα
AJR8	<i>Micromonospora citrea</i>	30±0.1■e	0M	28 ±0.1ΔD	0R	30±0.5■p	0S	25±0.6ΔZz	0W
AJL9	<i>Streptomyces olivaceus</i>	25 ±0.4Δh	0M	22 ±0.6ΔG	0R	0x	0S	25±0.5ΔZz	0W
AJL10	<i>Streptomyces rochei</i>	25±0.1Δh	0M	25±0.1ΔEF	0R	24±0.2Δr	0S	30±0.5ΔX	0W
AJR11	<i>Streptomyces albogriseolus</i>	30 ±0.1Δe	0M	25 ±0.1ΔEF	0R	27±0.6Δq	0S	30±0.1■X	0W
AJR12	<i>Micromonospora citrea</i>	20±0.5Δk	0M	18 ±0.4ΔI	0R	0x	0S	25±0.1ΔZz	0W
AJL13	<i>Streptomyces kanamyceticus</i>	22±0.2Δj	0M	24±0.1ΔF	0R	22±0.5Δs	0S	18±0.5Δβ	16±0.4Δε
AJR14	<i>Streptomyces intermedius</i>	18±0.4Δl	0M	16±0.1ΔJ	0R	16±0.7Δw	0S	20±0.6ΔΘ	0W
AJL15	<i>Streptomyces mutabilis</i>	0m	0M	20±0.5ΔH	0R	20±0.6Δt	0S	24±0.7Δz	0W
AJR16	<i>Nocardopsis dassonvillei</i>	30±0.1Δe	0M	30±0.1■C	0R	25±0.5Δor	0S	30±0.2■X	0W
AJL17	<i>Nonomuraea aridisoli</i>	0m	0M	0K	0R	0x	0S	0f	0W
AJR18	<i>Streptomyces specialis</i>	22±0.6Δj	0M	22±0.1ΔG	0R	24±0.3■r	0S	25±0.5ΔZz	0W
AJR19	<i>Nonomuraea salmonea</i>	25±0.1Δh	0M	25±0.2ΔEF	0R	20±0.5Δt	0S	25±0.5ΔZz	0W
AJR20	<i>Streptomyces specialis</i>	22±0.1Δj	0M	22±0.5ΔG	0R	24±0.1■r	0S	25±0.5ΔZz	0W
AJR21	<i>Streptomyces intermedius</i>	24±0.1Δi	0M	20±0.6ΔH	0R	18±0.5Δv	0S	26±0.5ΔZ	0W
AJR22	<i>Streptomyces intermedius</i>	0m	0M	22±0.5ΔG	0R	0x	0S	25±0.5ΔZz	0W
AJR23	<i>Streptomyces intermedius</i>	36±0.1■b	0M	24±0.1ΔF	0R	24±0.6Δr	0S	26±0.2Δz	0W
AJR24	<i>Streptomyces intermedius</i>	26±0.1Δg	0M	22 ±0.5ΔG	0R	18±0.5Δv	0S	26±0.5ΔZ	0W
AJL25	<i>Streptomyces intermedius</i>	35±0.5Δc	0M	26 ±0.6ΔE	0R	26±0.5Δqo	0S	34±0.5ΔV	0W
AJR26	<i>Streptomyces intermedius</i>	20±0.5Δk	0M	20±0.7ΔH	0R	25±0.7Δor	0S	28±0.1ΔY	0W
AJR27	<i>Streptomyces pilosus</i>	22±0.1Δj	0M	28 ±0.5ΔD	0R	22±0.6Δs	0S	34±0.2■V	0W
AJR28	<i>Streptomyces intermedius</i>	20±0.1Δk	0M	20±0.1ΔH	0R	25±0.7Δor	0S	28±0.3ΔY	0W
AJR29	<i>Streptomyces intermedius</i>	0m	0M	25±0.1ΔEF	0R	26±0.5Δqo	0S	32±0.1ΔW	0W
AJL30	<i>Gordonia terrae</i>	0m	0M	0K	0R	0x	0S	0f	0W
AJR31	<i>Streptomyces tendae</i>	24±0.1Δi	0M	24 ±0.6ΔF	0R	22±0.5Δs	0S	24±0.1Δz	0W
AJR32	<i>Streptomyces intermedius</i>	35±0.7Δc	0M	26±0.1■E	0R	30±0.5Δp	0S	32±0.1ΔW	0W
AJR33	<i>Streptomyces intermedius</i>	26±0.1Δg	0M	16 ±0.1ΔJ	0R	26±0.4Δqo	0S	22 ±0.2Δy	0W
AJR34	<i>Streptomyces intermedius</i>	24±0.1Δi	0M	0K	0R	24±0.5Δr	0S	32±0.5ΔW	0W
AJR35	<i>Streptomyces tendae</i>	35±0.2■c	0M	24±0.2ΔF	0R	24±0.6Δr	0S	24±0.1Δz	0W
AJR36	<i>Streptomyces pilosus</i>	30±0.1■e	0M	20±0.1ΔH	20±0.6ΔQ	26±0.7Δqo	0S	24±0.1Δz	24±0.1Δα
AJR37	<i>Nonomuraea aridisoli</i>	0m	0M	0K	0R	0x	0S	0f	0W
AJR38	<i>Streptomyces pilosus</i>	25±0.1Δh	0M	20 ±0.1ΔH	0R	22±0.5Δs	0S	25±0.1ΔZz	0W
AJR39	<i>Micromonospora sagamiensis</i>	30±0.1Δe	0M	40±0.5ΔA	0R	20±0.6Δt	0S	40±0.1ΔT	0W
AJL40	<i>Micromonospora echinospora</i>	30±0.1Δe	0M	40±0.5ΔA	0R	30±0.2■p	0S	30±0.4ΔX	0W
AJR41	<i>Streptomyces mutabilis</i>	30±0.1Δe	0M	20±0.1ΔH	0R	20±0.1Δt	0S	24±0.1■z	0W
AJR42	<i>Streptomyces pactum</i>	26±0.3Δg	0M	26 ±0.4ΔE	0R	26±0.1Δqo	0S	34±0.2■V	0W

Δ Inhibition partielle de la croissance 0 Aucune inhibition ■ Inhibition totale de la croissance Δ Croissance faible

\* Selon la collection de nucléotides de la base de données EzTaxon. Les valeurs sont exprimées en moyenne ± écart-type (n = 3). Des lettres ou symboles différents au sein d'une même colonne indiquent des différences significatives entre les souches (ANOVA à un facteur suivie du test de Tukey, p < 0,05). Les analyses statistiques ont été réalisées séparément pour chaque pathogène et pour chaque milieu de culture. Un milieu non inoculé a été utilisé comme témoin négatif dans chaque expérience. Un témoin positif (Gentamicine) a également été utilisé mais n'est pas présenté dans le tableau.

**Tableau.17** Activités antibactériennes des *Streptomyces* endophytes vis-à-vis *S. aureus* 29213, *E.coli* 29522, *P.aeruginosa* 29553 et *S. typhimurium* 14028.

isolats	Identification la plus proche *	Gram -				Gram +			
		<i>P. aeruginosa</i> 29553		<i>E. coli</i> 29522		<i>S. typhimurium</i> 14028		<i>S. aureus</i> 29213	
		TSA	ISP2	TSA	ISP2	TSA	ISP2	TSA	ISP2
Distances mesurées de la zone d'inhibition (Moyenne ± écart-type) (mm)									
Témoin négatif	-	0±0.0a	0±0.0j	0±0.0m	0±0.0v	0±0.0B	0±0.0H	0±0.0K	0±0.0V
AL1	<i>S. collinus</i>	0a	0j	0m	0v	0B	0H	0K	0V
AL2	<i>S. apricus</i>	0a	0j	0m	25±0.2□w	0B	0H	0K	0V
AL3	<i>S. albogriseolus</i>	0a	0j	30±0.2●n	0v	0B	0H	22±0.2◇L	0V
AR4	<i>S. tendae</i>	30±0.2□b	0j	13 ±0.5□o	0v	0B	0H	20 ±0.1◇M	0V
AR5	<i>S. niveoruber</i>	36 ±0.3●c	0j	30±0.2□n	0v	0B	0H	18 ±0.4●N	0V
AR6	<i>S. xinghaiensis</i>	30 ±0.1●b	0j	30 ±0.2●n	0v	0B	0H	36 ±0.2●O	0V
AR7	<i>S. intermedius</i>	0a	0j	30 ±0.2●n	0v	0B	0H	0K	0V
AR8	<i>S. rochei</i>	0a	0j	0m	0v	0B	0H	0K	0V
AR9	<i>S. pilosus</i>	0a	0j	0m	0v	0B	0H	0K	0V
AL10	<i>S. rochei</i>	26±0.5●d	0j	30±0.2●n	0v	35±0.1●C	0H	36 ±0.1◇O	0V
AL11	<i>S. rochei</i>	25 ±0.2●e	0j	24 ±0.4●p	0v	0B	0H	30 ±0.1◇P	0V
AR12	<i>S. drozdowiczii</i>	0a	0j	22±0.5●q	20±0.3●x	0B	0H	30 ±0.2□P	26 ±0.2●W
AR13	<i>S. hyderabadensis</i>	0a	0j	0m	0v	0B	0H	30 ±0.4●P	0V
AR14	<i>S. plumbiresistens</i>	0a	0j	0m	0v	0B	0H	0K	0V
AR15	<i>S. ambofaciens</i>	0a	0j	0m	30 ±0.1◇y	0B	0H	0K	24 ±0.2◇X
AL16	<i>S. intermedius</i>	0a	0j	24±0.2●p	28±0.2●z	0B	0H	28 ±0.5□Q	32 ±0.5●Y
AL17	<i>S. intermedius</i>	0a	0j	20 ±0.6●r	0v	0B	0H	0K	0V
AL18	<i>S. pilosus</i>	0a	0j	0m	0v	0B	0H	0K	0V
AL19	<i>S. intermedius</i>	36 ±0.1◇f	0j	22±0.2●q	0v	25±0.2●D	0H	32 ±0.2●R	0V
AL20	<i>S. albogriseolus</i>	0a	0j	0m	0v	0B	0H	0K	0V
AL21	<i>S. albogriseolus</i>	0a	0j	0m	0v	0B	0H	0K	0V
AL22	<i>S. intermedius</i>	0a	0j	0m	0v	0B	0H	30±0.2□P	0V
AL23	<i>S. intermedius</i>	0a	0j	0m	0v	0B	0H	0K	0V
AL24	<i>S. qaidamensis</i>	0a	0j	0m	0v	0B	0H	0K	0V
AL25	<i>S. intermedius</i>	0a	0j	0m	22±0.1●A	0B	0H	0K	24±0.5□X
AR26	<i>S. intermedius</i>	15±0.2●g	25±0.2●k	28±0.3□s	25±0.2●w	10 ±0.4●E	18±0.3●I	35±0.1◇S	30 ±0.4●Y
AL27	<i>S. mutabilis</i>	0a	0j	30±0.2□n	0v	0B	0H	35 ±0.1□S	0V
AL28	<i>S. pluricologrescens</i>	35 ±0.4□h	0j	40 ±0.6□t	0v	0B	0H	40 ±0.5◇T	0V
AL29	<i>S. mutabilis</i>	0a	0j	0m	0v	0B	0H	0K	0V
AL30	<i>S. albiacialis</i>	30 ±0.2◇b	0j	0m	0v	35±0.2●C	0H	0K	0V
AR31	<i>S. hyderabadensis</i>	25 ±0.2□e	0j	25±0.3●u	0v	0B	0H	25±0.2●U	0V
AR32	<i>S. tendae</i>	0a	25 ±0.1□k	0m	20±0.1□x	0B	0H	0K	07 ±0.5□Z
AR33	<i>S. intermedius</i>	0a	0j	25±0.2●u	0v	28±0.2●F	0H	30 ±0.5●P	0V
AR34	<i>S. tendae</i>	30 ±0.1◇b	0j	0m	0v	0B	0H	30 ±0.4●P	0V
AR35	<i>S. pilosus</i>	25±0.2◇e	0j	24 ±0.1●p	0v	0B	0H	35 ±0.1◇S	0V
AR36	<i>S. intermedius</i>	0a	0j	28±0.2●s	0v	0B	0H	32±0.2●R	0V
AR37	<i>S. tendae</i>	0a	28 ±0.3□l	0m	22 ±0.5□A	0B	26±0.2●J	0K	30 ±0.2□Y
AR38	<i>S. pilosus</i>	0a	0j	0m	0v	0B	0H	0K	0V
AR39	<i>S. tendae</i>	30 ±0.5●b	28 ±0.2●l	24±0.4●p	20±0.2●x	20±0.5●G	18±0.4●I	30 ±0.1●P	25 ±0.1●W
AR40	<i>S. radicis</i>	20 ±0.6●i	0j	0m	0v	20±0.4●G	0H	28±0.2●Q	0V

□ Croissance partielle 0 Aucune inhibition ◇ Inhibition totale de la croissance ● Faible croissance

\* Selon la collection de nucléotides de la base de données EzTaxon. Les valeurs sont exprimées en moyenne ± écart-type (n = 3). Des lettres ou symboles différents au sein d'une même colonne indiquent des différences significatives entre les souches (ANOVA à un facteur suivie du test de Tukey, p < 0,05). Les analyses statistiques ont été réalisées séparément pour chaque pathogène et pour chaque milieu de culture. Un milieu non inoculé a été utilisé comme témoin négatif dans chaque expérience. Un témoin positif (Gentamicine) a également été utilisé mais n'est pas présenté dans le tableau.

**Tableau. 18** Concentrations minimales inhibitrices (CMI) des isolats actinobactériennes endophytes bioactives vis-à-vis les bactéries pathogènes de référence (*S. aureus* 29213, *E. coli* 29522, *P. aeruginosa* 29553 et *S. typhimurium* 14028)

Isolats	Gram -				Gram +			
	<i>P. aeruginosa</i> 29553		<i>E. coli</i> 29522		<i>S. typhimurium</i> 14028		<i>S. aureus</i> 29213	
	CMI ( $\mu\text{g mL}^{-1}$ )							
	TSA	ISP2	TSA	ISP2	TSA	ISP2	TSA	ISP2
AJL1	62.5	ND	4	31.25	62.5	ND	4	ND
AJR2	8	ND	4	ND	8	8	8	ND
AJR3	31.25	ND	31.25	ND	8	ND	8	ND
AJL4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	125	ND
AJR5	4	ND	4	4	4	ND	4	ND
AJL6	4	ND	4	ND	4	ND	4	ND
AJR7	8	31.25	31.25	31.25	8	8	8	31.25
AJR8	8	ND	31.25	ND	8	ND	31.25	ND
AJL9	31.25	ND	62.5	ND	ND	ND	31.25	ND
AJL10	31.25	ND	31.25	ND	62.5	ND	8	ND
AJR11	8	ND	31.25	ND	31.25	ND	8	ND
AJR12	62.5	ND	125	ND	ND	ND	31.25	ND
AJL13	62.5	ND	62.5	ND	62.5	ND	125	125
AJR14	125	ND	125	ND	125	ND	62.5	ND
AJL15	ND	ND	62.5	ND	62.5	ND	62.5	ND
AJR16	8	ND	8	ND	31.25	ND	8	ND
AJL17	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
AJR18	62.5	ND	62.5	ND	62.5	ND	31.25	ND
AJR19	31.25	ND	31.25	ND	62.5	ND	31.25	ND
AJR20	62.5	ND	62.5	ND	62.5	ND	31.25	ND
AJR21	62.5	ND	62.5	ND	125	ND	31.25	ND
AJR22	ND	ND	62.5	ND	ND	ND	31.25	ND
AJR23	4	ND	62.5	ND	62.5	ND	31.25	ND
AJR24	31.25	ND	62.5	ND	125	ND	31.25	ND
AJL25	4	ND	31.25	ND	31.25	ND	8	ND
AJR26	62.5	ND	62.5	ND	31.25	ND	31.25	ND
AJR27	62.5	ND	31.25	ND	62.5	ND	8	ND
AJR28	62.5	ND	62.5	ND	31.25	ND	31.25	ND
AJR29	ND	ND	31.25	ND	31.25	ND	8	ND
AJL30	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
AJR31	62.5	ND	62.5	ND	62.5	ND	62.5	ND
AJR32	4	ND	31.25	ND	8	ND	8	ND
AJR33	31.25	ND	125	ND	31.25	ND	62.5	ND
AJR34	62.5	ND	ND	ND	62.5	ND	8	ND
AJR35	4	ND	62.5	ND	62.5	ND	62.5	ND
AJR36	8	ND	62.5	62.5	31.25	ND	62.5	62.5
AJR37	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
AJR38	31.25	ND	62.5	ND	62.5	ND	31.25	ND
AJR39	8	ND	4	ND	62.5	ND	4	ND
AJL40	8	ND	4	ND	8	ND	8	ND
AJR41	8	ND	62.5	ND	62.5	ND	62.5	ND
AJR42	31.25	ND	31.25	ND	31.25	ND	8	ND

Les valeurs de CMI sont exprimées en  $\mu\text{g/mL}$  en utilisant des dilutions sérielles en deux fois. ND : Non déterminé. Aucune inhibition n'a été observée à  $1000 \mu\text{g/mL}$  ; les souches ont été considérées comme inactives ( $\text{CMI} > 1000 \mu\text{g/mL}$ ).

**Tableau. 19** Concentrations minimales inhibitrices (CMI) des *Streptomyces* endophytes bioactives vis-à-vis les bactéries pathogènes de référence (*S. aureus* 29213, *E. coli* 29522, *P. aeruginosa* 29553 et *S. typhimurium* 14028)

		Gram -				Gram +			
		<i>P. aeruginosa</i> 29553		<i>E. coli</i> 29522		<i>S. typhimurium</i> 14028		<i>S. aureus</i> 29213	
		CMI ( $\mu\text{g mL}^{-1}$ )							
isolats	TSA	ISP2	TSA	ISP2	TSA	ISP2	TSA	ISP2	
AL1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
AL2	ND	ND	ND	31.25	ND	ND	ND	ND	
AL3	ND	ND	8	ND	ND	ND	62.5	ND	
AR4	8	ND	125	ND	ND	ND	62.5	ND	
AR5	4	ND	8	ND	ND	ND	125	ND	
AR6	8	ND	8	ND	ND	ND	4	ND	
AR7	ND	ND	8	ND	ND	ND	ND	ND	
AR8	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
AR9	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
AL10	31.25	ND	8	ND	4	ND	4	ND	
AL11	31.25	ND	62.25	ND	ND	ND	8	ND	
AR12	ND	ND	62.25	62.5	ND	ND	8	31.25	
AR13	ND	ND	ND	ND	ND	ND	8	ND	
AR14	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
AR15	ND	ND	ND	8	ND	ND	ND	62.5	
AL16	ND	ND	62.25	8	ND	ND	8	8	
AL17	ND	ND	62.25	ND	ND	ND	ND	ND	
AL18	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
AL19	4	ND	62.25	ND	31.25	ND	8	ND	
AL20	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
AL21	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
AL22	ND	ND	ND	ND	ND	ND	8	ND	
AL23	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
AL24	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
AL25	ND	ND	ND	62.5	ND	ND	ND	62.5	
AR26	125	31.25	8	31.25	125	125	4	8	
AL27	ND	ND	8	ND	ND	ND	4	ND	
AL28	4	ND	4	ND	ND	ND	4	ND	
AL29	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
AL30	8	ND	ND	ND	4	ND	ND	ND	
AR31	31.25	ND	31.25	ND	ND	ND	31.25	ND	
AR32	ND	31.25	ND	62.5	ND	ND	ND	125	
AR33	ND	ND	31.25	ND	8	ND	8	ND	
AR34	8	ND	ND	ND	ND	ND	8	ND	
AR35	31.25	ND	62.25	ND	ND	ND	4	ND	
AR36	ND	ND	8	ND	ND	ND	8	ND	
AR37	ND	31.25	ND	62.5	ND	31.25	ND	8	
AR38	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
AR39	8	31.25	62.25	62.5	62.5	125	8	31.25	
AR40	62.5	ND	ND	ND	62.5	ND	8	ND	

Les valeurs de CMI sont exprimées en  $\mu\text{g/mL}$  en utilisant des dilutions sérielles en deux fois. ND : Non déterminé. Aucune inhibition n'a été observée à 1000  $\mu\text{g/mL}$  ; les souches ont été considérées comme inactives (CMI > 1000  $\mu\text{g/mL}$ ).

## 5. Sensibilité aux antibiotiques des actinomycètes endophytes

La sensibilité des isolats endophytes aux antibiotiques a été évaluée vis-à-vis de 24 antibiotiques. Toutes les souches se sont révélées résistantes à l'acide nalidixique, au cotrimoxazole, à la polymyxine, au céfixime, à la ceftazidime, à la céfalexine, à la cefotaxime, à la céfazoline, à l'oxacilline, à la pénicilline G, à l'ampicilline et à l'amoxicilline.

De plus, 36 isolats sont résistants à la clindamycine, 28 à l'érythromycine, 25 à la tétracycline, 23 à la rifampicine, 16 à l'imipénème et 12 au chloramphénicol. Les souches AR8, AL18,

AL22, AR34 et AR40 sont résistantes à la vancomycine, tandis qu'AL22 et AL30 présentent également une résistance à la gentamicine.

La plupart des isolats sont très sensibles à la streptomycine, à l'exception d'AL28, AL30 et AL37. De même, toutes les souches sauf AL30 sont sensibles à la kanamycine. Il est à noter que tous les isolats résistants à au moins 12 antibiotiques. L'isolat **AL30** présentait le profil de résistance le plus large, montrant une résistance à 20 des 24 antibiotiques testés (**Tableau. 20**) et (**Annexe 7**). Ces résultats mettent en évidence une variation significative de la résistance aux antibiotiques parmi les isolats, reflétant possiblement des traits adaptatifs développés en réponse aux pressions sélectives de leurs habitats d'origine.

**Tableau. 20** Profil de résistance aux antibiotiques des *Streptomyces* endophytes associés aux racines et aux feuilles d'espèces d'*Artemisia* collectées dans les régions sud-est, sud-ouest et sud de l'Algérie

Isolats	Profil de résistance des isolats- <i>Streptomyces</i> aux antibiotiques																							
	OX	P	AMP	AX	IPM	CFM	CAZ	CN	CTX	KZ	VA	Pol	GEN	AK	TOB	S	K	E	CD	TE	C	RD	COT	NA
AL1	R	R	R	R	S	R	R	R	R	R	S	R	S	S	S	S	S	S	R	I	I	R	R	R
AL2	R	R	R	R	S	R	R	R	R	R	S	R	S	S	S	S	S	I	S	I	S	S	R	R
AL3	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	S	R	S	S	S	S	S	S	I	S	S	R	R	R
AR4	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	I	R	I	S	S	S	S	R	R	R	R	I	R	R
AR5	R	R	R	R	I	R	R	R	R	R	S	R	S	S	S	S	I	R	I	I	R	R	R	R
AR6	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	I	R	I	S	S	S	S	R	R	R	I	R	R	R
AR7	R	R	R	R	S	R	R	R	R	R	S	R	S	S	S	S	S	R	R	R	I	I	R	R
AR8	R	R	R	R	I	R	R	R	R	R	R	R	S	S	I	S	S	I	R	R	S	R	R	R
AR9	R	R	R	R	S	R	R	R	R	R	S	R	S	S	I	S	S	S	R	I	I	R	R	R
AL10	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	I	R	S	S	S	S	S	R	R	R	S	R	R	R
AL11	R	R	R	R	S	R	R	R	R	R	S	R	S	S	S	S	S	R	R	I	S	I	R	R
AR12	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	I	R	S	S	S	S	S	R	R	R	S	R	R	R
AR13	R	R	R	R	S	R	R	R	R	R	S	R	S	S	S	S	S	R	R	S	S	R	R	R
AR14	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	S	R	S	S	S	S	S	R	R	R	R	R	R	R
AR15	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	I	R	S	S	I	S	S	R	R	R	R	R	R	R
AL16	R	R	R	R	S	R	R	R	R	R	S	R	S	S	I	S	S	R	R	R	R	R	R	R
AL17	R	R	R	R	S	R	R	R	R	R	I	R	I	S	S	S	S	R	R	S	I	I	R	R
AL18	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	S	S	I	S	S	R	R	R	I	R	R	R
AL19	R	R	R	R	S	R	R	R	R	R	S	R	S	S	S	S	S	R	R	S	I	S	R	R
AL20	R	R	R	R	I	R	R	R	R	R	S	R	S	S	S	S	S	S	R	S	S	S	R	R
AL21	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	S	R	S	S	S	S	S	S	R	R	S	R	R	R
AL22	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	S	S	S	S	I	R	R	I	R	R	R
AL23	R	R	R	R	I	R	R	R	R	R	S	R	S	S	S	S	S	S	R	S	S	S	R	R
AL24	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	I	R	S	S	S	S	S	R	R	R	R	R	R	R
AL25	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	I	R	S	S	S	S	S	R	R	R	S	R	R	R
AR26	R	R	R	R	I	R	R	R	R	R	S	R	S	S	S	S	S	R	R	R	I	S	R	R
AL27	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	I	R	S	S	S	S	S	R	R	R	I	R	R	R
AL28	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	S	R	I	S	I	R	S	R	R	I	I	I	R	R
AL29	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	S	R	S	S	S	S	S	R	R	I	R	I	R	R
AL30	R	R	R	R	I	R	R	R	R	R	S	R	R	S	S	R	R	R	R	R	R	R	R	R
AR31	R	R	R	R	I	R	R	R	R	R	S	R	S	S	S	S	S	I	I	R	S	R	R	R
AR32	R	R	R	R	S	R	R	R	R	R	S	R	S	S	S	S	S	R	R	S	I	S	R	R
AR33	R	R	R	R	S	R	R	R	R	R	S	R	I	S	I	I	S	R	R	R	R	S	R	R
AR34	R	R	R	R	S	R	R	R	R	R	R	R	I	S	I	S	S	R	R	R	R	R	R	R
AR35	R	R	R	R	I	R	R	R	R	R	S	R	S	S	I	S	S	I	R	R	S	R	R	R
AR36	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	S	R	I	S	I	S	S	R	R	R	R	R	R	R
AR37	R	R	R	R	I	R	R	R	R	R	I	R	I	I	I	R	I	R	R	R	R	R	R	R
AR38	R	R	R	R	S	R	R	R	R	R	I	R	S	S	S	S	S	R	R	S	I	I	R	R
AR39	R	R	R	R	S	R	R	R	R	R	S	R	I	S	I	S	S	R	R	S	S	I	R	R
AR40	R	R	R	R	I	R	R	R	R	R	R	R	I	S	I	S	S	R	R	R	R	R	R	R

(OX) oxacilline (5 µg/disque), (P) pénicilline G (10 µg/disque), (AMP) ampicilline (10 µg/disque), (AX) amoxicilline (25 µg/disque), (IPM) imipénème (10 µg/disque), (CFM) céfixime (5 µg/disque), (CAZ) ceftazidime (30 µg/disque), (CN) céphalexine (30 µg/disque), (CTX) céfotaxime (30 µg/disque), (KZ) céfazoline (30 µg/disque), (VA) vancomycine (30 µg/disque), (Pol) polymyxine (300U), (GEN) gentamicine (10 µg/disque), (AK) amikacine (30 µg/disque), (TOB) tobramycine (10 µg/disque), (S) streptomycine (10 µg/disque), (K) kanamycine (30 µg/disque), (E) érythromycine (15 µg/disque), (CD) clindamycine (2 µg/disque), (TE) tétracycline (30 µg/disque), (C) chloramphénicol (30 µg/disque), (RD) rifampicine (30 µg/disque), (COT) cotrimoxazole (25 µg/disque) et (NA) acide nalidixique (30 µg/disque).

Degré de sensibilité : résistant (0,0 à 9,9 mm) ; intermédiaire (10-19,9 mm) ; sensible (>20 mm).

## 6. Solubilisation du phosphate

Parmi les 82 isolats endophytes, 25 ont montré une capacité de solubilisation du phosphate sur le milieu gélosé de Pikovskaya, produisant des halos clairs autour des colonies.

L'indice de solubilisation (IS), calculé comme le rapport entre la somme du diamètre du halo et de la colonie et le diamètre de la colonie, variait de 1,14 à 2,00. Sur la base des valeurs d'IS, la capacité de solubilisation a été classée comme faible ( $IS < 1,4$ ) ou modérée ( $1,4 \leq IS \leq 2,0$ ).

Toutes les souches solubilisatrices de phosphate appartenaient au genre *Streptomyces*, à l'exception de l'isolat AJL17, identifiée comme *Nonomuraea*.

Un résumé des valeurs moyennes d'IS ± écart-type et des catégories de solubilisation

est présenté dans le **Tableau. 21 et figure.27**

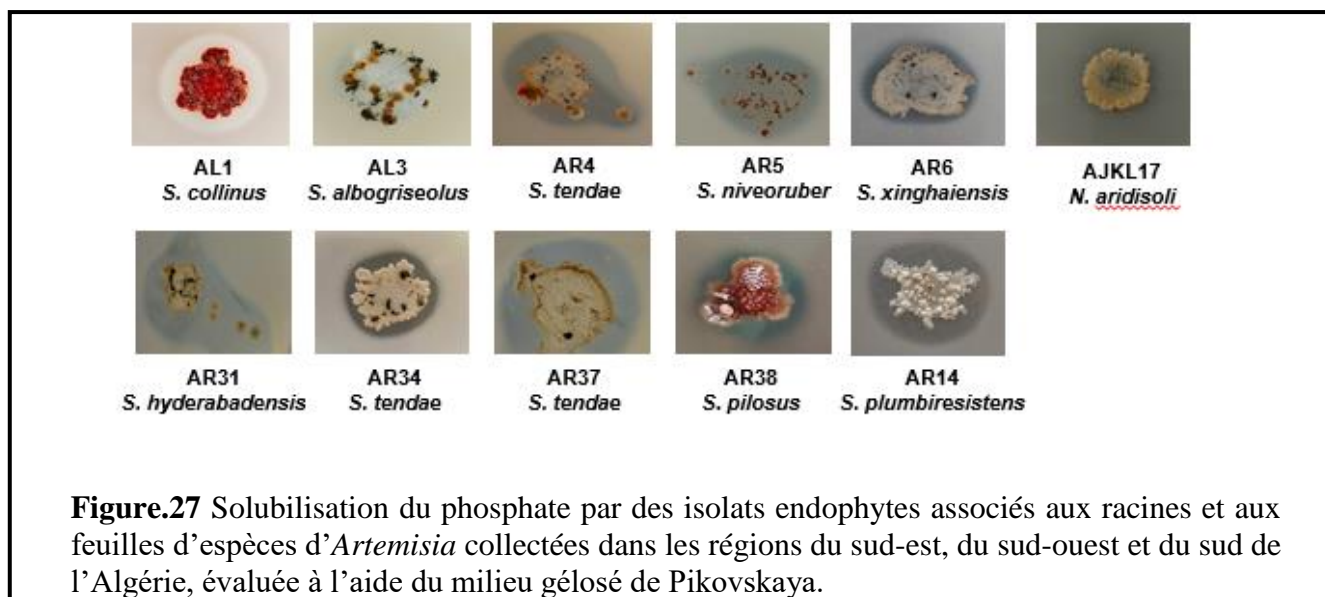
La plupart des souches présentaient une capacité de solubilisation modérée, avec des valeurs d'IS comprises entre 1,41 et 2,00, parmi elles, les isolats AJL1, AJR14, AJR18, AJR20, AJR31, AJR32, AJR35, AJR41, AR14, AR31, AR37, AL1, AR5 et AR4 figuraient parmi les solubilisateurs de phosphate les plus efficaces, suggérant leur potentiel d'utilisation pour favoriser la croissance des plantes en conditions de carence en nutriments.

Ces résultats appuient l'hypothèse selon laquelle certains isolats endophytes, en particulier du genre *Streptomyces*, peuvent constituer de bons candidats biofertilisants, notamment dans les sols dégradés ou salins.

**Tableau.21** Indice de solubilisation du phosphate (IS) (Moyenne  $\pm$  écart type) des actinobactéries endophytes associées aux racines et aux feuilles d'espèces d'*Artemisia* collectées dans les régions du sud-est, du sud-ouest et du sud de l'Algérie

Isolats	Indice de solubilisation du phosphate (IS) (Moyenne $\pm$ écart type) (mm)	Niveau d'activité
Témoin (négatif)	0.00 $\pm$ 0.00	-
AL1	1.58 $\pm$ 0.10	Modérée
AL3	1.30 $\pm$ 0.30	Faible
AR4	1.41 $\pm$ 0.40	Modérée
AR5	1.50 $\pm$ 0.10	Modérée
AR6	1.18 $\pm$ 0.20	Faible
AR14	1.73 $\pm$ 0.10	Modérée
AR31	1.66 $\pm$ 0.30	Modérée
AR34	1.22 $\pm$ 0.10	Faible
AR37	1.66 $\pm$ 0.20	Modérée
AR38	1.34 $\pm$ 0.10	Faible
AJR14	2.00 $\pm$ 0.10	Modérée
AJR35	1.77 $\pm$ 0.03	Modérée
AJL1	1.77 $\pm$ 0.02	Modérée
AJR41	1.73 $\pm$ 0.01	Modérée
AJR31	1.71 $\pm$ 0.01	Modérée
AJR32	1.66 $\pm$ 0.01	Modérée
AJR20	1.55 $\pm$ 0.01	Modérée
AJR18	1.54 $\pm$ 0.01	Modérée
AJR36	1.26 $\pm$ 0.01	Faible
AJL17	1.22 $\pm$ 0.01	Faible
AJR3	1.16 $\pm$ 0.01	Faible
AJR11	1.16 $\pm$ 0.01	Faible
AJR42	1.16 $\pm$ 0.02	Faible
AJR7	1.14 $\pm$ 0.01	Faible
AJR38	1.14 $\pm$ 0.01	Faible

Les valeurs moyennes de l'indice de solubilisation (IS) ont été calculées à partir de mesures effectuées en triplicat, sur la base du rapport entre le diamètre du halo plus celui de la colonie et le diamètre de la colonie sur le milieu gélosé de Pikovskaya. Les résultats reflètent des capacités variables de solubilisation du phosphate parmi les isolats, classées comme suit : faible (IS < 1,4) et modérée (1,4  $\leq$  IS  $\leq$  2,0).



**Figure.27** Solubilisation du phosphate par des isolats endophytes associés aux racines et aux feuilles d'espèces d'*Artemisia* collectées dans les régions du sud-est, du sud-ouest et du sud de l'Algérie, évaluée à l'aide du milieu gélosé de Pikovskaya.

## 7. Recherche d'enzymes extracellulaires chez les actinomycètes endophytes

Un total de **82 isolats endophytes** a été évalué pour la production de huit enzymes extracellulaires (amylase, protéase, cellulase, lipase, estérase, pectinase, gélatinase et xylanase). Parmi eux, vingt isolats (AJR3, AJR7, AJL9, AJL10, AJR11, AJL13, AJR14, AJL17, AJR18, AJR20, AJR35, AJR36, AJR37, AJR38, AJR41, AJR42, AL1, AL3, AR4 et AR5) ont produit l'ensemble des enzymes testées, tandis que d'autres, telles qu'AR6, AR9, AL22 et AL30, en ont produit sept. L'isolat AJR16 (*Nocardioopsis*) a produit toutes les enzymes sauf la gélatinase.

La majorité de ces isolats ont été identifiés comme appartenant au genre *Streptomyces*, à l'exception d'AJL17 et AJR37, classés dans le genre *Nonomuraea* (**Tableau.22, 23 et Figure. 28, 29**).

Pour l'ensemble des isolats la collection, l'amylase et la protéase ont été les plus fréquemment détectées, alors que la xylanase et la gélatinase sont les moins représentées.

Tous les isolats se sont révélés catalase-positifs (**Figure.30**), avec une majorité présentant une activité de niveau moyen pour la plupart des enzymes. Toutefois, certaines souches se sont démarquées par des activités particulièrement élevées ; la pectinase chez AL1, AL3, AR14 et AL23 (jusqu'à  $27,0 \pm 0,10$  mm), l'amylase chez AR14, AL30 et AR32 (jusqu'à  $27,5 \pm 0,10$  mm), la protéase chez AR15 ( $22,5 \pm 0,40$  mm) et la lipase chez AR9 ( $21,5 \pm 0,20$  mm).

Les isolats AL1, AL3, AR4 et AR5 ont présenté des profils enzymatiques complets pour l'ensemble des enzymes évaluées, avec des zones d'activité significativement supérieures pour la plupart des enzymes testées ( $p < 0,05$ , ANOVA à un facteur suivie du test post hoc de Tukey), confirmant leur potentiel biotechnologique en tant que producteurs prolifères d'enzymes hydrolytiques d'intérêt industriel.

**Tableau.22** Production d'enzymes extracellulaires par des actinobactéries endophytes associées aux racines et aux feuilles d'*Artemisia judaica* L. ssp. *sahariensis*, collectées à Oued Djerat (Djanet) et Djebel Ilamane (Tamanrasset), en Algérie.

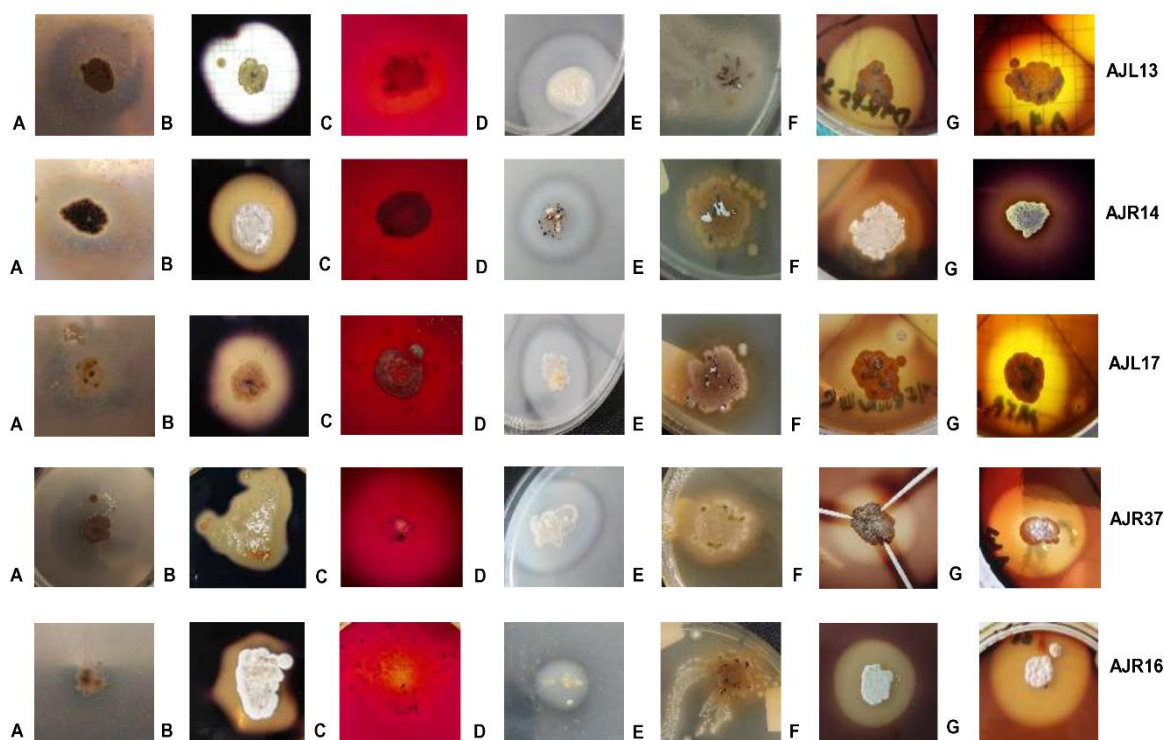
Isolats	Enzymes extracellulaires							
	Amylase	Cellulase	Protease	Lipase	Esterase	Pectinase	Xylanase	Gélatinase
AJL1	-	-	+++	+++	++	+++	+	+
AJR2	+++	-	+++	++	++	+	-	-
AJR3	+	+++	+	+++	+++	+++	+++	+
AJL4	+++	+++	+	++	++	++	+++	-
AJR5	+++	-	+++	++	++	+	-	-
AJL6	+++	-	+++	++	-	+	-	-
AJR7	+	++	+++	+++	++	+++	+++	+
AJR8	+	-	+++	+	-	+	-	-
AJL9	+++	+	+	+++	++	++	++	+
AJL10	+++	+	+	+++	++	++	++	+
AJR11	+	+	++	++	++	+++	+++	+
AJR12	++	-	+++	++	-	++	-	-
AJL13	+++	+++	+++	+++	++	+++	+++	+
AJR14	+++	+++	++	+++	++	++	+++	+
AJL15	+++	+	+++	+	-	+++	++	-
AJR16	+	+	++	++	++	+++	+++	-
AJL17	+++	+++	+++	+++	++	++	+++	+
AJR18	+++	+	+++	++	++	+++	++	+
AJR19	-	-	+++	+++	++	+	++	-
AJR20	+++	+	+++	+	++	+++	++	+
AJR21	-	++	++	++	-	+	++	-
AJR22	-	+	++	+++	-	+	++	-
AJR23	-	+	++	+++	-	+	++	-
AJR24	-	+	+++	++	-	++	++	-
AJL25	+++	+	+++	++	-	+	++	-
AJR26	-	+	++	++	-	++	++	-
AJR27	-	+++	++	++	-	++	++	-
AJR28	-	+	+++	++	-	++	++	-
AJR29	-	+	+++	++	-	++	++	-
AJL30	-	-	-	-	-	-	-	-
AJR31	+++	+	++	+++	+++	+++	+++	-
AJR32	++	+	+++	++	++	+++	++	-
AJR33	+	+	+	+	-	+++	++	-
AJR34	+++	+++	+++	+++	++	+	+++	-
AJR35	+++	+++	+++	+++	++	+++	+++	+
AJR36	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+
AJR37	++	+++	+++	+++	++	+++	+++	+
AJR38	+++	+++	++	++	+++	+++	+++	+
AJR39	+++	-	+++	+	-	+	-	-
AJL40	+++	-	+++	+	-	+	-	-
AJR41	+++	+++	+++	+++	+++	++	+++	+
AJR42	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+

La production extracellulaire d'enzymes la plus élevée : +++; la production extracellulaire d'enzymes moyenne : ++; la production extracellulaire d'enzymes la plus faible : +; absence de production extracellulaire d'enzymes : -.

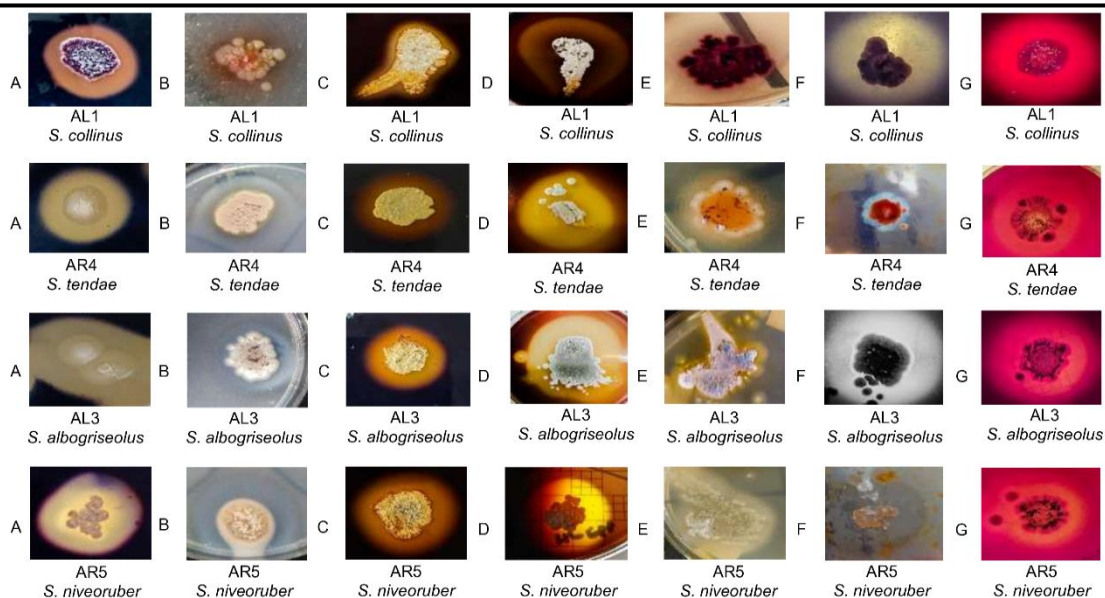
**Tableau.23** Production d'enzymes extracellulaires par des *Streptomyces* endophytes associés aux racines et aux feuilles d'espèces d'*Artemisia* collectées dans les régions du sud-est, du sud-ouest et du sud de l'Algérie

Enzymes extracellulaires										
Diamètres des halos pour l'enzyme extracellulaire (Moyenne ± Écart-type) (mm)*										
Isolats	Espèce la plus proche ■	Amylase	Cellulase	Protease	Lipase	Esterase	Pectinase	Xylanase	Gélatinase	Niveau d'activité
AL1	<i>S. collinus</i>	13.0± 0.10	19.0± 0.10	16.0± 0.10	05.0± 0.10	07.0± 0.30	27.0± 0.10	13.0± 0.03	+	élevée
AL2	<i>S. apricus</i>	16.0± 0.30	0	0	0	0	0	0	-	moyenne
AL3	<i>S. albobrisesolus</i>	11.0± 0.30	15.5± 0.10	14.5± 0.10	10.0± 0.30	05.0± 0.10	25.0± 0.40	10.0± 0.30	+	élevée
AR4	<i>S. tendae</i>	12.0± 0.10	12.0± 0.30	18.0± 0.30	11.0± 0.10	09.0± 0.40	18.0± 0.10	09.0± 0.20	+	moyenne
AR5	<i>S. niveoruber</i>	18.0± 0.10	10.5± 0.50	14.0± 0.20	15.0± 0.10	11.0± 0.10	12.0± 0.30	13.5± 0.40	+	moyenne
AR6	<i>S. xinghaiensis</i>	19.5± 0.20	09.0± 0.30	11.0± 0.10	12.0± 0.30	05.5± 0.50	12.5± 0.10	0	+	moyenne
AR7	<i>S. intermedius</i>	19.0± 0.10	0	17.0± 0.20	0	0	17.0± 0.20	0	-	moyenne
AR8	<i>S. rochei</i>	18.0± 0.30	0	15.0± 0.20	10.5± 0.10	0	08.0± 0.20	0	-	moyenne
AR9	<i>S. pilosus</i>	05.0± 0.20	08.5± 0.30	0	21.5± 0.20	11.0± 0.20	17.0± 0.30	17.0± 0.20	+	élevée
AL10	<i>S. rochei</i>	06.5± 0.20	0	14.0± 0.10	10.0± 0.20	0	14.0± 0.30	0	-	moyenne
AL11	<i>S. rochei</i>	15.0± 0.10	0	17.0± 0.30	06.5± 0.30	0	11.0± 0.20	0	-	moyenne
AR12	<i>S. drozdowiczii</i>	0	0	12.0± 0.20	05.5± 0.20	0	0	0	-	moyenne
AR13	<i>S. hyderabadensis</i>	0	0	15.0± 0.30	0	0	0	0	-	moyenne
AR14	<i>S. plumbiresistens</i>	27.5± 0.10	09.5± 0.40	0	0	13.0± 0.30	25.0± 0.10	08.0± 0.30	+	élevée
AR15	<i>S. ambofaciens</i>	12.5± 0.30	0	22.5± 0.40	11.0± 0.30	0	20.0± 0.30	0	-	élevée
AL16	<i>S. intermedius</i>	07.0± 0.20	0	12.0± 0.30	12.0± 0.20	0	18.0± 0.10	0	-	moyenne
AL17	<i>S. intermedius</i>	14.0± 0.50	0	0	0	0	0	0	-	moyenne
AL18	<i>S. pilosus</i>	0	0	09.5± 0.10	0	0	0	0	-	faible
AL19	<i>S. intermedius</i>	0	0	10.0± 0.40	0	0	0	0	-	faible
AL20	<i>S. albobrisesolus</i>	0	0	17.5± 0.20	0	0	15.0± 0.10	0	-	moyenne
AL21	<i>S. albobrisesolus</i>	15.5± 0.10	0	09.5± 0.10	08.0± 0.10	0	20.0± 0.50	0	-	moyenne
AL22	<i>S. intermedius</i>	20.5± 0.10	08.5± 0.10	10.0± 0.10	06.5± 0.10	06.0± 0.10	19.5± 0.10	0	+	moyenne
AL23	<i>S. intermedius</i>	0	0	10.5± 0.10	09.5± 0.40	0	24.5± 0.40	0	-	élevée
AL24	<i>S. qaidamensis</i>	10.0± 0.10	0	05.0± 0.20	0	0	17.0± 0.10	0	-	moyenne
AL25	<i>S. intermedius</i>	18.0± 0.30	0	10.0± 0.10	0	0	12.0± 0.30	0	-	moyenne
AR26	<i>S. intermedius</i>	17.0± 0.10	0	16.0± 0.10	13.0± 0.40	0	0	0	-	moyenne
AL27	<i>S. mutabilis</i>	13.0± 0.20	0	11.0± 0.30	09.0± 0.10	0	0	0	-	moyenne
AL28	<i>S. pluricologrescens</i>	08.0± 0.10	0	14.0± 0.10	06.0± 0.10	0	20.0± 0.10	0	-	moyenne
AL29	<i>S. mutabilis</i>	07.0± 0.30	0	14.5± 0.50	0	0	16.0± 0.10	0	-	moyenne
AL30	<i>S. albiaxialis</i>	25.0± 0.10	09.0± 0.10	10.0± 0.10	12.0± 0.30	18.0± 0.10	15.0± 0.30	0	+	élevée
AR31	<i>S. hyderabadensis</i>	0	12.5± 0.50	0	15.5± 0.10	09.0± 0.10	18.0± 0.50	0	+	moyenne
AR32	<i>S. tendae</i>	21.5± 0.10	0	0	0	0	0	0	-	élevée
AR33	<i>S. intermedius</i>	0	0	11.0± 0.10	0	0	0	0	-	moyenne
AR34	<i>S. tendae</i>	05.0± 0.10	10.5± 0.10	0	0	08.0± 0.30	15.0± 0.10	16.0± 0.10	+	moyenne
AR35	<i>S. pilosus</i>	19.0± 0.40	0	0	0	10.0± 0.10	18.0± 0.30	17.0± 0.20	+	moyenne
AR36	<i>S. intermedius</i>	14.0± 0.10	0	0	05.0± 0.10	0	0	0	+	moyenne
AR37	<i>S. tendae</i>	06.0± 0.30	11.0± 0.10	0	0	07.0± 0.20	0	18.5± 0.10	+	moyenne
AR38	<i>S. pilosus</i>	14.0± 0.10	10.0± 0.40	0	0	15.0± 0.10	20.0± 0.10	18.0± 0.10	+	moyenne
AR39	<i>S. tendae</i>	0	0	15.5± 0.10	0	0	0	0	-	moyenne
AR40	<i>S. radialis</i>	0	0	0	11.0± 0.10	0	0	0	-	moyenne

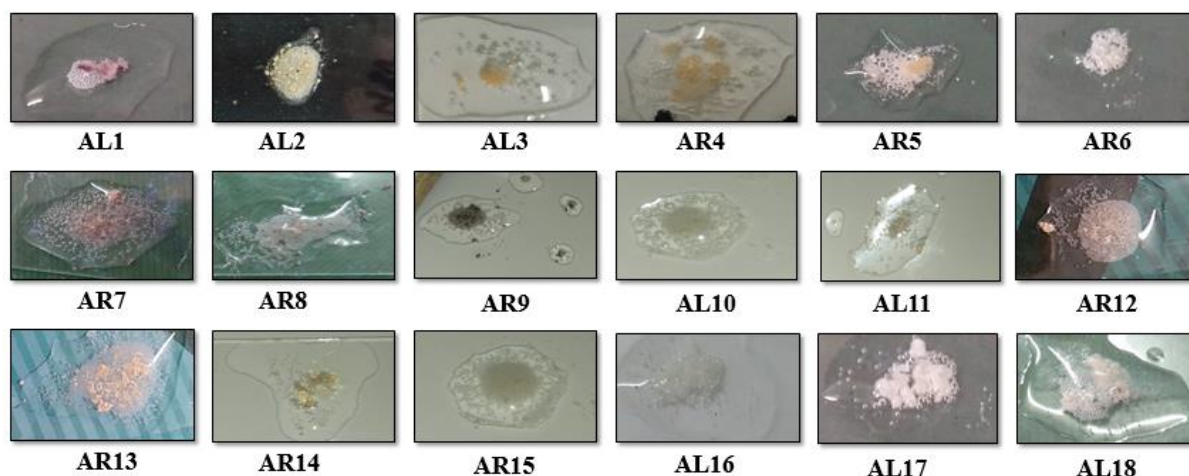
\* Diamètres des halos pour l'enzyme extracellulaire = Diamètre total (colonie + halo) – Diamètre de la colonie  
 Production de gélatinase : positive (+) ; absence de production de gélatinase : négative (-). ■ Selon les souches types répertoriées dans EzTaxon. Diamètres estimés des halos (mm) et niveaux correspondants d'activité enzymatique, classés comme faible (1–10 mm), moyenne (11–20 mm) et élevée (≥21 mm), conformément à Sreevidya et al. (2016).



**Figure. 28** Production d'enzymes extracellulaires par des isolats endophytes associés aux racines et aux feuilles d'*Artemisia judaica* L. ssp. *sahariensis*, collectées à Oued Djerat (Djanet) et Djebel Ilamane (Tamanrasset), Algérie. A : protéase ; B : amylase ; C : cellulase ; D : lipase ; E : estérase ; F : pectinase ; G : xylanase.



**Figure. 29** Production d'enzymes extracellulaires par des isolats endophytes de *Streptomyces* associés aux racines et aux feuilles d'espèces d'*Artemisia* collectées dans les régions du sud-est, du sud-ouest et du sud de l'Algérie. A : amylase ; B : lipase ; C : xylanase ; D : pectinase ; E : estérase ; F : protéase ; G : cellulase.



**Figure. 30** Production de catalase par quelques isolats endophytes

### 8. Caractéristiques biotechnologiques des actinobactéries endophytes

Les analyses statistiques ont confirmé des différences significatives entre les souches d'actinobactéries endophytes comparées aux témoins négatifs ( $p < 0,05$ ). Le test HSD de Tukey a en outre révélé une variabilité nette entre les isolats. Les souches de *Streptomyces* **AJR14**, **AJR35**, **AJL1**, **AJR41**, **AJR31** et **AR14** se classent parmi les solubilisateurs de phosphate les plus efficaces ( $IS \geq 1,7$ ), tandis que **AJR3**, **AJR7**, **AJR11**, **AJR38**, **AJR42** et **AR6** figurent parmi les moins actifs ( $IS \leq 1,2$ ).

Concernant la tolérance au sel, l'isolat **AR5** a montré une capacité de croissance à des concentrations de NaCl allant jusqu'à **20 %**, tandis que les isolats **AJR11**, **AJL15**, **AJR16**, **AJR27**, **AJR36**, **AJR38**, **AJR41**, **AR4** et **AL30** ont pu croître jusqu'à **15 %**. Les autres isolats étaient limités à 5–10 %.

L'ANOVA a également confirmé une variation significative de l'activité antibactérienne : **AJR5**, **AJL6**, **AJR39**, **AJR2**, **AJL40** et **AL28** ont produit les plus larges zones d'inhibition (jusqu'à  $40 \pm 0,5$  mm sur TSA), tandis que le milieu ISP2 a montré peu ou pas d'activité.

Ces résultats mettent en évidence la diversité fonctionnelle considérable des isolats et soulignent le potentiel biotechnologique de certaines souches pour des applications agricoles et antimicrobiennes.

## **DISCUSSION**

Cette étude met en évidence la diversité et le potentiel biotechnologique des actinobactéries endophytes associées au genre *Artemisia*, dont plusieurs souches présentent des activités antibactériennes et enzymatiques remarquables. Elle étend les travaux antérieurs en intégrant des isolats issus d'habitats encore peu explorés, tels que Sebkhah-Ezzemoul, Djebel Bou Arif, Djebel Arris, Oued Djerat, Djebel Ilamane, Djebel Aïssa, Al Mansourah et El Hamel. Caractérisées par des climats semi-arides et arides, ces régions demeuraient largement inexplorées sur le plan de leur diversité microbienne. Nos résultats soulignent ainsi le rôle de ces écosystèmes comme réservoirs prometteurs d'actinobactéries endophytes dotées d'un intérêt pharmaceutique et biotechnologique.

Les recherches antérieures se sont concentrées sur *Artemisia herba-alba* Asso collectée dans le sud-est de l'Algérie, notamment à Batna, Biskra et Ouled Djellal (**Djemouai et al. 2024**). D'autres études ont signalé la présence de *Streptomyces* associés à *Artemisia annua* en Chine (**Li et al. 2013**) et à *Artemisia herba-alba* en Égypte (**El-Shatoury et al. 2022**), ce qui souligne la large distribution géographique de ce genre au sein du microbiome d'*Artemisia*.

Des études supplémentaires ont rapporté la présence de *Streptomyces* dans la rhizosphère d'*Artemisia herba-alba* et d'autres plantes médicinales des zones arides d'Algérie (**Djemouai et al. 2022b** ; **Aouar et al. 2012**).

Au total, 82 souches d'actinobactéries endophytes ont été isolées à partir des racines et des feuilles d'espèces d'*Artemisia* en utilisant quatre milieux d'isolement différents, dont 52 issues des racines et 30 des feuilles. Cette prédominance des isolats d'origine racinaire est en accord avec des travaux antérieurs montrant que les actinobactéries sont le plus souvent récupérées à partir des racines, suivies des tiges puis des feuilles (**Qin et al. 2009** ; **Gangwar et al. 2014**). Elle reflète également la tendance générale à une diminution de la diversité microbienne du sol vers les tissus internes des plantes, en raison de la réduction progressive du réservoir microbien et de l'accroissement de la sélectivité de l'hôte (**Edwards et al. 2015** ; **Tkacz et al. 2015** ; **Compant et al. 2021** ; **Wang et al. 2023**). Ce schéma reflète le rôle de l'origine tellurique des actinobactéries, qui favorise leur interaction avec les racines et leur pénétration dans l'endosphère pour y établir des associations bénéfiques, tandis que les barrières internes de la plante participent activement au filtrage de la colonisation microbienne (**Tkacz et al. 2015** ; **Compant et al. 2021**).

La composition des milieux de culture a joué un rôle déterminant dans la diversité et l'abondance des actinobactéries endophytes isolées. Les formulations enrichies (FSA, FAA, MPA et TSB), supplémentées en extraits de plantes et en phosphate naturel afin de reproduire les environnements associés aux végétaux, ont favorisé l'isolement de divers taxons au-delà des *Streptomyces*. Cette stratégie, déjà démontrée efficace pour les plantes médicinales et désertiques (**El-Shatoury et al. 2022** ; **Passari et al. 2017** ; **Wang et al. 2023** ; **Tiwari et Gupta, 2012**), a permis l'isolement de genres rares tels que *Micromonospora*, *Nonomuraea*, *Nocardopsis* et *Gordonia*, soulignant son intérêt pour la capture d'une plus grande diversité microbienne. Le taux élevé de récupération d'actinobactéries endophytes sur le milieu FSA reflète probablement sa composition à base de farine de soja, qui favorise les taxons à croissance lente tout en limitant la prolifération des micro-organismes à croissance rapide (**Koech et al. 2025**).

Parmi les 82 isolats obtenus, 36 proviennent de Tamanrasset. Ce résultat suggère que les conditions édapho-climatiques rigoureuses de cette région — caractérisées par des sols

riches en minéraux, une forte aridité et des amplitudes thermiques extrêmes — favorisent la sélection d'actinobactéries tolérantes au stress et dotées d'une grande polyvalence métabolique. Des observations similaires ont été rapportées dans d'autres zones hyperarides, où les actinobactéries jouent un rôle clé dans l'amélioration de la résilience des plantes face aux contraintes environnementales (**González et al. 2023**). Les isolements et identifications antérieurs de nouvelles espèces à partir d'échantillons provenant de Tamanrasset renforcent cette observation (**Boubetra et al. 2013 ; Boudjelal et al. 2015 ; Bouras et al. 2015 ; Lahoum et al. 2016**). Le milieu FSA s'est révélé performant sur l'ensemble des huit sites échantillonnés, ce qui pourrait être lié aux caractéristiques pédologiques et à l'altitude locale. De telles corrélations entre la sélectivité des milieux de culture et les conditions d'habitat ont déjà été documentées dans la littérature (**Qin et al. 2011 ; Passari et al. 2017 ; Koech et al. 2025**).

Les analyses morphologiques et moléculaires ont permis d'identifier cinq genres d'actinobactéries endophytes à partir des racines et des feuilles d'*Artemisia* spp, avec une prédominance de *Streptomyces* (85.37 %), confirmant son adaptabilité aux environnements arides (**Djemouai et al. 2024 ; Qin et al. 2009 ; González et al. 2023 ; Li et al. 2012 ; Djemouai et al. 2022a, b ; Worsley et al. 2020**). Les autres genres étaient *Micromonospora* (8.54 %), *Nonomuraea* (3.66 %), *Gordonia* (1.22 %) et *Nocardiopsis* (1.22 %), dont les caractéristiques morphologiques et moléculaires correspondaient aux descriptions connues (**Bouras et al. 2015 ; Parte et al. 2012 ; Li et al. 2011**). *Nocardiopsis* a été isolé pour la première fois chez *Artemisia judaica* L. spp. *saharensis*, suggérant une association plante–microorganisme potentiellement nouvelle. *Micromonospora* a été détecté dans les deux régions de Tamanrasset et Djanet, tandis que *Nonomuraea* et *Gordonia* étaient limitées à Tamanrasset, et *Nocardiopsis* à Djanet. Ces répartitions semblent influencées par des processus de filtrage environnemental ou par des interactions entre le génotype de l'hôte et son microbiome.

L'analyse phylogénétique des séquences du gène 16S rRNA a révélé que les isolats étudiés sont étroitement apparentés à des espèces connues de *Micromonospora*, *Nonomuraea*, *Gordonia* et *Streptomyces*, tout en montrant une divergence notable chez plusieurs souches. En particulier, les isolats AL18, AR35, AR38, AR13, AR37, AR32 et AR39 se regroupent dans une branche distincte de l'arbre phylogénétique (**Figure 23**), suggérant l'existence de nouveaux taxons au sein du genre. De même, l'isolat AJR42, isolée à Tamanrasset, forme une branche séparée avec une similarité inférieure à 98,65 % de l'ARNr 16S (**Kim et al. 2014**) par rapport à *Streptomyces pilosus* NBRC 12807<sup>T</sup>, indiquant une possible divergence au niveau spécifique. Compte tenu des limites de l'ARNr 16S pour la délimitation des espèces, des analyses complémentaires telles que le séquençage génomique complet, l'Average Nucleotide Identity (ANI) et l'hybridation ADN–ADN numérique (dDDH) sont nécessaires pour confirmer leur statut taxonomique et explorer leur potentiel biosynthétique (**Chun et al. 2018 ; Nouioui et al. 2018**). Ces résultats mettent en évidence la diversité phylogénétique des actinobactéries endophytes associées à *Artemisia* spp et soulignent l'importance d'une approche taxonomique intégrative.

Des recherches récentes se sont de plus en plus orientées vers la découverte de nouveaux taxons microbiens provenant d'environnements extrêmes et encore peu explorés (**Mohamed et al. 2017**). Le désert algérien, caractérisé par son climat chaud et aride ainsi que par ses conditions écologiques particulières, constitue un cadre prometteur pour la prospection microbienne. Ces dernières années, plusieurs études ont mis en évidence la richesse de la

diversité des actinomycètes présents dans les zones arides d'Algérie. Notamment, 29 nouvelles espèces d'actinobactéries ont été isolées à partir de sols sahariens et de palmeraies, renforçant la réputation du désert comme réservoir de biodiversité microbienne encore inexploitée. Parmi ces nouveaux taxons figurent *Saccharothrix tamanrassetensis* (Boubetra et al. 2015), *Mzabimyces algeriensis* (Saker et al. 2014), *Saccharothrix hoggarensis* (Boubetra et al. 2013), *Saccharothrix ghardaiensis* (Bouznada et al. 2017) et *Actinopolyspora saharensis* (Meklat et al. 2013). Dans leur ensemble, ces découvertes soulignent le potentiel des biomes désertiques algériens comme sources de nouveaux actinomycètes dotés de caractéristiques physiologiques uniques.

Plusieurs actinobactéries endophytes isolées d'*Artemisia* dans des environnements extrêmes d'Algérie ont montré une tolérance remarquable aux conditions abiotiques. Ainsi, les souches de *Streptomyces* AR4, AL30, AJR36, AJR38, AJR27, AJR41, AJR11 et AJL15 ont toléré jusqu'à 15 % de NaCl, dépassant les précédents rapports algériens (Djemouai et al. 2022b ; Belghit et al. 2021), tandis que la souche AJR16 (*Nocardiopsis*) a présenté une tolérance à 15 % de NaCl, en accord avec *Nocardiopsis algeriensis* isolée de sols sahariens (Bouras et al. 2015). L'isolat AR5, isolé d'*Artemisia herba-alba* Asso à Garaet Ezzemoul (Sebkha), a présenté une croissance à des concentrations de NaCl allant jusqu'à 20 %, alors que les isolats de *Streptomyces* précédemment rapportés dans cette région ne toléraient que 10 % (Smati et Kitouni 2019). Ces caractéristiques traduisent une forte adaptation aux conditions arides et salines, probablement façonnée par la niche endophytique et les pressions abiotiques locales (Xie et al. 2021).

Les actinobactéries désertiques telles que *Streptomyces* et *Nocardiopsis* possèdent souvent des traits fonctionnels bénéfiques, notamment l'osmoprotection, la production de sidérophores et la solubilisation du phosphate, qui favorisent la survie des plantes hôtes dans des environnements hostiles (Xie et al. 2021 ; Nithya et al. 2018 ; Bahamdain et al. 2025 ; Liu et al. 2022). Dans ce contexte, les isolats AJR16, AJR41 et particulièrement AR5 se distinguent par leur potentiel écologique et biotechnologique, leurs métabolites halotolérants et thermostables représentant des candidats prometteurs pour des applications pharmaceutiques ou industrielles, ainsi que pour des investigations génomiques approfondies sur les mécanismes de tolérance au stress salin et thermique.

De même, les souches de *Streptomyces* AL1, AL3, AL22, AJL15 et AL30, isolées à partir de feuilles d'espèces d'*Artemisia* collectées dans des habitats de type sebkha et arides, ont également montré une halotolérance modérée. Les isolats AJL1, AJL4, AJL10, AL1, AL3 et AL22 ont présenté une croissance en présence de concentrations allant jusqu'à 10 % de NaCl, tandis que AL30 et AJL15 ont toléré jusqu'à 15 %. Ces niveaux sont comparables à ceux observés chez des souches halotolérantes précédemment rapportées, telles que *Streptomyces* sp. BKS17, isolée de la rhizosphère d'*Artemisia herba-alba* en zone aride, qui a toléré jusqu'à 10 % de NaCl (Djemouai et al. 2022b). De même, la souche *Streptomyces* LG10, récupérée dans l'Atlas saharien inexploité, a pu tolérer 10 % de NaCl mais n'a pas montré de croissance au-delà de 15 % (Belghit et al. 2021). La tolérance accrue au sel observée chez nos isolats, en particulier ceux provenant de tissus foliaires, renforce l'idée que les interactions plante-endophyte et l'origine écologique influencent de manière significative l'adaptation au stress salin chez *Streptomyces*.

La souche *Streptomyces* sp. AR6, isolée des racines d'*Artemisia herba-alba* Asso en

zone aride, a montré une tolérance à des concentrations de NaCl allant jusqu'à 10 % et une capacité de croissance sur une large plage de températures, de 10 à 50 °C. Ces caractéristiques physiologiques sont cohérentes avec celles de *Streptomyces* sp. BT61, rapportée par **Djemouai et al. (2024)**, également isolée des racines d'*Artemisia herba-alba* en zone aride. Cependant, BT61 n'a toléré que jusqu'à 9 % de NaCl et a présenté une croissance uniquement entre 20 et 40 °C. La plus large amplitude thermique et la tolérance saline égale ou supérieure d'AR6 suggèrent une meilleure capacité d'adaptation au stress environnemental, probablement liée à son mode de vie endophytique.

Parmi les actinobactéries endophytes isolées d'*Artemisia* spp. 62 souches appartenant principalement aux genres *Streptomyces*, *Micromonospora*, *Nonomuraea* et *Nocardiopsis* ont montré une activité antibactérienne vis-à-vis les pathogènes de référence (*Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* et *Salmonella typhimurium*). Le genre *Streptomyces* était dominant avec 53 isolats actifs, confirmant son rôle reconnu comme source prolifique de métabolites bioactifs (**Zin et al. 2007 ; Mingma et al. 2014 ; Baltz et al. 2006**). Sept souches de *Micromonospora* (AJR2, AJR5, AJL6, AJR8, AJR12, AJR39 et AJL40) se sont également distinguées par une activité à large spectre, soulignant leur potentiel biotechnologique. Ces résultats, cohérents avec des travaux antérieurs sur le pouvoir antimicrobien des actinobactéries endophytes (**Graner et al. 2003 ; Verma et al. 2009 ; Li et al. 2008 ; Strobel et al. 2004**), apportent toutefois une contribution nouvelle en identifiant plusieurs isolats dotés d'une activité particulièrement étendue. En particulier, les souches **AR26** et **AR39**, capables d'inhiber simultanément les quatre pathogènes testés, apparaissent comme des candidates prometteuses pour la découverte de nouveaux agents antimicrobiens.

L'isolat **AR15** a montré une activité puissante vis-à-vis *E. coli*, produisant un halo d'inhibition de  $30 \pm 0,1$  mm. Ce niveau d'activité est comparable à celui de *Streptomyces* WAB9, précédemment isolé de sols sahariens, qui a généré un halo de 35 mm (**Yekkour et al. 2015**). En revanche, les isolats de *Streptomyces* provenant de la rhizosphère d'*Artemisia herba-alba* rapportés par **Djemouai et al. (2022a)** n'ont montré aucune activité vis-à-vis *E. coli*. De même, les isolats **AL19**, **AL30**, **AR34** et **AR35** ont présenté une forte inhibition de *P. aeruginosa* avec des zones respectives de  $36 \pm 0,1$  mm,  $30 \pm 0,2$  mm,  $30 \pm 0,1$  mm et  $25 \pm 0,2$  mm. Notamment, **AJR23** a produit une zone d'inhibition de 36 mm vis-à-vis *P. aeruginosa*. Ces résultats sont comparables, voire supérieurs, à la zone de 29 mm rapportée pour WAB9 par **Yekkour et al. (2015)**, et contrastent également avec les souches rhizosphériques inactives décrites par **Djemouai et al. (2022a)**.

Concernant *S. aureus*, l'isolat **AL28** a présenté une activité antibactérienne remarquable, produisant un halo d'inhibition de  $40 \pm 0,5$  mm. Cette valeur dépasse celles rapportées pour BT84 (24,5 mm ; **Djemouai et al. 2024**) et AT37 (32 mm ; **Driche et al. 2017**), mettant en évidence **AL28** comme une souche exceptionnellement active. **Par ailleurs, AJR7 s'est distinguée en inhibant l'ensemble des pathogènes testés sur les deux milieux TSA et ISP2.** Ces résultats renforcent l'idée bien établie selon laquelle le genre *Streptomyces* constitue une source prolifique de métabolites secondaires bioactifs (**Čihák et al. 2017 ; Al-Ansaria et al. 2019**). Ils soulignent également le potentiel encore sous-exploité des *Streptomyces* endophytes, en particulier ceux associés aux espèces d'*Artemisia* dans des environnements extrêmes, en tant qu'alternatives prometteuses aux souches d'origine tellurique pour la découverte de nouveaux agents antimicrobiens.

L'activité antibactérienne de nos souches de *Micromonospora* contraste avec les études antérieures (Ali et al. 2022), ce qui pourrait s'expliquer par la pression de sélection propre à l'environnement saharien (Guevara-Luna et al. 2024), par les effets de la plante hôte influençant la sélection des endophytes et la production de métabolites (Singha et al. 2021 ; Gao et al. 2025), ou encore par des différences méthodologiques dans les approches d'isolement et de criblage (Ouchari et al. 2018 ; Waithaka, 2022). La diversité génomique, incluant la présence de clusters géniques **PKS** et **NRPS**, pourrait également rendre compte de cette variabilité (Komaki et al. 2016). Les isolats **AJR19** (*Nonomuraea*) et **AJR16** (*Nocardiopsis*) ont montré une activité antibactérienne à large spectre, contrairement aux rapports précédents où des souches apparentées n'étaient actives que contre *S. aureus* ou *S. typhimurium* (Sabu et al. 2017 ; Li et al. 2012).

Nos résultats soulignent l'importance du milieu de culture dans la mise en évidence de l'activité antibactérienne des actinobactéries endophytes. Le milieu TSA a produit des zones d'inhibition plus nettes, probablement en favorisant une croissance équilibrée à la fois des actinobactéries et des pathogènes. Plusieurs isolats (AJR3, AJR11, AJR14, AJR18, AJR20, AJR35, AJR41 et *Micromonospora* AJL40) n'ont montré une activité que sur TSA, ce qui suggère que le milieu ISP2 ne favorise pas la production de composés bioactifs. Ces résultats confirment l'influence de la composition du milieu sur le criblage antimicrobien (Qin et al. 2009 ; Passari et al. 2017 ; Golinska et al. 2015).

Par ailleurs, plusieurs isolats, notamment *Streptomyces* **AJR23**, *Micromonospora* (**AJR2**, **AJR5**, **AJL6**) et *Nocardiopsis* **AJR16**, ont présenté des valeurs de CMI (4–8 µg/mL), indiquant un fort potentiel antibactérien comparable à celui d'actinobactéries bioactives issues de sources marines ou associées aux plantes (Girão et al. 2019).

Plusieurs souches appartenant à *Streptomyces* (AL28, AJL1, AJR3, AJR7, AJR23), *Micromonospora* (AJR2, AJR5, AJR8, AJL6, AJL40, AJR39) et *Nocardiopsis* (AJR16) ont présenté une activité antibactérienne forte à modérée, certaines affichant des CMI comprises entre 4 et 8 µg/mL vis-à-vis *S. aureus*, *E. coli* et *P. aeruginosa*. Les isolats AL28 et AJR23 (*Streptomyces*) se distinguent particulièrement, avec les plus grandes zones d'inhibition (40 et 36 mm) vis-à-vis *P. aeruginosa* et *S. aureus*, correspondant à une CMI minimale de 4 µg/mL.

Ces résultats mettent en évidence la promesse thérapeutique des endophytes provenant de plantes médicinales désertiques et confirment leur pertinence dans la recherche de nouveaux antimicrobiens (Azman et al. 2015).

Les profils de sensibilité aux antibiotiques des isolats endophytes ont révélé que toutes les souches étaient résistantes à l'acide nalidixique, au cotrimoxazole, à la polymyxine, au céfixime, à la ceftazidime, à la céfalexine, à la céfotaxime, à la céfazoline, à l'oxacilline, à la pénicilline G, à l'ampicilline et à l'amoxicilline. Ces caractéristiques de résistance sont cohérentes avec les résultats de Djemouai et al. (2022b), qui a rapporté des profils similaires chez des souches de *Streptomyces* isolées de la rhizosphère d'*Artemisia herba-alba* Asso dans la province de Biskra, au sud-est de l'Algérie. De même, les travaux de Passari et al. (2015, 2017), ont montré que les *Streptomyces* endophytes associés aux plantes médicinales présentent fréquemment une résistance à la pénicilline G, à l'ampicilline et à l'acide nalidixique.

Dans notre étude, cinq isolats (**AR8**, **AL18**, **AL22**, **AR34** et **AR40**) se sont révélés résistants à la vancomycine, et deux isolats (**AL22** et **AL30**) étaient résistants à la gentamicine. Ces résultats sont comparables à ceux de Passari et al. (2017), qui ont observé une résistance

à la gentamicine et à la vancomycine chez des *Streptomyces* endophytes isolés de plantes médicinales. De telles similarités dans les profils de résistance à travers différentes origines géographiques suggèrent que certaines souches de *Streptomyces* pourraient partager des mécanismes de résistance conservés, possiblement liés aux pressions environnementales ou à leur lignée génétique. Fait intéressant, les isolats **AL28**, **AL30** et **AL37** se sont montrés résistants à la streptomycine, alors que la souche rhizosphérique rapportée par **Djemouai et al. (2022b)** y était sensible. Néanmoins, la résistance à la streptomycine a déjà été documentée chez plusieurs *Streptomyces* endophytes associés aux plantes médicinales (**Passari et al. 2015, 2017**), ce qui illustre encore la variabilité et l'adaptabilité de ces organismes dans différents niches écologiques.

Le phosphore est un nutriment essentiel au développement des plantes, et sa faible biodisponibilité dans les sols arides et pauvres en nutriments constitue un défi agricole majeur. Dans cette étude, 25 souches d'actinobactéries endophytes, incluant des *Streptomyces* ainsi que l'isolat de *Nonomuraea* **AJL17** ont montré une activité de solubilisation du phosphate, mise en évidence par des zones claires autour des colonies cultivées sur le milieu de Pikovskaya. Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par **Djemouai et al. (2022a, b)**, qui ont observé des caractéristiques similaires chez des souches de *Streptomyces* isolées de la rhizosphère d'*Artemisia herba-alba* dans des régions semi-arides et arides d'Algérie, de sols désertiques marocains et d'autres environnements (**Passari et al. 2015 ; Bashan et al. 2013 ; Hamdali et al. 2008**).

En particulier, les isolats **AJL1**, **AJR14**, **AJR18**, **AJR20**, **AJR31**, **AJR32**, **AJR35**, **AJR41**, **AR14**, **AR31**, **AR37**, **AL1**, **AR5** et **AR4** ont présenté une solubilisation modérée du phosphate, avec des indices de solubilisation (**SI**) compris entre **1,41** et **2,00**. Cette aptitude à mobiliser le phosphore dans des conditions de carence nutritionnelle souligne la polyvalence fonctionnelle des actinomycètes endophytes, notamment dans des environnements extrêmes où le cycle des nutriments est crucial pour la survie des plantes. En mobilisant le phosphate insoluble, ces souches apparaissent prometteuses en tant que **bioinoculants** et **biofertilisants** pour promouvoir une agriculture durable dans les zones arides affectées par la dégradation des sols et la salinité (**Soumare et al. 2021 ; Iftikhar et al. 2023**). Une validation supplémentaire en conditions de serre et de champ est toutefois recommandée.

Plusieurs souches actinobactériennes endophytes ont présenté une large activité enzymatique extracellulaire, incluant l'amylase, la protéase, la cellulase, la lipase, l'estérase, la pectinase, la gélatinase et la xylanase. Dix-huit isolats, principalement affiliés au genre *Streptomyces* (**AJR3**, **AJR7**, **AJL9**, **AJL10**, **AJR11**, **AJL13**, **AJR14**, **AJR18**, **AJR20**, **AJR35**, **AJR36**, **AJR38**, **AJR41**, **AJR42**, **AL1**, **AL3**, **AR4** et **AR5**), ont produit l'ensemble des enzymes testées, tandis que *Nonomuraea* (**AJL17**, **AJR37**) et *Nocardioopsis* (**AJR16**) ont également révélé une activité enzymatique étendue. Ces résultats corroborent en partie ceux de **Djemouai et al. (2024)**, qui ont montré que des souches de *Streptomyces* endophytes issues des racines d'*Artemisia herba-alba* dans les zones arides d'Algérie étaient capables de produire de l'amylase, de la protéase, de la cellulase, de l'estérase et de la pectinase. Toutefois, les travaux antérieurs sur des *Streptomyces* associés à *A. herba-alba* dans des habitats similaires n'avaient pas signalé d'activités xylanase ou gélatinase. De manière intéressante, une étude menée en Égypte a révélé que des souches de *Streptomyces* isolées de sols arides produisaient de xylanase (**Swelam et al. 2024**), renforçant ainsi le potentiel enzymatique des actinomycètes adaptés aux

environnements extrêmes.

Par ailleurs, certains isolats de notre étude, notamment AL1, AL3, AL30, AR9, AR14, AR15, AR23 et AR32, ont montré une activité particulièrement élevée pour un ou plusieurs substrats, avec des diamètres de halo supérieurs ou égaux à 21 mm. Ces souches se distinguent par des profils enzymatiques remarquables, en particulier pour la production d'amylase, de pectinase, de protéase et de lipase. Ces enzymes, largement exploitées en agriculture et en biotechnologie, jouent un rôle clé dans la promotion de la croissance végétale, la lutte contre les pathogènes et de nombreuses applications industrielles (Sreevidya et al. 2016). Leur présence parmi les endophytes associés à *Artemisia* suggère un fort potentiel d'exploitation dans le développement de biofertilisants, d'agents de biocontrôle ou de systèmes de production enzymatique adaptés aux conditions arides.

Bien que les résultats actuels révèlent le potentiel métabolique des souches endophytes de *Streptomyces*, l'étude demeure limitée aux tests *in vitro* d'activités enzymatiques et antibactériennes, ainsi qu'à l'identification phylogénétique basée sur le gène 16S rRNA. Des recherches complémentaires sont nécessaires afin d'explorer pleinement leurs capacités biosynthétiques. Celles-ci devraient inclure le séquençage génomique complet pour l'identification des clusters de gènes codant les métabolites secondaires, ainsi que l'isolement et la caractérisation structurale des composés bioactifs. Ces étapes sont essentielles pour évaluer la pertinence thérapeutique et la viabilité industrielle de ces souches.

La diversité enzymatique des actinobactéries endophytes constitue la base de leur potentiel biotechnologique et agricole. Des enzymes telles que les cellulases et les protéases jouent un rôle clé dans la conversion de la biomasse et la bioremédiation (Prayogo et al. 2020 ; Nargotra et al. 2023), tout en renforçant la tolérance des plantes aux stress abiotiques et en soutenant leur utilisation comme bio-inoculants dans les régions arides (Ebrahimi-Zarandi et al. 2023 ; Alotaibiet al. 2022). Les recherches futures devraient donc viser à purifier et optimiser ces enzymes dans des conditions industrielles.

Les actinobactéries issues des environnements désertiques se démarquent particulièrement par leurs aptitudes à produire des enzymes thermostables ou halotolérantes, ouvrant la voie à des applications durables telles que la production de biocarburants, la bioremédiation, ainsi que des usages dans les industries alimentaire et pharmaceutique. Ces résultats enrichissent ainsi les connaissances sur les actinobactéries endophytes associées aux milieux arides et soulignent leur potentiel en tant que sources de métabolites bioactifs et de bio-inoculants agricoles adaptés aux conditions extrêmes.

Enfin, bien que ce travail apporte des connaissances fondamentales sur la bioactivité des souches d'actinobactéries endophytes issues d'espèces d'*Artemisia* dans des environnements extrêmes d'Algérie, une validation dans des conditions réelles demeure nécessaire. Les études futures devraient évaluer les performances des isolats prometteurs *in planta*, à la fois en conditions contrôlées et en champ, afin de confirmer leurs rôles écologiques et leur applicabilité en agriculture durable, en biocontrôle ou en développement pharmaceutique.

## **CONCLUSION ET PERSPECTIVES**

Cette étude a permis d'isoler et de caractériser des actinobactéries endophytes associées à différentes espèces d'*Artemisia* (*Artemisia judaica* L. ssp. *sahariensis*, *Artemisia herba alba* Asso et *Artemisia campestris*), collectées dans des écosystèmes extrêmes d'Algérie, notamment le désert, sebkha et les zones montagneuses (Oued Djerat, Djebel Ilamane, Djebel Aïssa, Al Mansourah, El Hamel, Sebkha-Ezzemoul, Djebel Bou Arif et Djebel Arris). Cinq genres ont été identifiés : ***Streptomyces***, ***Micromonospora***, ***Nonomuraea***, ***Gordonia*** et ***Nocardiopsis***, le genre *Streptomyces* étant le plus représenté, confirmant sa forte adaptation aux milieux arides caractérisés par une salinité élevée et des températures extrêmes.

Le genre *Streptomyces* est reconnu comme un producteur majeur de métabolites bioactifs (antibactériens, antifongiques, anticancéreux, etc.). Dans ce travail, une première approche a consisté à étudier la diversité des actinomycètes présents dans différents organes des plants d'*Artemisia* spp., suivie d'une caractérisation phénotypique et génotypique de quarante isolats. Dans un second temps, leurs propriétés métaboliques ont été évaluées par criblage afin d'identifier les souches productrices de biomolécules d'intérêt.

Cette étude nous a permis d'évaluer la biodiversité des actinomycètes endophytes isolés des feuilles et des racines d'*Artemisia judaica* L ssp. *sahariensis*, *Artemisia herba alba* Asso et *Artemisia campestris*.

Les plantes d'*Artemisia* spp. ont été récoltées dans différents biotopes de l'Est et du Sud de l'Algérie ; Oued Djerat, Djebel Ilamane, Djebel Aïssa, Al Mansourah et El Hamel, Sebkha-Ezzemoul, Djebel Bou Arif et Djebel Arris.

La présente étude constitue l'un des premiers travaux sur la biodiversité des actinobactéries endophytes d'*Artemisia* spp. en Algérie.

Le protocole d'isolement et de caractérisation des actinomycètes est basé sur l'utilisation de milieux spécifiques tels que FSA, FAA, MPA, TSB, ISP1, ISP2, ISP4, ISP5 et ISP7.

L'analyse phylogénétique basée sur le gène 16S rRNA a montré que le genre *Streptomyces* est abondant chez les espèces d'*Artemisia* provenant de niches écologiques arides à forte salinité et dans des environnements extrêmement chauds, certains isolats (AL18, AR35, AR38, AR13, AR37, AR32 et AR39) formant une branche distincte, suggérant l'existence de nouveaux taxons au sein du genre *Streptomyces*. De même, la souche AJR42, isolée à Tamanrasset, forme une branche séparée, nécessitant des études génomiques complémentaires pour confirmer son statut taxonomique.

Les points pertinents de nos résultats sont l'activité enzymatique et l'activité antibactérienne significative des isolats.

Sur le plan fonctionnel, dix-huit isolats, principalement affiliés au genre *Streptomyces* (AJR3, AJR7, AJL9, AJL10, AJR11, AJL13, AJR14, AJR18, AJR20, AJR35, AJR36, AJR38, AJR41, AJR42, AL1, AL3, AR4 et AR5), ont produit l'ensemble des enzymes testées, tandis que *Nonomuraea* (AJL17, AJR37) et *Nocardiopsis* (AJR16) ont également révélé une activité enzymatique étendue. En particulier, les isolats AJL1, AJR14, AJR18, AJR20, AJR31, AJR32, AJR35, AJR41, AR14, AR31, AR37, AL1, AR5 et AR4 ont montré une solubilisation modérée du phosphate, avec des indices de solubilisation (SI) compris entre 1,41 et 2,00. Ces résultats confirment la polyvalence métabolique et la contribution des isolats à la fertilité des sols arides.

Cette étude montre aussi l'activité antibactérienne et le potentiel d'effet inhibiteur des isolats endophytes vis-à-vis de quatre bactéries pathogènes telles que *Staphylococcus aureus* (ATCC 29213), *Escherichia coli* (ATCC 25922), *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 29553) et *Salmonella typhimurium* (ATCC 14028).

L'analyse des résultats obtenus montre que les isolats endophytes ont une activité inhibitrice vis à vis les bactéries à Gram-positives et Gram-négatives.

Parmi ces isolats, plusieurs se sont distingués par de fortes activités antibactériennes, les isolats endophytes appartenant à *Streptomyces* (AL28, AJL1, AJR3, AJR7, AJR23), *Micromonospora* (AJR2, AJR5, AJR8, AJL6, AJL40, AJR39) et *Nocardioopsis* (AJR16) ont présenté une activité forte à modérée, avec certains affichant des CMI comprises entre 4 et 8 µg/mL vis-à-vis *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* et *Pseudomonas aeruginosa*. Les *Streptomyces* endophytes AL28 et AJR23 se distinguent particulièrement, avec les plus grandes zones d'inhibition (40 et 36 mm) vis-à-vis *P. aeruginosa* et *S. aureus*, correspondant à une CMI de 4 µg/mL. De plus, les isolats AR26 et AR39 ont montré une activité antimicrobienne à large spectre.

Par ailleurs, certaines souches se sont révélées résistantes à différents antibiotiques (vancomycine, gentamicine), tandis que l'isolat AR5 a montré une halotolérance exceptionnelle (croissance jusqu'à 20 % de NaCl). Ces résultats soulignent la robustesse métabolique et écologique des actinobactéries endophytes isolées et confirment que les environnements extrêmes d'Algérie constituent des réservoirs prometteurs de nouveaux taxons à fort intérêt biotechnologique.

La présence de souches métaboliquement polyvalentes, antibactériennes et résistantes aux stress environnementaux confirme que les habitats extrêmes algériens constituent des réservoirs prometteurs de nouveaux taxons d'actinobactéries à intérêt biotechnologique. Ces résultats ouvrent des perspectives d'applications thérapeutiques, agricoles et industrielles, en particulier dans la production de bioinoculants, d'enzymes thermostables ou halotolérantes, et de nouveaux antibiotiques.

Les résultats obtenus montrent que la bioprospection d'environnements inexplorés ou sous-explorés comme Sebkha, les montagnes et l'écosystème chaud saharien est une stratégie prometteuse pour découvrir de nouvelles molécules ayant des applications pharmaceutiques.

Les espèces d'*Artemisia* récoltées dans les montagnes, Sahara et Sebkha en Algérie sont probablement une source importante de nouveaux produits naturels bioactifs.

L'étude des actinomycètes endophytes ouvre de nouvelles voies de recherche dans les domaines de production de nouvelles molécules à usage thérapeutique.

Cette étude représente l'un des premiers travaux consacrés à la biodiversité des actinobactéries endophytes d'*Artemisia* spp. en Algérie. Elle met en évidence leur potentiel en tant que source de métabolites bioactifs et ouvre des perspectives dans les domaines thérapeutique, agricole et industriel, notamment pour la production de bioinoculants, d'enzymes thermostables ou halotolérantes et de nouveaux antibiotiques.

Afin de consolider ces résultats et d'explorer pleinement le potentiel des isolats, plusieurs axes de recherche sont proposés :

**1. Taxonomie et identification**

- Séquençage complet des génomes dans le but d'une meilleure caractérisation et identification des isolats.

**2. Caractérisation des métabolites**

- Recherche de production de métabolites à intérêt pharmaceutiques et industriels.

**3. Applications agronomiques**

- Recherches sur les interactions plantes / isolats.
- Évaluer leur rôle dans la promotion de la croissance des plantes et dans la lutte contre les pathogènes.

# **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- AbdelRazek MMM, Moussa AY, Elshanawany MM, Singab AN (2019) Comparative chemical and biological study of roots and aerial parts of *Halocnemum strobilaceum* growing wildly in Egypt. *J Pharm Sci Res* 11:3289-3296. <https://www.researchgate.net/publication/335972823>
- AbdelRazek MMM, Elissawy AM, Mostafa NM, Moussa AY, Elanany MA, Elshanawany MA, Singab ANB (2023) Chemical and biological review of endophytic fungi associated with *Morus* sp. (*Moraceae*) and in silico study of their antidiabetic potential. *Molecules* 28:1718. <https://doi.org/10.3390/molecules28041718>
- Abdelwahed NAM, Danial EN, El-Ahmady El-Naggar N, Mohamed AA (2014) Optimization of alkaline protease production by *Streptomyces ambofaciens* in free and immobilized form. *Am J Biochem Biotechnol* 10(1):1–13. <https://doi.org/10.3844/ajbbsp.2014.1.13>
- Abou-Elela GM, Ghanem NB (2005) Phenotypic characterization and numerical taxonomy of some actinomycetes strains isolated from Burullus Lake. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 31:125–144.
- Ahmed AA, Abou El-Ela M, Jakupovic J, Seif El-Din AA, Sabri N (1990) Eudesmanolides and other constituents from *Artemisia herba-alba*. *Phytochemistry* 29:3661–3663. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(90\)85297-S](https://doi.org/10.1016/0031-9422(90)85297-S)
- Aidoud A (1988) Les écosystèmes à Armoise blanche (*Artemisia herba-alba* Asso.) I: Caractères généraux. *Bulletin d'écologie terrestre (Biocénoses)* 3:1–15.
- Ait Assou S, Anissi J, Sendide K, El Hassouni M (2023) Diversity and antimicrobial activities of actinobacteria isolated from mining soils in Midelt Region, Morocco. *Scientific World Journal* 2023: 6106673. <https://doi.org/10.1155/2023/6106673>
- Ait Barka EA, Vatsa P, Sanchez L, Gaveau-Vaillant N, Jacquard C, Klenk HP, Clément C, Ouhdouch Y, van Wezel GP (2016) Taxonomy, physiology, and natural products of Actinobacteria. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 80:1–43.
- Akrout A, Chemli RC, Chrief, Hammami M (2001) Analysis of the essential oil of *Artemisia campestris* L. *Flavour Fragr. J.* 16:337–339.
- Akrout A, Gonzalez LA, El Jani HJ, Madrid PC (2011) Antioxidant and antitumor activities of *Artemisia campestris* and *Thymelaea hirsuta* from southern Tunisia. *Food Chem. Toxicol.* 49:342–347.
- Al-Agamy MH, Alhuzani MR, Kelany MS, Hamed MM (2021) Production and partial characterization of  $\alpha$ -amylase enzyme from marine actinomycetes. *Biomed Res Int* 5289848. <https://doi.org/10.1155/2021/5289848>
- Alam K, Mazumder A, Sikdar S, Zhao Y-M, Hao J, Song C, Wang Y, Sarkar R, Islam S, Zhang Y, Li A (2022) Streptomyces: the biofactory of secondary metabolites. *Front Microbiol* 13:968053. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.968053> .

Alanzi A, Elhawary EA, Ashour ML, Moussa AY (2023) *Aspergillus* co-cultures: a recent insight into their secondary metabolites and microbial interactions. Arch Pharm Res 46:273-298. <https://doi.org/10.1007/s12272-023-01442-5>

Al-Ansaria M, Alkubaisia N, Vijayaragavanb P, Muruganc K (2019) Antimicrobial potential of *Streptomyces* sp. to the Gram positive and Gram negative pathogens. J Infect Public Health 12:861-866. <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2019.05.016>

Ali-Delille L (2010) Les plantes médicinales d'Algérie. 2<sup>ème</sup> Edition Berti Alger.

Ali AR, Bahrami Y, Kakaei E, Mohammadzadeh S, Bouk S, Jalilian N (2022) Isolation and identification of endophytic actinobacteria from *Citrullus colocynthis* (L.) Schrad and their antibacterial properties. Microb Cell Fact 21:206. <https://doi.org/10.1186/s12934-022-01936-9>

Alotaibi F, St-Arnaud M, Hijri M (2022) In-depth characterization of plant growth promotion potentials of selected alkanes-degrading plant growth-promoting bacterial isolates. Front Microbiol 13:863702. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.863702>

Aly MM, Tork S, Al-Garni SM, Kabli SA (2012) Production, characterization and immobilization of lipase from *Streptomyces* sp. strain. Afr J Microbiol Res 6(28): 5742–5750

Amani Amamra, Yassine Reggami, Ihcene Bouasla, Houneida Benbouzid, Imene Bechecker & Hajira Berredjem (2024): Phytochemical profile and biological screening of two Amaranthaceae plants: *Atriplex halimus* and *Haloxylon scoparium*, Natural Product Research, <https://doi.org/10.1080/14786419.2024.2443489>

Amarouayache M, Derbal F, Kara MH (2010) Caractéristiques écologiques et biologiques d'*Artemia salina* (Crustacé, Anostracé) de la Sebkhia Ez-Zemoul, Algérie nord-est. Rev. Écol. (Terre Vie) 65:129-138. <http://dx.doi.org/10.3406/revec.2010.1515>

Aouar L, Lerat S, Ouffroukh A, Boulahrouf A, Beaulieu C (2012) Taxonomic identification of rhizospheric actinobacteria isolated from Algerian semi-arid soil exhibiting antagonistic activities against plant fungal pathogens. Can J Plant Pathol 34:165-176. <https://doi.org/10.1080/07060661.2012.681396>

Aouar L, Boukelloul I, Benadjila A (2021) PGPR traits of rhizospheric *Nocardiopsis* strains isolated from Algerian soils. In: Kallel M, Ben Dhia C, Khélifi N (eds) *recent advances in environmental science from the Euro-Mediterranean and surrounding regions*, 2nd edn. Springer, Cham, pp 1293–1300. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-51210-1\\_205](https://doi.org/10.1007/978-3-030-51210-1_205)

Aouiche A, Bijani C, Zitouni A, Mathieu F, Sabaou N (2014) Antimicrobial activity of saquayamycins produced by *Streptomyces* spp. PAL114 isolated from a Saharan soil. J Mycol Med 24(2):e17-23. <https://doi.org/10.1016/j.mycmed.2013.09.001>

Arenskötter M, Bröker D, Steinbüchel A (2004) Biology of the metabolically diverse genus *Gordonia*. Appl. Environ. Microbiol. 70(6):3195–3204.

<https://doi.org/10.1128/AEM.70.6.3195-3204.2004>

Arini GS, Borelli TC, Ferreira EG, de Felício R, Rezende-Teixeira P, Pedrino M, Rabiço F, Viana de Siqueira GM, Mencucini LG, Tsuji H, Neves Andrade LS, Garrido LM, Padilla G, Gil-de-la-Fuente A, Wang M, Lopes NP, Trivella DBB, Costa-Lotufo LV, Guazzaroni ME, da Silva RR (2025) A multi-omics reciprocal analysis for characterization of bacterial metabolism. *Front. Mol. Biosci.* 12:1515276. <https://doi.org/10.3389/fmolb.2025.1515276>

Aryal N, Aziz S, Rajbhandari P, Gross H (2019) Draft genome sequence of *Nonomuraea* sp. strain C10, a producer of brartemicin, isolated from a mud dauber wasp nest in Nepal. *Microbiol. Resour. Announc.* 8(45):e01109-19. <https://doi.org/10.1128/MRA.01109-19>

Azman AS, Othman I, Velu SS, Chan KG, Lee LH (2015) Mangrove rare actinobacteria: taxonomy, natural compound, and discovery of bioactivity. *Front Microbiol* 6:856. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00856>

Baba Aïssa F (1999) *Encyclopédie des plantes utiles en Algérie*. Librairie Moderne, Alger.

Baba Aïssa F (2000) *Encyclopédie des plantes utiles. Flore d'Algérie et du Maghreb*. Librairie Moderne, Alger, p. 368.

Baba Aïssa F (2011) *Encyclopédie des plantes utiles, flore Méditerranéenne (Maghreb, Europe méridionale), substances végétales d'Afrique, d'Orient et d'Occident*. El Maarifa, Alger.

Badji B, Mostefaoui A, Sabaou N (2007) Isolation and characterization of *Nonomuraea* sp. NM94 from Saharan soil of Algeria. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 34(8):567–572. <https://doi.org/10.1007/s10295-007-0210-z>

Bahamdain LA, Aly MM, Alshammari NM, Beyari EA (2025) Identifying extremophilic actinomycetes effective against multidrug-resistant bacterial pathogens and demonstrating high enzyme activities. *J Contemp Med Sci* 11. <https://doi.org/10.22317/jcms.v11i3.1891>

Bakkali F, Averbeck S, Averbeck D, Zhiri A, Baudoux D, Idaomar M (2006) Antigenotoxic effects of three essential oils in diploid yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) after treatment with UVC radiation, 8-MOP plus UVA and MMS. *Mutat. Res.* 606:27–38. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2006.02.005>

Baltz RH (2006) Marcel Faber Roundtable: Is our antibiotic pipeline unproductive because of starvation, constipation or lack of inspiration? *J. Ind. Microbiol. Biotechnol* 33:507-513. <https://doi.org/10.1007/s10295-005-0077-9>

Barka EA, Vatsa P, Sanchez L, Gaveau-Vaillant N, Jacquard C, Klenk H-P, Clément C, Ouhdouch Y, van Wezel GP (2016) Taxonomy, physiology, and natural products of Actinobacteria. *Microbiol Mol Biol Rev* 80:1–43. <https://doi.org/10.1128/MMBR.00019-15>

Basavaraj KN, Chandrashekhara S, Shamarez AM, Goudanavar PS, Manvi FV (2010) Isolation and morphological characterization of antibiotic producing actinomycetes. *Trop J Pharm Res* 9:231-236. <https://doi.org/10.4314/tjpr.v9i3.56282>

Bashan Y, Kamnev AA, De-Bashan LE (2013) Tricalcium phosphate is inappropriate as a universal selection factor for isolating and testing phosphate solubilizing bacteria that enhance

plant growth: a proposal for an alternative procedure. *Biol Ferti Soils* 49:465-479. <https://doi.org/10.1007/s00374-012-0737-7>

Becker B, Lechevalier MP, Lechevalier HA (1965) Chemical composition of cell-wall preparations from strains of various form genera of aerobic actinomycetes. *Appl. Microbiol.* 13:236–243.

Belakhdar J (1997) *La pharmacopée marocaine traditionnelle. Médecine arabe ancienne et savoirs populaires*. Ibis Press, Rabat, p. 764.

Belghit S, Driche EH, Bijani C, Zitouni A, Sabaou N, Badji B, Mathieu F (2016) Activity of 2,4-Di-tert-butylphenol produced by a strain of *Streptomyces mutabilis* isolated from a Saharan soil against *Candida albicans* and other pathogenic fungi. *J Mycol Médicale* 26(2):160-169. <https://doi.org/10.1016/j.mycmed.2016.03.001>

Belghit S, Toumatia O, Bakli M, Badji B, Zitouni A, Mathieu F, Smuleac L, Bouras N (2021) Isolation and characterization of a new *Streptomyces* strain LG10 from an unexploited Algerian Saharan Atlas. *Advanced research in life sciences* 5:36-42. <https://doi.org/10.2478/arls-2021-0027>

Belkhiter S, Benmansour N, Atchi S, Arab R, Boudjella S (2025) Exploring *Artemisia judaica* subsp. *sahariensis*: antioxidant and antispasmodic properties of an endemic species of the Algerian Sahara. *Trop J Nat Prod Res* 9: 44–49. <https://doi.org/10.26538/tjnpr/v9i1.7>

Benchelah AC, Bouziane H, Maka M (2004) *Fleurs du Sahara, arbres et arbustes, voyage au coeur de leurs usages avec les Touaregs du Tassili*. *Phytothérapie* 2:191–197.

Benhadj M, Gacemi-Kirane D, Menasria T, Guebla K, Ahmane Z (2018) Screening of rare actinomycetes isolated from natural wetland ecosystem (Fetzara Lake, northeastern Algeria) for hydrolytic enzymes and antimicrobial activities. *J. King Saud Univ. Sci.* 30(4):524–532. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2018.03.008>

Benmansour N, Benmansour A, El Hanbali F, González-Mas MC, Blázquez MA, El Hakmaoui A, Akssira M (2016) Antimicrobial activity of essential oil of *Artemisia judaica* L. from Algeria against multi-drug resistant bacteria from clinical origin. *Flavour Fragr. J.* 31:137–142.

Bentley SD, Chater KF, Cerdeño-Tárraga AM, Challis GL, Thomson NR, James KD, Harris DE, Quail MA, Kieser H, Harper D, Bateman A, Brown S, Chandra G, Chen CW, Collins M, Cronin A, Fraser A, Goble A, Hidalgo J, Hornsby T, et al. (2002) Complete genome sequence of the model actinomycete *Streptomyces coelicolor* A3(2). *Nature* 417(6885):141–147. <https://doi.org/10.1038/417141a>

Bezza L, Mannarino A, Fattarsi K, Mikail C, Abou L, Hadji-Minaglou F, Kaloustian J (2010) Composition chimique de l'huile essentielle d'*Artemisia herba-alba* provenant de la région de Biskra (Algérie). *Phytothérapie* 8:277–281. <https://doi.org/10.1007/s10298-010-0576-3>

Bona E, Massa N, Toumatia O, Novello G, Cesaro P, Todeschini V, Boatti L, Mignone F, Titouah H, Zitouni A, Lingua G, Vuolo F, Gamalero E (2021) Climatic zone and soil properties

determine the biodiversity of the soil bacterial communities associated to native plants from desert areas of North-Central Algeria. *Microorganisms* 9:1359. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9071359>

Boriky D, Berrada M, Talbi M, Keravis G, Rouessac F (1996) Eudesmanolides from *Artemisia herba-alba*. *Phytochemistry* 43:309–311. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(96\)00199-9](https://doi.org/10.1016/0031-9422(96)00199-9)

Baoune H, Ould El Hadj-Khelil A, Pucci G, Sineli P, Loucif L, Polti MA (2018) Petroleum degradation by endophytic *Streptomyces* spp. isolated from plants grown in contaminated soil of southern Algeria. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 147: 602–609. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.013>

Boubekri K, Soumare A, Mardad I, Lyamlouli K, Hafidi M, Ouhdouch Y, Kouisni L (2021) The screening of potassium- and phosphate-solubilizing actinobacteria and the assessment of their ability to promote wheat growth parameters. *Microorganisms* 9:470. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9030470>

Boubetra D, Zitouni A, Bouras N, Mathieu F, Lebrihi A, Schumann P, Spröer C, Klenk HP, Sabaou N (2013a) *Saccharothrix saharensis* sp. nov., an actinomycete isolated from Algerian Saharan soil. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol* 63:3744-3749.

Boubetra D, Zitouni A, Bouras N, Mathieu F, Lebrihi A, Schumann P, Spröer C, Klenk HP, Sabaou N (2013b) *Saccharothrix hoggarensis* sp. nov., a novel actinomycete isolated from Saharan soil. *Int J Syst Evol Microbiol* 63:549-553. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.039099-0>

Boubetra D, Zitouni A, Bouras N, Schumann P, Spröer C, Klenk HP, Sabaou N (2015) *Saccharothrix tamanrassetensis* sp. nov., an actinomycete isolated from Saharan soil. *Int J Syst Evol Microbiol* 65: 1316-1320. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.000104>

Boubetra D, Bouras N, Zitouni A, Schumann P, Spröer C, Sabaou N, Klenk HP (2016) *Streptosporangium algeriense* sp. nov., an actinobacterium isolated from desert soil. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol* 66:1034-1038.

Boudemagh AM (2005) Isolation and molecular identification of actinomycete microflora, of some saharian soils of south east Algeria (Biskra, El-Oued and Ourgla) study of antifungal activity of isolated strains. *J Myc Med.*1:39-44

Boudjelal F, Zitouni A, Bouras N, Schumann P, Spröer C, Sabaou N, Klenk HP (2015) *Actinoalloteichus hoggarensis* sp. nov., an actinomycete isolated from Saharan soil. *Int J Syst Evol Microbiol* 65:2006-2010. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.000216>

Boukhatem ZF, Benabbes R, Hacene H, Kacem Chaouche N (2022) Plant growth promoting Actinobacteria: The most promising candidates as biofertilizers—A review. *Front. Agron.* 4:849911. <https://doi.org/10.3389/fagro.2022.849911>

Bouras N, Meklat A, Zitouni A, Mathieu F, Schumann P, Spröer C, Sabaou N, Klenk HP (2015) *Nocardiopsis algeriensis* sp. nov., an alkalitolerant actinomycete isolated from Saharan soil.

Antonie Leeuwenhoek 107: 313-320. <https://doi.org/10.1007/s10482-014-0329-7>

Bouznada K, Bouras N, Mokrane S, Chaabane Chaouch F, Zitouni A, Pötter G, Spröer C, Klenk HP, Sabaou N (2017) *Saccharothrix ghardaiensis* sp. nov., an actinobacterium isolated from Saharan soil. *Antonie van Leeuwenhoek* 110:399-405. <https://doi.org/10.1007/s10482-016-0812-4>

Bruneton J (1999) *Pharmacognosie, Phytochimie, Plantes médicinales*, 3ème éd. Éditions Médicales Internationales et Tec & Doc Lavoisier, Paris.

Cai Y, Xue Q, Chen Z, Zhang R (2009) Classification and salt-tolerance of actinomycetes in the Qinghai Lake water and lakeside saline soil. *J. Sustain. Dev.* 2:107–110. <https://doi.org/10.5539/jsd.v2n1p107>

Caratini R (1971) *Bordas encyclopedie*. Bordas, Belgique 23: 137-195.

Carro L, Golińska P, Saati-Santamaría Z, Igual JM, Klenk HP, Goodfellow M (2024) Atacama Desert is a source of new *Micromonospora* strains: Description of *Micromonospora sicca* sp. nov. *Syst. Appl. Microbiol.* 47(5):126542. <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2024.126542>

Castillo UF, Strobel GA, Mullenberg K, Condrón MM, Teplow DB, Fogliano V, Gallo M, Ferracane R, Mannina L, Viel S, Codde M, Robison R, Porter H, Jensen J (2006) Munumbicins E-4 and E-5: novel broad-spectrum antibiotics from *Streptomyces* NRRL 3052. *FEMS Microbiol Lett* 255:296-300. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2005.00080.x>

Celaya S, Vazquez L, Valdez-Vazquez I, Hernández D, De la Torre M, Barboza-Corona JE (2021) A cellulolytic *Streptomyces* sp. isolated from a highly oligotrophic niche shows potential for hydrolyzing agricultural wastes. *BioEnergy Res* 14(5):1208–1219. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10174-z>

Chakraborty S, Khopade A, Kokare C, Mahadik K, Chopade B (2009) Isolation and characterization of novel  $\alpha$ -amylase from marine *Streptomyces* sp. D1. *J Mol Catal B Enzym* 58(1–4):17–23. <https://doi.org/10.1016/j.molcatb.2008.10.011>

Charchari S, Dahoun A, Bachi F, Benslimani A (1996) Antimicrobial activity in vitro of essential oils of *Artemisia herba-alba* Asso and *Artemisia judaica* L. from Algeria. *Riv. Ital. EPPOS* 18:3

Charchari S (2002) The essential oil of *Artemisia judaica* L. from Algeria. *J. Essent. Oil Res.* 14:16–17

Chater K (1999) David Hopwood and the emergence of *Streptomyces* genetics. *Int. Microbiol.* 2:61–68

Chater KF (2016) *Streptomyces* inside-out: a new perspective on the bacteria that provide us with antibiotics. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 371:20160032.

- Chiba S, Suzuki M, Ando K (1999) Taxonomic re-evaluation of '*Nocardopsis*' sp. K-252T (= NRRL 15532T): a proposal to transfer this strain to the genus *Nonomuraea* as *Nonomuraea longicatena* sp. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 49:1623–1630. <https://doi.org/10.1099/00207713-49-4-1623>
- Chopra C, Abrol BK, Handa KL (1960) *Les plantes médicinales des régions arides considérées surtout du point de vue botanique*. In: Recherches sur la zone aride-XIII, Les plantes médicinales des régions arides, 7ème éd. UNESCO, Paris, pp. 22–24
- Chun J, Bae KS (2000) Phylogenetic analysis of *Bacillus subtilis* and related taxa based on partial *gyrA* gene sequences. *Int J Syst Evol Microbiol* 50:189–195.
- Chun J, Rainey FA (2014) Integrating genomics into the taxonomy and systematics of the Bacteria and Archaea. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 64(2):316-324.
- Chun J, Oren A, Ventosa A, Christensen H, Ruiz Arahall D, da Costa MS, Rooney AP, Yi H, Xu XW, De Meyer S, Trujillo ME (2018) Proposed minimal standards for the use of genome data for the taxonomy of prokaryotes. *Int J Syst Evol Microbiol* 68:461–466. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.002516>
- Čihák M, Kameník Z, Šmídová K, Bergman N, Benada O, Kofroňová O, Petříčková K, Bobek J (2017) Secondary metabolites produced during the germination of *Streptomyces coelicolor*. *Front Microbiol* 8:2495. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02495>
- Coombs JT, Franco CM (2003) Isolation and identification of actinobacteria from surface-sterilized wheat roots. *App Environ Microbiol* 69:5603-5608. <https://doi.org/10.1128/AEM.69.9.5603-5608.2003>
- Coman G, Bahrim G (2011) Optimization of xylanase production by *Streptomyces* sp. P12-137 using response surface methodology and central composite design. *Ann Microbiol* 61(4):773–779. <https://doi.org/10.1007/s13213-010-0195-0>
- Compant S, Samad A, Faist H, Sessitsch A (2021) A review on the plant microbiome: ecology, functions, and emerging trends in microbial application. *J Adv Res* 29:29–37. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2019.03.004>
- Conn VM (2005) Molecular interactions of endophytic actinobacteria in wheat and *Arabidopsis*. PhD Thesis, Flinders University, p. 297
- Cournoyer B, Blaha D (2003) Cloning, characterization and phylogenetic analysis of the *sigA*  $\sigma$ 70 factor gene sequence from the actinomycete *Frankia*. *Dev. Plant Soil Sci.* 100:97–106
- Dahmani-Hamzani N, Baaliouamer A (2011) Chemical composition of Algerian *Artemisia herba-alba* essential oils isolated by microwave and hydrodistillation. *J. Essent. Oil Res.* 22:514–517. <https://doi.org/10.1080/10412905.2010.9700386>

Danilenko VN, Mironov VA, Elizarovs M (2005) Calcium as a regulator of intracellular processes in actinomycetes: A review. *Appl. Biochem. Microbiol.* 41:319–329

De Jager D, Sheldon MS, Edwards W (2009) Modelling growth kinetics of *Streptomyces coelicolor* A3(2) in a pressurised membrane gradostat reactor (MGR). *Enzyme Microb. Technol.* 45:449–456

Desjardins P, Conklin D (2010) NanoDrop microvolume quantitation of nucleic acids. *J Vis Exp* (45):2565. <https://doi.org/10.3791/2565>

Dietz A, Mathews J (1971) Classification of *Streptomyces* spore surfaces into five groups. *Appl. Microbiol.* 21:527–533

Djaballah K, Zitouni A, Bouras N, Pont F, Mathieu F, Sabaou N (2018) *Streptomyces massilialgeriensis* sp. nov., a novel halotolerant actinomycete isolated from a hypersaline soil in Algeria. *Int J Syst Evol Microbiol* 68:195–202

Djemouai N, Meklat A, Gaceb-Terrak R, Oulad Hadj Youcef K, Nacer A, Mokrane S, Bouras N, Verheecke-Vaessen C (2022a) Biological activities of *Streptomyces* sp. BTS40 isolated from the rhizosphere of *Artemisia herba-alba* Asso. *Analele Universității din Oradea, Fascicula Biologie* 29:7-14. <https://www.bioresearch.ro/2022-1/007-014-AUOFB.29.1.2022-DJEMOUAI.N-Biological.activities.of.Streptomyces.pdf>

Djemouai N, Meklat A, Gaceb-Terrak R, Oulad Hadj Youcef K, Nacer A, Saadi SA, Saad S, Verheecke-Vaessen C, Bouras N (2022b) *Streptomyces* species from the rhizosphere of the medicinal plant *Artemisia herba-alba* Asso: screening for biological activities. *Biologia* 77:2281-2299. <https://doi.org/10.1007/s11756-022-01070-2>

Djemouai N, Meklat A, Oulad Hadj Youcef K, Nacer A, Saadi SA, Vaessen CV (2024) Diversity and bioactivity of endophytic actinobacteria associated with the roots of *Artemisia herba-alba* Asso from Algeria. *Curr Microbiol* 81:402. <https://doi.org/10.1007/s00284-024-03932-1>

Djinni I, Defant A, Kecha M, Mancini I (2013) Antibacterial polyketides from the marine alga-derived endophytic *Streptomyces sundarbansensis*: a study on hydroxypyrrone tautomerism. *Mar Drugs* 11(1):124–135. <https://doi.org/10.3390/md11010124>

Djinni I, Defant A, Djoudi W, Chaabane Chaouch F, Souagui S, Kecha M, Mancini I (2019a) Modeling improved production of the chemotherapeutic polypeptide actinomycin D by a novel *Streptomyces* sp. strain from a Saharan soil. *Heliyon* 5(5):e01695. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01695>

Djinni I, Defant A, Kecha M, Mancini I (2019b) Actinobacteria derived from Algerian ecosystems as a prominent source of antimicrobial molecules. *Antibiotics* 8:172. <https://doi.org/10.3390/antibiotics8040172>

Dob T, Benabdelkader T (2006) Chemical composition of the essential oil of *Artemisia herba-alba* Asso grown in Algeria. J. Essent. Oil Res. 18:685–690. <https://doi.org/10.1080/10412905.2006.9699206>

Dogan G, Taskin B (2021) Hydrolytic enzymes producing bacterial endophytes of some *Poaceae* plants. Pol J Microbiol 70:297-304. <https://doi.org/10.33073/pjm-2021-026>

Donadio S, Carrano L, Brandi L, Serina S, Soffientini A, Raimondi E, Montanini N, Sosio M, Gualerzi CO (2002) Targets and assays for discovering novel antibacterial agents. J. Biotechnol. 3:175–185

Downes FP, Ito K (2001) *Compendium of Methods for the Microbiological Examination of Foods*, 4th ed. American Public Health Association (APHA), Washington, D.C.

Driche EH, Belghit S, Bijani C, Zitouni A, Sabaou N, Badji B (2015) A new *Streptomyces* strain isolated from Saharan soil produces di-(2-ethylhexyl) phthalate, a metabolite active against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*. Ann Microbiol 65:1341–1350. <https://doi.org/10.1007/s13213-014-0972-2>

Driche EH, Sabaou N, Bijani C, Zitouni A, Pont F, Mathieu F, Badji B (2017) *Streptomyces* sp. AT37 isolated from a Saharan soil produces a furanone derivative active against multidrug-resistant *Staphylococcus aureus*. World J Microbiol Biotechnol 33:105-119. <https://doi.org/10.1007/s11274-017-2265-y>

Duangupama T, Pittayakhajonwut P, Intaraudom C, Suriyachadkun C, Tadtong S, Kuncharoen N, He YW, Tanasupawat S, Thawai C (2024) Pradimicin U, a promising antimicrobial agent isolated from a newly found *Nonomuraea composti* sp. nov. Sci. Rep. 14:10942. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60744-w>

Ebrahimi-Zarandi M, Etesami H, Glick BR (2023) Fostering plant resilience to drought with Actinobacteria: unveiling perennial allies in drought stress tolerance. Plant Stress 4:100242. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100242>

Edwards J, Johnson C, Santos-Medellín C, Lurie E, Podishetty N K, Bhatnagar S, Lindow S, Raaijmakers J M, Dangl J L (2015) Structure, variation, and assembly of the root-associated microbiomes of rice. *Proc Natl Acad Sci U S A* 112:E911–E920. <https://doi.org/10.1073/pnas.1414592112>

El-Shatoury S, Abdulla H, El-Karaaly O, El-Kazzaz W, Dewedar A (2006) Bioactivities of endophytic actinomycetes from selected medicinal plants in the world heritage site of Saint Katherine. Egypt Int J Bot 2:307–312

El-Shatoury SA, El-Kraly OA, Trujillo ME, El-Kazzaz WM, El Sayeda GD, Dewedar A (2013) Generic and functional diversity in endophytic actinomycetes from wild Compositae plant species at South Sinai e Egypt. Institut Pasteur. Published by Elsevier Masson SAS. Research in Microbiology 164:761-769. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resmic.2013.03.004>

- El-Shatoury SA, Mahmoud FM, El-Kazzaz WM (2022) Bioactivities of endophytic actinobacteria inhabiting *Artemisia herba-alba* emphasizing differences from free-living strains. *Folia Microbiol* 67:81-89. <https://doi.org/10.1007/s12223-021-00911-y>
- Feuerstein I, Danin A, Segal R (1988) Constitution of the essential oil from an *Artemisia herba-alba* population of Spain. *Phytochemistry* 27:433–434
- Gao Y, Xu Y, Dong Z, Guo Y, Luo J, Wang F, Yan L, Zou X (2025) Endophytic fungal diversity and its interaction mechanism with medicinal plants. *Molecules* 30:1028. <https://doi.org/10.3390/molecules30051028>
- Gangwar M, Dogra S, Gupta UP, Kharwar RN (2014) Diversity and biopotential of endophytic actinomycetes from three medicinal plants in India. *African J Microbiol Res* 8:184-191. <https://doi.org/10.5897/AJMR2012.2452>
- Gardon C (1913) Contribution à l'étude anatomo-histologique du genre *Artemisia*. Les *Artemisia* d'Algérie, Thèse de pharmacie, Alger
- Gharabi Z, Sand RL (2008) *Artemisia herba-alba* Asso. A guide to medicinal plants in North Africa, pp. 49–49
- Ghodsolavi B, Ahmadzadeh M, Soleimani M, Madloo PB, Taghizad-Farid R (2013) Isolation and characterization of rhizobacteria and their effects on root extracts of *Valeriana officinalis*. *AJCS* 7:338-344. [https://www.cropj.com/alavi\\_7\\_3\\_2013\\_338\\_344.pdf](https://www.cropj.com/alavi_7_3_2013_338_344.pdf)
- Girão M, Ribeiro I, Ribeiro T, Azevedo IC, Pereira F, Urbatzka R, Leão PN, Carvalho MF (2019) Actinobacteria isolated from *Laminaria ochroleuca*: a source of new bioactive compounds. *Front Microbiol* 10:683. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00683>
- Glaeser SP, Kämpfer P (2015) Multilocus sequence analysis (MLSA) in prokaryotic taxonomy. *Systematic and Applied Microbiology* 38(4):237-245. <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2015.03.007>
- Goodfellow M, Parte A, Whitman WB, Kämpfer P, Busse HJ, Trujillo ME, Ludwig W, Suzuki KI (2012) *Bergey's manual of systematic bacteriology: Volume 5: The Actinobacteria*. Springer Science and Business Media, p. 2083
- Golinska P, Wypij M, Agarkar G, Rathod D, Dahm H, Rai M (2015) Endophytic actinobacteria of medicinal plants: diversity and bioactivity. *Antonie Van Leeuwenhoek* 108:267–289. <https://doi.org/10.1007/s10482-015-0502-7>
- González F, Santander C, Ruiz A, Pérez R, Moreira J, Vidal G, Aroca R, Santos C, Cornejo P (2023) Inoculation with *Actinobacteria* spp. isolated from a hyper-arid environment enhances tolerance to salinity in lettuce plants (*Lactuca sativa* L.). *Plants* 12:2018. <https://doi.org/10.3390/plants12102018>
- Gopalakrishnan S, Srinivas V, Naresh N, Pratyusha S, Ankati S, Madhuprakash J, Govindaraj M, Sharma R (2021) Deciphering the antagonistic effect of *Streptomyces* spp. and host-plant

resistance induction against charcoal rot of sorghum. *Planta* 253:57.  
<https://doi.org/10.1007/s00425-021-03577-5>

Goudjal Y, Toumatia O, Sabaou N, Mathieu F, Zitouni A (2013) Endophytic actinomycetes from spontaneous plants of Algerian Sahara: indole-3-acetic acid production and tomato plants growth promoting activity. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 29: 1821-1829. <https://doi.org/10.1007/s11274-013-1344-y>

Goudjal Y, Toumatia O, Yekkour A, Sabaou N, Mathieu F, Zitouni A (2014) Biocontrol of *Rhizoctonia solani* damping-off and promotion of tomato plant growth by endophytic actinomycetes isolated from native plants of Algerian Sahara. *Microbiological Research* 169(1): 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.06.014>

Gottlieb D (1973) General consideration and implication of the actinomycetes. In: Sykes G, Skinner FA (eds) *Actinomycetales: Characteristics and practical importance*. Academic Press, New York, pp. 1–10

Graner G, Persson P, Meijer J, Alstrom S (2003) A study on microbial diversity in different cultivars of *Brassica napus* in relation to its wilt pathogen, *Verticillium longisporum*. *FEMS Microbiol Lett* 224:269-276. [https://doi.org/10.1016/S0378-1097\(03\)00449-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1097(03)00449-X)

Guevara-Luna J, Arroyo-Herrera I, Tapia-García EY, Estrada-de los Santos P, Ortega-Nava AJ, Vásquez-Murrieta MS (2024) Diversity and Biotechnological Potential of Cultivable Halophilic and Halotolerant Bacteria from the “Los Negritos” Geothermal Area. *Microorganisms* 12:482. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12030482>

Guo Y, Goodfellow M, et al. (2008) A multilocus phylogeny of the *Streptomyces griseus* 16S rRNA gene clade: use of multilocus sequence analysis for streptomycete systematics. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 58:1490-1505.  
<https://doi.org/10.1099/ijs.0.000510-0>

Guo Y, Zheng W, Rong X, Huang Y (2009) *Streptomyces plumbiresistens* sp. nov., a  $Pb^{2+}$ -resistant actinomycete isolated from lead-contaminated soil. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 59: 2265–2269

Gurielidze M, Pataraya D, Cholokava N, Nutsubidze N (2010) Extremophilic actinomycetes, distributed in various types of soils of Georgia and their protease activity. *Bull. Georg. Natl. Acad. Sci.* 4:81–85

Hamdali H, Hafidi M, Virolle MJ, Ouhdouch Y (2008) Growth promotion and protection against damping-off of wheat by two rock phosphate solubilizing actinobacteria in a P-deficient soil under greenhouse conditions. *Appl Soil Ecol* 40:510-517.  
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.08.001>

Hasegawa SMA, Shimizu M, Nishimura T, Kunoh H (2006) Endophytic actinomycetes and their interactions with host plants. *Actinomycetologica* 20:72–81.  
<https://doi.org/10.3209/saj.20.72>

Hatano K, Nishii T, Kasai H (2003) Taxonomic re-evaluation of whorl-forming *Streptomyces* (formerly *Streptoverticillium*) species by using phenotypes, DNA–DNA hybridization and

sequences of *gyrB*, and proposal of *Streptomyces luteireticuli* (ex Katoh and Arai 1957) corrig., sp. nov., nom. rev. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 53:1519-1529. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.02238-0>

Hatimi S, Boudouma M, Bichichi M, Chaib N, Guessous Idrissi N (2000) Évaluation in vitro de l'activité antileishmanienne d'*Artemisia herba-alba* Asso. Therapeutique, Manuscrit no 2162:57

Hayakawa M, Nonomura H (1991a) A new method for the selective isolation of actinomycetes from soil. *Actinomycetologica* 5:163–170. <https://scispace.com/pdf/a-new-method-for-the-intensive-isolation-of-actinomycetes-xx8v5o7gve.pdf>

Hayakawa M, Sadakata T, Kajiura T, Nonomura H (1991b) New methods for the highly selective isolation of *Micromonospora* and *Microbispora* from soil. *J. Ferment. Bioeng.* 72(5):320–326. [https://doi.org/10.1016/0922-338X\(91\)90080-Z](https://doi.org/10.1016/0922-338X(91)90080-Z)

Hopwood DA (1973) Genetics of the Actinomycetales. In: Society for Applied Bacteriology Symposium Series 131

Hopwood DA (2003) *Streptomyces* genes: from Waksman to Sanger. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 30:468–471

Hopwood DA (2007) *Streptomyces in Nature and Medicine, the Antibiotic Makers*. Oxford University Press, ISBN: 978-0-19-515066-7

Huang HY, Li J, Zhao GZ, Zhu WY, Yang LL, Tang HY, Xu LH, Li WJ (2012) *Sphingomonas endophytica* sp. nov., isolated from *Artemisia annua* L. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 62:1576–1580. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.031484-0>

Hutchings MI, Truman AW, Wilkinson B (2019) Antibiotics: past, present and future. *Current Opinion in Microbiology* 51: 72–80.

Iftikhar A, Aijaz N, Farooq R, Aslam S, Zeeshan A, Munir M, Irfan M, Mehmood T, Atif M, Ali M, Shiraz A (2023) Beneficial role of phosphate solubilizing bacteria (PSB) in enhancing soil fertility through a variety of actions on plant growth and ecological perspective: An updated review. *Journal of Xi'an Shiyou University, Natural Science Edition* 19:520–547. <https://www.researchgate.net/publication/374023188>

Ivanova N, Sikorski J, Jando M, Lapidus A, Nolan M, Lucas S, Glavina Del Rio T, Tice H, Copeland A, Cheng JF, Chen F, Bruce D, Goodwin L, Pitluck S, Mavromatis K, Ovchinnikova G, Pati A, Chen A, Palaniappan K (2010) Complete genome sequence of *Gordonia bronchialis* type strain (3410T). *Stand Genomic Sci.* 2:19–28.

Jog R, Naresh Kumar G, Pandya M, Rajkumar S (2014) Mechanism of phosphate solubilization and antifungal activity of *Streptomyces* spp. isolated from wheat roots and rhizosphere and their application in improving plant growth. *Microbiology* 160(4):778–788. <https://doi.org/10.1099/mic.0.074146-0>

Kar S, Ray RC (2008) Statistical optimization of alpha-amylase production by *Streptomyces erumpens* MTCC 7317 cells in calcium alginate beads using response surface methodology. *Pol J Microbiol* **57**(1):49–57. PMID: 18610656

Kara Ali M, Ait Kaki A, Kara Ali W, Bramki A, Benchabbi A, Kacem Chaouche N (2022) First study of *Micromonospora echinospora* isolation from a rocky site of Eastern Algeria and first report of its potential use in cementitious materials biohealing. *South Asian J Exp Biol* **12**:800–810. [https://doi.org/10.38150/sajeb.12\(6\).p800-810](https://doi.org/10.38150/sajeb.12(6).p800-810)

Kaur P, Yadav N, Singh P, Chawla H, Kalra S, Yashpal M, Kalra K (2021) Production and applications of pectinases: A review. *Int J Pharm Sci Res* **12**(7):3602–3610

Kealey C, Creaven C, Murphy C, Brady C (2017) New approaches to antibiotic discovery. *Biotech Lett* **39**:805-817. <https://doi.org/10.1007/s10529-017-2311-8>

Kelly KL (1964). Inter-Society Color Council–National Bureau of Standards Color-Name Charts Illustrated with Centroid Colors. Washington, DC: US Government Printing Office. <https://tsapps.nist.gov/srmext/certificates/archives/2106.pdf>

Keulen Gv, Jonkers HM, Claessen D, Dijkhuizen L, Wösten HAB (2003) Differentiation and Anaerobiosis in Standing Liquid Cultures of *Streptomyces coelicolor*. *Journal of Bacteriology* **185**: 1455-1458.

Khafagy SM, El-Din AS, Jakupovic J, Zdero C, Bohlmann F (1988) Glaucolide-like sesquiterpene lactones from *Artemisia judaica*. *Phytochemistry* **27**:1125- 1128. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(88\)80287-5](https://doi.org/10.1016/0031-9422(88)80287-5)

Khan AL, Gilani SA, Waqas M, Al-Hosni K, Al-Khiziri S, Kim YH, Ali L, Kang SM, Asaf S, Shahzad R, Hussain J, Lee IJ, Al-Harrasi A (2017) Endophytes from medicinal plants and their potential for producing indole acetic acid, improving seed germination and mitigating oxidative stress. *J Zhejiang Univ Sci B* **18**:125-137. <https://doi.org/10.1631/jzus.B1500271>

Khebizi N, Boudjella H, Bijani C, Bouras N, Klenk H-P, Pont F, Mathieu F, Sabaou N (2018) Oligomycins A and E, major bioactive secondary metabolites produced by *Streptomyces* sp. strain HG29 isolated from a Saharan soil. *J Mycol Médicale* **28**(1):150-160. <https://doi.org/10.1016/j.mycmed.2017.10.007>

Kim TH, Ito H, Hatano T, Taniguchi S, Khennouf S, Yoshida T (2004) Chemical constituents of *Artemisia herba-alba* Asso. *Nat Med* **58**: 165.

Kim OS, Cho YJ, Lee K, Yoon SH, Kim M, Na H, Park SC, Jeon YS, Lee JH, Yi H, Won S, Chun J (2012a) Introducing EzTaxon-e: a prokaryotic 16S rRNA Gene sequence database with phylotypes that represent uncultured species. *Int J Syst Evol Microbiol* **62**:716-721. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.038075-0>

Kim KO, Shin KS, Kim MN, Shin KS, Labeda DP, Han JH, Kim SB (2012b) Reassessment of the status of *Streptomyces setonii* and reclassification of *Streptomyces fimicarius* as a later synonym of *S. setonii* and *Streptomyces albovinaceus* as a later synonym of *S. globisporus*

based on combined 16S rRNA/gyrB gene sequence analysis. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 62(Pt 12):2978-2985. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.040287-0>

Kim M, Oh HS, Park SC, Chun J (2014) Towards a taxonomic coherence between average nucleotide identity and 16S rRNA gene sequence similarity for species demarcation of prokaryotes. *Int J Syst Evol Microbiol* 64:346–351. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.059774-0>

Kitouni M, Boudemagh A, Oulmi L, Reghioia S, Boughachiche F, Zerizer H, Hamdiken H, Couble A, Mouniee D, Boulahrouf A, Boiron P (2005) Isolation of actinomycetes producing bioactive substances from water, soil and tree bark samples of the north–east of Algeria. *Journal de Mycologie Médicale* 15:45-51.

Klykleung N, Yuki M, Kudo T, Ohkuma M, Phongsopitanun W, Pittayakhajonwut P, Tanasupawat S (2020) *Nonomuraea phyllanthi* sp. nov., an endophytic actinomycete isolated from the leaf of *Phyllanthus amarus*. *Arch Microbiol.*202:55–61.

Koeh SC, Plechatá M, Pathom-aree W, Kamenik Z, Jaisi A (2025) Strategies for Actinobacteria isolation, cultivation, and metabolite production that are biologically important. *ACS Omega* 10:15923–15934. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c01344>

Komaki H, Ichikawa N, Hosoyama A, Hamada M, Harunari E, Ishikawa A, Igarashi Y (2016) Draft genome sequence of *Micromonospora* sp. DSW705 and distribution of biosynthetic gene clusters for depsipeptides bearing 4-amino-2,4-pentadienoate in actinomycetes. *Stand Genomic Sci* 11:84. <https://doi.org/10.1186/s40793-016-0206-2>

Komaki H, Ichikawa N, Hosoyama A, Hamada M, Ichimura M, Kimura A, Yamamoto M, Tamura T (2017) Reclassification of *Streptomyces* species based on genome sequence analyses and DNA–DNA relatedness: proposal of *Streptomyces cinnamoneus* subsp. *cinnamoneus* subsp. nov. and *Streptomyces cinnamoneus* subsp. *ureilyticus* subsp. nov. *Int J Syst Evol Microbiol* 67: 202–210

Komaki H, Tamura T (2019) Reclassification of *Streptomyces hygrosopicus* and its related species based on genome analyses. *Int J Syst Evol Microbiol* 69: 3821–3830.

Komaki H, Tamura T (2020a) Reclassification of *Streptomyces mobaraensis* and its related species based on genomic analysis. *Int J Syst Evol Microbiol* 70: 320–327

Komaki H, Tamura T (2020b) Taxonomic study of the *Streptomyces griseus* clade based on genome sequences: proposal of several new combinations and synonyms. *Int J Syst Evol Microbiol* 70: 1003–1017.

Komaki H, Tamura T (2020c) Reclassification of *Streptomyces albidoflavus* and its related species based on whole-genome analysis. *Int J Syst Evol Microbiol* 70: 2352–2362

Komaki H, Tamura T (2020d) Reclassification of *Streptomyces pratensis* and its related species based on genome sequence comparisons. *Int J Syst Evol Microbiol* 70: 4197–4207

Komaki H (2021) Reclassification of *Streptomyces* species based on genome analyses and proposal of several new synonyms in the genus *Streptomyces*. *Int J Syst Evol Microbiol* 71(1):004634.

Kumar Y, Goodfellow M (2010) Reclassification of *Streptomyces hygrosopicus* strains as *Streptomyces aldersoniae* sp. nov., *Streptomyces angustmyceticus* sp. nov., comb. nov., *Streptomyces ascomycinicus* sp. nov., *Streptomyces decoyicus* sp. nov., comb. nov., *Streptomyces milbemycinicus* sp. nov. and *Streptomyces wellingtoniae* sp. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 60: 769-775.

Kuncharoen N, Suriyachadkun C, Tamura T, Sungthong R (2021) *Streptomyces radialis* sp. nov., a novel actinobacterium isolated from plant roots. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 71(3): 004724

Küster E (1972) Simple working key for the classification and identification of named taxa included in the International *Streptomyces* Project. *Int J Syst Bacteriol* 22:139–148.  
<https://doi.org/10.1099/00207713-22-3-139>

Labeda DP, Goodfellow M, Brown R, Ward AC, Lanoot B, Vannanneyt M, Swings J, Kim S-B, Liu Z, Chun J, Tamura T, Oguchi A, Kikuchi T, Hatano K, Kiriyaama M, Takahashi Y (2012) Phylogenetic study of the species within the family *Streptomycetaceae*. *Antonie van Leeuwenhoek* 101:73-104. <https://doi.org/10.1007/s10482-011-9656-0>

Laid M, Hegazy M.-EF, Ahmed AA, Ali K, Belkacemi D, Ohta S (2008) Sesquiterpene lactones from Algerian *Artemisia herba-alba*. *Phytochemistry Letters* 1: 85-88.  
<https://doi.org/10.1016/j.phytol.2008.04.002>

Lahoum A, Bouras N, Mathieu F, Schumann P, Spröer C, Klenk HP, Sabaou N (2016) *Actinomadura algeriensis* sp. nov., an actinobacterium isolated from Saharan soil. *Antonie Van Leeuwenhoek* 109:159-165. <https://doi.org/10.1007/s10482-015-0617-x>

Larpen-Gourgaud M, Larpen JP (1997) *Mémento technique de microbiologie. Paris, Tec and Doc-Lavoisier* .3rd edn. ISBN- 2-7430-0163-1.

Lazzarini A, Cavaletti L, Toppo G, Marinelli F (2000) Rare genera of actinomycetes as potential producers of new antibiotics. *Antonie van Leeuwenhoek* 78: 399-405.

Leclerc H, Meyer A, Deiana J (1994) *Cours de microbiologie générale : nouveau programme*. Doin éditeur, Paris. ISBN : 2-7040-0745-4.

Lee N, Kim W, Hwang S, Lee Y, Cho S, Palsson B, Cho B-K (2020) *Thirty complete Streptomyces genome sequences for mining novel secondary metabolite biosynthetic gene clusters*. *Scientific Data* 7:55. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0395-9>

Leulmi N, Sighel D, Defant A, Khenaka K, Boulahrouf A, Mancini I (2018) Nigericin and grisorixin methyl ester from the Algerian soil-living *Streptomyces youssoufiensis* SF10 strain: a computational study on their epimeric structures and evaluation of glioblastoma stem cells growth inhibition. *Natural Product Research*, 32(16): 1915-1921.  
<https://doi.org/10.1080/14786419.2018.1446014>

Li WJ, Tang SK, Stackebrandt E, Kroppenstedt RM, Schumann P, Xu LH, Jiang CL (2003a) *Saccharomonospora paurometabolica* sp. nov., a moderately halophilic actinomycete isolated from soil in China. *Int J Syst Evol Microbiol* 53:1591-1594. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.02633-0>

- Li WJ, Xu P, Tang SK, Xu LH, Kroppenstedt RM, Stackebrandt E, Jiang CL (2003b) *Prauserella halophila* sp. nov. and *Prauserella alba* sp. nov. moderately halophilic actinomycetes from saline soil. *Int J Syst Evol Microbiol* 53:1545-1549. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.02611-0>
- Li WJ, Xu P, Zhang LP, Tang SK, Cui XL, Mao PH, Xu LH, Schumann P, Stackebrandt E, Jiang CL (2003c) *Streptomonospora alba* sp. nov., a novel halophilic actinomycete, and emended description of the genus *Streptomonospora* Cui et al. 2001. *Int J Syst Evol Microbiol* 53:1421-1425. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.02543-0>
- Li WJ, Park DJ, Tang SK, Wang D, Lee JC, Xu LH, Kim CJ, Jiang CL (2004) *Nocardiopsis salina* sp. nov., a novel halophilic actinomycete isolated from saline soil in China. *Int J Syst Evol Microbiol* 54:1805–1809. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.63127-0>
- Li J, Zhao GZ, Chen HH, Wang HB, Qin S, Zhu WY, Xu LH, Jiang CL, Li WJ (2008) Antitumour and antimicrobial activities of endophytic streptomycetes from pharmaceutical plants in rain forest. *Lett Appl Microbiol* 47:574-580. <https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.2008.02470.x>
- Li J, Zhao GZ, Huang HY, Zhu WY, Lee JC, Xu LH, Kim CJ, Li WJ (2011) *Nonomuraea endophytica* sp. nov., an endophytic actinomycete isolated from *Artemisia annua* L. *Int J Syst Evol Microbiol* 61:757-761 <https://doi.org/10.1099/ijs.0.022558-0>
- Li J, Zhao GZ, Huang HY, Qin S, Zhu WY, Zhao LX, Xu LH, Zhang S, Li WJ, Strobel G (2012) Isolation and characterization of culturable endophytic actinobacteria associated with *Artemisia annua* L. *Antonie van Leeuwenhoek* 101:515-527. <https://doi.org/10.1007/s10482-011-9661-3>
- Li J, Zhao GZ, Zhu WY, Huang HY, Xu LH, Zhang S, Li WJ (2013) *Streptomyces endophyticus* sp. nov., an endophytic actinomycete isolated from *Artemisia annua* L. *Int J Syst Evol Microbiol* 63:224-229. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.035725-0>
- Lin J, Zhang L, Qian L, Yang Y, Xiang W, Zhao J, Wang X (2022) *Nonomuraea aurantiaca* sp. nov., a novel cellulase-producing actinobacterium isolated from soil. *Int J Syst Evol Microbiol* 72:005411. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.005411>
- Liu Y, Morelli M, Koskimäki JJ, Qin S, Zhu YH, Zhang XX (2022) Editorial: Role of endophytic bacteria in improving plant stress resistance. *Front Plant Sci* 13:1106701. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1106701>
- Locci R (2005) Actinomycete spores. *Encyclopedia of Life Sciences*. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1038/npg.els.0004237/abstract>
- Maciejewska M, Adam D, Naômé A, Martinet L, Tenconi E, Całusinska M, Delfosse P, Hanikenne M, Baurain D, Compère P, Carnol M, Barton HA, Rigali S (2017) Assessment of the Potential Role of *Streptomyces* in Cave Moonmilk Formation. *Front Microbiol* 8:1181.

<https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01181>

Madhaiyan M, Saravanan VS, Lee JS, Chung KY (2020) Genome-based taxonomic reclassification of several *Streptomyces* species and proposal of *Streptomyces tsukubensis* sp. nov. *Int J Syst Evol Microbiol* 70: 345–358.

Madigan MT, Martinko JM, Stahl DA, Clark DP (2011) Brock biology of microorganisms. 13th Edition Hardcover. ISBN-13: 978-0-321-64963-8.

Mahmoudi Y (1995) El-bach'ir fi ennebatat ettibia fi el-djazair. Dar elkitab Blida.

Maie R (1934) Etude sur la Flore et la Végétation du Sahara Central : Mission du Hoggar. Mémoires de la Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du Nord, tome 25. Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du Nord, Alger .Maroc). Phytoénologie 22.

Mamangkey J, Suryanto D, Munir E, Mustopa AZ, Sibero MT, Mendes LW, Hartanto A, Taniwan S, Ek-Ramos MJ, Harahap A, Verma A, Trihatmoko E, Putranto WS, Pardosi L, Rudia LO (2021) Isolation and enzyme bioprospection of bacteria associated to *Bruguiera cylindrica*, a mangrove plant of North Sumatra, Indonesia. *Biotechnol Rep* 30: e00617. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2021.e00617>

Marrif HI, Ali BH, Hassan KM (1995) Some pharmacological studies on *Artemisia herba-alba* (Asso.) in rabbits and mice. *J Ethnopharmacol* 49:51. [https://doi.org/10.1016/0378-8741\(95\)01302-4](https://doi.org/10.1016/0378-8741(95)01302-4)

Martin J, Torrel M, Valles J (2001) Palynological features as a systematic marker in *Artemisia* s.l. and related genera (*Asteraceae*, *Anthemideae*): implication for subtribe *Artemisiinae* delimitation. *Plant Biol* 4: 372-378. <http://www.thiemeconnect.com/ejournals/pdf/plantbiology/doi/10.1055/s-2001-16462.pdf>.

Martin J, Torrel M, Korobkov AA, Valles J (2003) Palynological features as systematic marker in *Artemisia* L. and related genera (*Asteraceae*, *Anthemideae*) – II: implications for subtribe *Artemisiinae* delimitation. *Plant Biol* 5:85–93. <https://doi.org/10.1055/s-2003-37979>

Martinez AFC, de Almeida LG, Moraes LAB, Cònsoli FL (2017) Tapping the biotechnological potential of insect microbial symbionts: new insecticidal porphyrins. *BMC Microbiol* 17:143. <https://doi.org/10.1186/s12866-017-1040-2>

Matmoura A, Yekkour A, Boufadi MY, Bouras N, Zitouni A, Mokrane S, Meklat A, Verheecke-Vaessen C (2023) Exploration of actinobacteria communities in seawater and sediments of Mediterranean basin from Algerian coast displays high diversity with new taxa and antibacterial potential. *Biologia* 78:2219–2231. <https://doi.org/10.1007/s11756-023-01353-2>

McArthur ED, Plummer A (1978) Biogeography and management of the native western shrubs: A case study, section *Tridentatae* of *Artemisia*. *Great Basin Naturalist* 2: 229-243.

McCarthy AJ, Stanley TW (1992) Actinomycetes as Agents of Biodegradation in the Environment a Review. *Gene* 115:189-192. [https://doi.org/10.1016/0378-1119\(92\)90558-7](https://doi.org/10.1016/0378-1119(92)90558-7)

Meftah T (2001) Connaissance, valorisation et contrôle de l'utilisation de la flore sauvage en médecine traditionnelle (plantes médicinales). Programme UICN pour l'Afrique du nord et ANN Algérie.

Meier-Kolthoff JP, Auch AF, Klenk HP, Göker M (2013) Genome sequence-based species delimitation with confidence intervals and improved distance functions. *BMC Bioinformatics* 14:60. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-14-60>

Meklat A, Bouras N, Zitouni A, Mathieu F, Lebrihi A, Schumann P, Spröer C, Klenk HP, Sabaou N (2013) *Actinopolyspora saharensis* sp. nov., a novel halophilic actinomycete isolated from a Saharan soil of Algeria. *Antonie Van Leeuwenhoek* 103:771-776. <https://doi.org/10.1007/s10482-012-9859-z>

Meklat A, Bouras N, Zitouni A, Sabaou N, Mathieu F, Schumann P, Spröer C, Klenk HP (2014) *Saccharopolyspora ghardaiensis* sp. nov., an extremely halophilic actinomycete isolated from Algerian Saharan soil. *J. Antibiot* 67:299-303.

Meyer J (1976) *Nocardiopsis*, a new genus of the order Actinomycetales. *Int J Syst Bacteriol* 26:487-493. <https://doi.org/10.1099/00207713-26-4-487>

Miche L, Balandreau J (2001) Effects of Rice Seed Surface Sterilization with Hypochlorite on Inoculated *Burkholderia vietnamiensis*. *Appl Environ Microbiol* 67:3046-3052. <https://doi.org/10.1128/AEM.67.7.3046-3052.2001>

Mingma R, Pathom-aree W, Trakulnaleamsai S, Thamchaipenet A, Duangmal K (2014) Isolation of rhizospheric and roots endophytic actinobacteria from Leguminosae plant and their activities to inhibit soybean pathogen, *Xanthomonas campestris* sp. Glycine. *World J. Microbiol. Biotechnol* 30:271-280. <https://doi.org/10.1007/s11274-013-1451-9>

Miyadoh S, Tsuchizaki N, Ishikawa J Hotta K (2002) "Digital Atlas of Actinomycetes". The Society of Actinomycetes. Tokyo Japan. (<http://www.nih.go.jp/saj/DigitalAtlas>)

Mohamed AEHH, El-Sayed MA, Hegazy ME, Helaly SE, Esmail AM, Mohamed NS (2010) Chemical constituents and biological activities of *Artemisia herba-alba*. *Rec Nat Prod* 4:1-25. [https://www.acgpubs.org/doc/201808051508381\\_RNP-0906-111.pdf](https://www.acgpubs.org/doc/201808051508381_RNP-0906-111.pdf)

Mohamed H, Miloud B, Zohra F, García-Arenzana JM, Veloso A, Rodríguez-Couto S (2017) Isolation and characterization of actinobacteria from Algerian Sahara soils with antimicrobial activities. *Int J Mol Cell Med* 6:109-120. <https://doi.org/10.22088/acadpub.BUMS.6.2.5>

Mohammed HA, Qureshi KA, Ali HM, Al-Omar MS, Khan O, Mohammed SAA (2022) Bio-evaluation of the wound healing activity of *Artemisia judaica* L. as part of the plant's use in traditional medicine; phytochemical, antioxidant, anti-inflammatory, and antibiofilm properties of the plant's essential oils. *Antioxidants* 11:332. <https://doi.org/10.3390/antiox11020332>

Mohamad OAA, Liu YH, Huang Y, Kuchkarova N, Dong L, Jiao JY, Fang BZ, Ma JB, Hatab S, Li WJ (2024) Metabonomic analysis to identify exometabolome changes underlying antifungal and growth promotion mechanisms of endophytic *Streptomyces albidoflavus* for

sustainable agriculture practice. *Front Microbiol* 15 :1439798. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1439798>

Mohammadipanah F, Wink J (2016) Actinobacteria from arid and desert habitats: diversity and biological activity. *Frontiers in Microbiology* 6: 1541. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01541>

Moufid A, Eddouks M (2012) *Artemisia herba-alba*: a popular plant with potential medicinal properties. *Pak J Biol Sci* 15:1152–1159. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2012.1152.1159>

Moussa HE, El-Shatoury SA, Wahid OAA, Dewedar A (2011) Characterization of endophytic actinomycetes from wild Egyptian plants as antagonists to some phytopathogenic fungi. *Egypt J Nat Toxins* 8:32–48.

Musa Z, Ma J, Egamberdieva D, Mohamad OA, Abaydulla G, Liu Y, Li WJ, Li L (2020) Diversity and antimicrobial potential of cultivable endophytic actinobacteria associated with the medicinal plant *Thymus roseus*. *Frontiers in Microbiology* 11: 191. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00191>

Mukhtar S, Zaheer A, Aiysha D, Abdulla Malik K, Mehnaz S (2017) Actinomycetes: a source of industrially important enzymes. *J Proteom Bioinform* 10:316-319. <https://doi.org/10.4172/0974-276X.1000456>

Nabli A (1989) Essai de synthèse sur la végétation et la phyto-écologie tunisiennes, tome I. Ed. MAB (Faculté des sciences de Tunis) Tunisie 186-188.

Nafis A, Raklami A, Bechtaoui N, El Khalloufi F, El Alaoui A, Glick BR, Hafidi M, Ouhdouch Y, Kouisni L (2019) Actinobacteria from extreme niches in Morocco and their plant growth-promoting potentials. *Diversity* 11(8):139. <https://doi.org/10.3390/d11080139>

Narayana KJ, Prabhakar P, Vijayalakshmi M, Venkateswarlu Y, Krishna PS (2007) Biological activity of phenylpropionic acid isolated from a terrestrial streptomycetes. *Pol J Microbiol* 56:191-197. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18062653/>

Nargotra P, Sharma V, Lee Y-C, Tsai Y-H, Liu Y-C, Shieh C-J, Tsai M-L, Dong C-D, Kuo C-H (2023) Microbial lignocellulolytic enzymes for the effective valorization of lignocellulosic biomass: a review. *Catalysts* 13:83. <https://doi.org/10.3390/catal13010083>

Newitt JT, Prudence SMM, Hutchings MI, Worsley SF (2019) *Biocontrol of Cereal Crop Diseases Using Streptomycetes*. *Pathogens* 8(2): 78.

Ngamcharungchit C, Matsumoto A, Suriyachadkun C, Panbangred W, Inahashi Y, Intra B (2023) *Nonomuraea corallina* sp. nov., isolated from coastal sediment in Samila Beach, Thailand: insights into secondary metabolite synthesis as anticancer potential. *Front Microbiol* 14:1226945. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1226945>

- Nithya K, Muthukumar C, Biswas B, Alharbi NS, Kadaikunnan S, Khaled JM, Dhanasekaran D (2018) Desert actinobacteria as a source of bioactive compounds production with a special emphasis on Pyridine-2,5-diacetamide, a new pyridine alkaloid produced by *Streptomyces* sp. DA3-7. *Microbiol Res* 207:116–133. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.11.010>
- Nonomura H (1974) Key for classification and identification of 458 species of the *Streptomyces* included in ISP. *J Ferment Technol* 52:78–92.
- Nouioui I, Carro L, García-López M, Meier-Kolthoff JP, Woyke T, Kyrpides NC, Pukall R, Klenk HP, Goodfellow M, Göker M (2018) Genome-based taxonomic classification of the phylum Actinobacteria. *Front Microbiol* 9:2007. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02007>
- Oren A, Göker M (2025) Validation List no. 221: valid publication of new names and new combinations effectively published outside the IJSEM. *Int J Syst Evol Microbiol* 75:006562. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.006562>
- Ørskov J (1923) Investigations into the morphology of the ray fungi. *Ann Inst Pasteur* 37:135–146.
- Ouchari L, Boukeskase A, Bouizgarne B, Ouhdouch Y (2018) Antimicrobial potential of actinomycetes isolated from the unexplored hot Merzouga desert and their taxonomic diversity. *BMC Microbiol* 18:179. <https://doi.org/10.1242/bio.035410>
- Ouyahya, A (1987) Systématique du genre *Artemisia* au Maroc, thèse de Doc.Sciences, Fac. sciences et techniques de Saint-Jérôme, Aix-Marseille III, dir. R. Nègre 436.
- Ozenda, P (1983) Flore du Sahara, Edition du centre national de la recherche scientifique Paris.
- Ozenda, P (1985) Flore du Sahara Ed : éditions du centre nationale de la recherche scientifique Paris 441.
- Ozenda P (1991) Flore et végétation du Sahara, 3e édition. CNRS Paris 662.
- Panyachanakul T, Kitpreechavanich V, Lorliam W, Krajangsang S, et al. (2024) Optimization, purification and characterization of lipase from *Streptomyces* sp. A3301, with application of crude lipase for cooking oily wastewater treatment. *Trends Sci* 21(11):8504. <https://doi.org/10.48048/tis.2024.8504>
- Parte A, Whitman WB, Goodfellow M, Kampfer P, Busse HJ, Trujillo ME, Ludwig W, Suzuki KI (2012) *Bergey's manual of systematic bacteriology: volume 5: the Actinobacteria*. Springer, Berlin
- Passari AK, Mishra VK, Saikia R, Gupta VK, Singh BP (2015) Isolation, abundance and phylogenetic affiliation of endophytic actinomycetes associated with medicinal plants and screening for their in vitro antimicrobial biosynthetic potential. *Front Microbiol* 6:273. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00273>
- Passari AK, Mishra VK, Singh G, Singh P, Kumar B, Gupta VK, Sarma RK, Saikia R, Donovan AO, Singh BP (2017) Insights into the functionality of endophytic actinobacteria with a focus

on their biosynthetic potential and secondary metabolites production. *Sci Rep* 7:11809. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12235-4>

Patocka J, Plucar B (2003) Pharmacology and toxicology of absinthe. *Journal of Applied Biomedicine* 199-205. ISSN 1214-0287.

Pellissier L, Leoni S, Marcourt L, Ferreira Queiroz E, Lecoultre N, Quiros-Guerrero LM, Barthelemy M, Eparvier V, Chave J, Stien D, Gindro K, Perron K, Wolfender JL (2021) Characterization of *Pseudomonas aeruginosa* quorum sensing inhibitors from the endophyte *Lasiodiplodia venezuelensis* and evaluation of their antivirulence effects by metabolomics. *Microorganisms* 9:1807. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9091807>

Perry JJ, Staley JT, Lary S (2004) *Microbiologie*. Edition Dunod

Pourrat Y (1974) Propriétés éco-physiologiques associées à l'adaptation d'*Artemisia herba alba*, plante d'intérêt pastoral au milieu désertique, thèse du 3ème cycle à l'université de Paris.

Pottier G (1981) *Artemisia herba-alba*. Flore de la Tunisie: angiospermes– dicotylédones– gamopétales 1012.

Prasad P, Singh T, Bedi S (2013) Characterization of the cellulolytic enzyme produced by *Streptomyces griseorubens* (Accession No. AB184139) isolated from Indian soil. *J King Saud Univ Sci* 25(3):245–250. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2013.03.003>

Prayogo FA, Budiharjo A, Kusumaningrum HP, Wijanarka, Supriyadi A, Nurhayati N (2020) Metagenomic applications in exploration and development of novel enzymes from nature: a review. *J Genet Eng Biotechnol* 18:39. <https://doi.org/10.1186/s43141-020-00043-9>

Prescott LM, Sherwood LM, Woolverton CJ (2010) *Microbiologie*. De Boeck Edition. ISBN-978-2-8041-6012-8.

Prescott LM, Willey JM, Sherwood LM, Woolverton CJ (2018) *Microbiologie*. De Boeck supérieur. France. 1120.

Pridham TG, Gottlieb D (1948) The utilization of carbon compounds by some Actinomycetales as an aid for species determination. *J Bacteriol* 56: 107-114.

Pridham TG, Hesseltine CW, Benedict RG (1958) A guide for the classification of *Streptomyces* and related genera. *J Bacteriol* 76:461–493.

Pridham TG (1965) Color and Streptomyces, report of an international workshop on determination of color of Streptomyces. *Applied Microbiology* 13: 43-61.

Qin S, Li J, Chen HH, Zhao GZ, Zhu WY, Jiang CL, Xu LH, Li WJ (2009) Isolation, diversity, and antimicrobial activity of rare actinobacteria from medicinal plants of tropical rain forests in Xishuangbanna, China. *Appl Environ Microbiol* 75:6176-6186. <https://doi.org/10.1128/AEM.01034-09>

- Qin S, Xing K, Jiang JH, Xu LH, Li WJ (2011) Biodiversity, bioactive natural products and biotechnological potential of plant-associated endophytic actinobacteria. *Appl Microbiol Biotechnol* 89:457-473. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2923-6>
- Qin S, Chen HH, Zhao GZ, Li J, Zhu WY, Xu LH, Jiang JH, Li WJ (2012) Abundant and diverse endophytic actinobacteria associated with medicinal plant *Maytenus austroyunnanensis* in Xishuangbanna tropical rainforest revealed by culture-dependent and culture-independent methods. *Environ Microbiol Rep* 4:522-531. <https://doi.org/10.1111/j.1758-2229.2012.00357.x>
- Qiu D, Ruan J, Huang Y (2008) Selective isolation and rapid identification of members of the genus *Micromonospora*. *Appl Environ Microbiol* 74:5593–5597. <https://doi.org/10.1128/AEM.00303-08>
- Quezel P, Santa S (1962) Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques Méridionales. Editions du centre nationale de la recherche scientifique Paris Tome I.565.
- Quezel P, Santa S (1963) *Nouvelle Flore de l'Algérie et de ses régions désertiques méridionales, Tome II*. Paris: Éditions du centre national de la recherche scientifique. *Revue d'écologie (La Terre et la Vie)* 18(2):238.
- Quezel P (1965) La végétation du Sahara du Tchad à la Mauritanie. G. Fischer Stuttgart 333.
- Quezal P, Barbero M, Benabid A, Rivas-Martinez S (1994) Le passage de la végétation méditerranéenne saharienne sur les revers méridionaux du haut atlas oriental Maroc. *Phytoécologie* 22.
- Ramdane F, Mahammed MH, Hadj MDO, Chanai A, Hammoudi R, Hillali N, Bahaz C (2015) Ethnobotanical study of some medicinal plants from Hoggar, Algeria. *Journal of Medicinal Plants Research* 9:820-827.
- Reddy NG, Ramakrishna DPN, Prakash JS, Sastry KS, Sujatha P (2011) *Streptomyces hyderabadensis* sp. nov., isolated from soil. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 61: 2267–2271 <https://doi.org/10.1099/ijs.0.020446-0>
- Ribeiro I, Girão M, Alexandrino DAM, Ribeiro T, Santos C, Pereira F, Mucha PA, Urbatzka R, Leão PN, Carvalho MF (2020) Diversity and bioactive potential of actinobacteria isolated from a coastal marine sediment in northern Portugal. *Microorganisms* 8:1691. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8111691>
- Rodrigues JP, Peti APF, Figueiró FS, Rocha IS, Acquaro Junior VR, Silva TG, de Melo IS, Behlau F, Moraes LAB (2018) Bioguided isolation, characterization and media optimization for production of Lysolipins by actinomycete as antimicrobial compound against *Xanthomonas citri* subsp. *citri*. *Mol Biol Rep* 45(6):2455–2467. <https://doi.org/10.1007/s11033-018-4411-5>
- Rojas JL, Martín J, Tormo JR, Vicente F, Brunati M, Ciciliato I, Losi D, Van Trappen S, Mergaert J, Swings J, Marinelli F, Genilloud O (2009) Bacterial diversity from benthic mats

- of Antarctic lakes as a source of new bioactive metabolites. *Mar Genomics* 2:33–41. <https://doi.org/10.1016/j.margen.2009.03.005>
- Rong X, Huang Y (2012) Taxonomic evaluation of the *Streptomyces hygrosopicus* clade using multilocus sequence analysis and DNA–DNA hybridization, validating the MLSA scheme for systematics of the whole genus. *Systematic and Applied Microbiology* 35(1):7-18. <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2011.10.004>
- Ryan RP, Germaine K, Franks A, Ryan DJ, Dowling DN (2008) Bacterial endophytes: recent developments and applications. *FEMS Microbiol Lett* 27:11–19. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2007.00918.x>
- Sabaou N, Hacène H, Bennadji A, Bennadji H, Bounaga N (1992) Distribution quantitative et qualitative des actinomycètes dans les horizons de sol de surface et profonds d'une palmeraie algérienne. *Canadian Journal of Microbiology* 38(10): 988–995. <https://doi.org/10.1139/m92-175>
- Sabaou N, Bounaga N, Bennadji A, Mostefaoui A, Zitouni A, Boudjella H, Lefebvre G, Germain P (1998) Les sols des régions arides d'Algérie, source d'actinomycètes rares producteurs d'antibiotiques. *Can J Microbiol* 44:189–196.
- Sabu R, Soumya KR, Radhakrishnan EK (2017) Endophytic *Nocardiopsis* sp. from *Zingiber officinale* with both antiphytopathogenic mechanisms and antibiofilm activity against clinical isolates 3 Biotech 7:115. <https://doi.org/10.1007/s13205-017-0735-4>
- Sharma M (2014) Actinomycetes: source, identification, and their applications. *Int J Curr Microbiol Appl Sci* 3:801–832
- Saker R, Bouras N, Zitouni A, Ghouil M, Rhode M, Schumann P, Spröer C, Sabaou N, Klenk HP (2014) *Mzabimyces algeriensis* gen. nov., sp. nov., a halophilic filamentous actinobacterium isolated from Saharan soil, and proposal of *Mzabimycetaceae* fam. nov. *Antonie van Leeuwenhoek* 106:1021-1030. <https://doi.org/10.1007/s10482-014-0271-8>
- Salah SM, Jäger AK (2005) Two flavonoids from *Artemisia herba-alba* Asso with in vitro GABAa-benzodiazepine receptor activity. *J Ethnopharmacol* 99:145.
- Saleh NAM, El-Negoumy SI, Abou-Zaid MM (1987) Flavonoids of *Artemisia judaica*, *A. monosperma* and *Artemisia herba-alba*. *Phytochemistry* 26:3059–3064
- Saurav K, Kannabiran K (2010) Diversity and optimization of process parameters for the growth of *Streptomyces* VITSK9 spp. isolated from Bay of Bergal, India. *J Nat Env Sci* 1:56-65. <https://www.academia.edu/712973/>
- Shi, T., Wang, Y.-F., Wang, H., & Wang, B. (2022). *Genus Nocardiopsis: A prolific producer of natural products*. *Marine Drugs*, 20(6), 374. <https://doi.org/10.3390/md20060374>

- Shirling EB, Gottlieb D (1966) Methods for characterization of *Streptomyces* species. *Int J Syst Evol Bacteriol* 16:313-340. <https://doi.org/10.1099/00207713-16-3-313>
- Shirling EB, Gottlieb D (1968a) Cooperative description of type cultures of *Streptomyces*. II. Species descriptions from first study. *Int J Syst Bacteriol* 18:69–189. <https://doi.org/10.1099/00207713-18-2-69>
- Shirling EB, Gottlieb D (1968b) Cooperative description of type cultures of *Streptomyces*. III. Additional species descriptions from first and second studies. *Int J Syst Bacteriol* 18:279–392
- Shirling EB, Gottlieb D (1969) Cooperative description of type cultures of *Streptomyces*. IV. Species descriptions from the second, third and fourth studies. *Int J Syst Bacteriol* 19:391–512
- Shirling EB, Gottlieb D (1972) Cooperative description of type strains of *Streptomyces*. V. Additional descriptions. *Int J Syst Bacteriol* 22:265–394
- Singh R, Dubey AK (2018) Diversity and applications of endophytic actinobacteria of plants in special and other ecological niches. *Front Microbiol* 9:1767. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01767>
- Singha KM, Singh B, Pandey P (2021) Host specific endophytic microbiome diversity and associated functions in three varieties of scented black rice are dependent on growth stage. *Sci Rep* 11:12259. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91452-4>
- Silva LJ, Crevelin EJ, Souza DT, Lacerda-Júnior GV, de Oliveira VM, Ruiz ALT, Rosa LH, Moraes LAB, Melo IS (2020) Actinobacteria from Antarctica as a source for anticancer discovery. *Sci Rep* 10:69786. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69786-2>
- Silvey JKG, Roach AN (1975) The taste and odor producing aquatic actinomycetes. *Crit. Rev. Environ. Control* 5:233-273
- Sivalingam P, Hong K, Pote J, Prabakar K (2019) Extreme environment *Streptomyces*: Potential sources for new antibacterial and anticancer drug leads? *International Journal of Microbiology* : 5283948. <https://doi.org/10.1155/2019/5283948>
- Smati M, Kitouni M (2019) Diversity of actinobacteria in the marshes of Ezzemoul and Djendli in northeastern Algeria. *EJE* 5:41-53. <https://doi.org/10.2478/eje-2019-0009>
- Smibert RM, Krieg NR (1994) Phenotypic characterization. In: Gerhardt P, Murray RGE, Wood WA, Krieg NR (eds) *Methods for general and molecular bacteriology*, American Society for Microbiology, Washington. 611-651.
- Soares MMCN, Da Silva R, Gomes E (1999) Screening of bacterial strains for pectinolytic activity: characterization of the polygalacturonase produced by *Bacillus* sp. *Rev Microbiol* 30:299-303. <https://doi.org/10.1590/S0001-37141999000400002>
- Sommer P, Bormann C, Gotz F (1997) Genetic and biochemical characterization of a new extracellular lipase from *Streptomyces cinnamomeus*. *Appl Environ Microbiol* 63(9):3553–3560. <https://doi.org/10.1128/aem.63.9.3553-3560.1997>

- Souagui Y, Zitouni A, Bijani C, Mathieu F, Sabaou N, Lebrihi A (2015a) *Streptomyces* sp. SY-BS5, a novel alkaliphilic and halotolerant actinomycete isolated from an arid soil of Bousaada (Algeria) with antimicrobial activity. *Ann Microbiol* 65:1341–1350
- Souagui Y, Tritsch D, Grosdemange-Billiard C, Kecha M (2015b) Optimization of antifungal production by an alkaliphilic and halotolerant actinomycete, *Streptomyces* sp. SY-BS5, using response surface methodology. *Journal de Mycologie Médicale* 25(2): 108–115. <https://doi.org/10.1016/j.mycmed.2014.12.004>
- Soumare A, Boubekri K, Lyamlouli K, Hafidi M, Ouhdouch Y, Kouisni L (2021) Efficacy of phosphate solubilizing Actinobacteria to improve rock phosphate agronomic effectiveness and plant growth promotion. *Rhizosphere* 17:100284. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100284>
- Sreevidya M, Gopalakrishnan S, Kudapa H, Varshney RK (2016) Exploring plant growth-promotion actinomycetes from vermicompost and rhizosphere soil for yield enhancement in chickpea. *Braz J Microbiol* 47:85–95. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2015.11.030>
- Stackebrandt E, Goodfellow M (1991) *Nucleic Acid Techniques in Bacterial Systematics*; Wiley:Hoboken, NJ, USA.
- Strobel G, Daisy B, Castillo U, Harper J (2004) Natural products from endophytic microorganisms. *J Nat Prod* 67:257-268. <https://doi.org/10.1021/np030397v>
- Suganya K, Sudha B, Mishra B, Sumithra B, Mandal SK, Sumathi S (2022) Marine microbes as a resource for novel enzymes. In S Kumar, N Kumar, S ul-Islam (Eds.), *Marine Microbes: Ecology and Applications* (Chapter 5). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119901198.ch5>
- Swelam MS, El awady ME, El-khonezy MI, Hassan MG, Selim MS, Abdel Salam SS (2024) Screening and optimization of the production of xylanase enzyme from streptomycetes. *J Basic Environmental Sciences* 11:51-59. [https://journals.ekb.eg/article\\_373478\\_373395e0e4b892d7d5f13977f6d1a6a2.pdf](https://journals.ekb.eg/article_373478_373395e0e4b892d7d5f13977f6d1a6a2.pdf)
- Takahashi Y, Nakashima T (2018) Actinomycetes, an inexhaustible source of naturally occurring antibiotics. *Antibiotics* 7(2):45. <https://doi.org/10.3390/antibiotics7020045>
- Tamura T, Ishida Y, Otaguro M, Hatano K, Labeda D, Price NP, Suzuki K (2008) Reclassification of *Streptomyces caeruleus* as a synonym of *Actinoalloteichus cyanogriseus* and reclassification of *Streptomyces spheroides* and *Streptomyces laceyi* as later synonyms of *Streptomyces niveus*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 58:2812-2814. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.65560-0>
- Tanvir R, Sheikh AA, Javeed A (2019) Endophytic actinomycetes in the biosynthesis of bioactive metabolites: chemical diversity and the role of medicinal plants. *Stud Nat Prod Chem* 60:399–424. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64181-6.00011-5>
- Tesch C, Nikoleit K, Gnau V, Gotz F, Bormann C (1996) Biochemical and Molecular Characterization of the Extracellular Esterase from *Streptomyces diastatochromogenes*. *J Bacteriol* 178:1858-1865. <https://doi.org/10.1128/jb.178.7.1858-1865.1996>

- Thompson RM, Fox EM, Montero-Calasanz MDC (2024) Draft genome sequences of two *Micromonospora* strains isolated from the root nodules of *Alnus glutinosa*. *Microbiol Resour Announc* 13:e01131-23. <https://doi.org/10.1128/mra.01131-23>
- Thumar JT, Singh SP (2007) Secretion of an alkaline protease from a salttolerant and alkaliphilic *Streptomyces clavuligerus* Strain MIT-1. *Braz J Microbiol* 38: 766-772. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822007000400033>
- Tindall BJ, Rosselló-Móra R, Busse H-J, Ludwig W, Kämpfer P (2010) Notes on the characterization of prokaryote strains for taxonomic purposes. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 60(1):249–266. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.016949-0>
- Tiquia SM, Davis D, Hadid H, Kasparian S, Ismail M, Ahly S, Shim J, Singh S, Murray KS (2007) Halophilic and Halotolerant Bacteria from River Waters and Shallow Groundwater Along the Rouge River of Southeastern Michigan. *Environmental Technology* 28:297-307.
- Tiwari K, Gupta RK (2012) Rare actinomycetes: a potential storehouse for novel antibiotics. *Crit Rev Biotechnol* 32:108–132. <https://doi.org/10.3109/07388551.2011.562482>
- Tkacz A, Cheema J, Chandra G, Grant A, Poole P S (2015) Stability and succession of the rhizosphere microbiota depends upon plant type and soil composition. *ISME J* 9:2349–2359. <https://doi.org/10.1038/ismej.2015.41>
- Topkara AR, Saygin H, Saricaoglu S, Veyisoglu A, Tokatli A, Guven K, Cetin D, Isik K (2025) Whole genome sequence-based classification of *Nonomuraea marmarensis* sp. nov., isolated from island soil. *Taxonomy* 5:5. <https://doi.org/10.3390/taxonomy5010005>
- Toumatia O, Yekkour A, Goudjal Y, Riba A, Coppel Y, Mathieu F, Sabaou N, Zitouni A (2015) Antifungal properties of an actinomycin D-producing strain, *Streptomyces* sp. IA1, isolated from a Saharan soil. *J Basic Microbiol* 55(2):221–228. <https://doi.org/10.1002/jobm.201400202>
- Tresner HD, Davies MC, Backus EJ (1961) Electron microscopy of *Streptomyces* spore morphology and its role in species differentiation. *J Bacteriol* 81: 70-80.
- Tresner HD, Hayes JA, Backus EJ (1968) Differential tolerance of Streptomycetes to sodium chloride as a taxonomic aid. *Applied Microbiology* 16:1134–1136. <https://doi.org/10.1128/am.16.8.1134-1136.1968>
- Trujillo ME, Alonso-Vega P, Rodriguez R, Carro L, Cerda E, Alonso P, et al (2015) Endophytic actinobacteria and the interaction of *Micromonospora* with plants. *Front Microbiol* 6:1341. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01341>
- Tsilinsky P (1899) Sur les mucédinées thennophiles. *Annales de ZYmtitut Pasteur* 500-505
- Tsukamura M (1971) Proposal of a new genus, *Gordona*, for slightly acid-fast organisms

occurring in sputa of patients with pulmonary disease and in soil. *J Gen Microbiol* 68:15–26. <https://doi.org/10.1099/00221287-68-1-15>

Tuomela M, Vikman M, Hatakka A, Itävaara M (2000) Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. *Biores Technol* 72:169-183. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00104-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00104-2)

Valles J, McArthur ED (2001) *Artemisia* systematics and phylogeny: cytogenetic and molecular in sights. In proceedings: McArthur ED and Fairbanks DJ (eds.), Shrubland ecosystem genetics and biodiversity; 2000 June 13-15 Provo, UT Ogden: US department of agriculture forest service, Rocky Mountain research station 67-74.

Veilumuthu P, Nagarajan T, Magar S, Sundaresan S, Moses LJ, Theodore T, Christopher JG (2024) Genomic insights into an endophytic *Streptomyces* sp. VITGV156 for antimicrobial compounds. *Front Microbiol* 15:1407289. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1407289>

Ventura M, Canchaya C, Tauch A, Chandra G, Fitzgerald GF, Chater KF, van Sinderen D (2007) Genomics of Actinobacteria: tracing the evolutionary history of an ancient phylum. *Microbiol. Mol. Biol. Rev* 71:495-548.

Verma VC, Gond SK, Kumar A, Mishra A, Kharwar RN, Gange AC (2009) Endophytic Actinobacteria from *Azadirachta indica* A. Juss.: Isolation, Diversity, and Anti-microbial Activity. *Microb. Ecol* 57:749-756. <https://doi.org/10.1007/s00248-008-9450-3>

Vernin G, Merad O, Vernin GMF, [Zamkotsian R](#), [Párkányi C](#) (1995) GC-MS analysis of *Artemisia herba-alba* Asso essential oils from Algeria. [Developments in Food Science](#) Elsevier 37:147-205. [https://doi.org/10.1016/S0167-4501\(06\)80157-3](https://doi.org/10.1016/S0167-4501(06)80157-3)

Viaene T, Langendries S, Beirinckx S, Maes M, Goormachtig S (2016) *Streptomyces* as a plant's best friend? *FEMS Microbiol Ecol* 92:fiw119. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiw119>

Viana Marques DDA, Machado SEF, Ebinuma VCS, Duarte CDAL, Converti A, Porto ALF (2018) Production of  $\beta$ -Lactamase inhibitors by *Streptomyces* species. *Microb Ecol* 7:61. <https://doi.org/10.3390/antibiotics7030061>

Vijayakumar R, Muthukumar C, Thajuddin N, Panneerselvam A, Saravanamuthu R (2007) Studies on the diversity of actinomycetes in the Palk Strait region of Bay of Bengal, India. *Environmental Science, Biology, Actinomycetologica*.

Vrancken J, Brochmann C, Wesselingh RA (2009) How did an annual plant react to Pleistocene glaciations? Postglacial history of *Rhinanthus angustifolius* in Europe. *Biological Journal of the Linnean Society* 98:1–13. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8312.2009.01261.x>

Waithaka P N (2022) Effect of cultural conditions and physical factors on production of antibiotic metabolites by selected actinomycetes. *Archives of Ecotoxicology* 4:67–76.

Waksman SA, Henrici AT (1943) The nomenclature and classification of the actinomycetes. *Journal of Bacteriology* 46:337–341. <https://doi.org/10.1128/jb.46.4.337-341.1943>

- Wang Y, Zhang Y, Cong H, Li C, Wu J, Li L, Jiang J, Cao X (2023) Cultivable endophyte resources in medicinal plants and effects on hosts. *Life (Basel)* 13:1695. <https://doi.org/10.3390/life13081695>
- Watson LE, Bates PL, Evans TM, Unwin MM, Estes JR (2002) Molecular Phylogeny of subtribe *Artemisiinae* (*Asteraceae*), including *Artemisia* and its allied and segregate genera. *BMC Evol. Biol* 2: 17-29. <http://www.biomedcentral.com/1471-2148/2/17>
- Wayne LG, Brenner DJ, Colwell RR, Grimont PAD, Kandler O, Krichevsky MI, Moore LH, Moore WEC, Murray RGE, Stackebrandt E, Starr MP, Trüper HG (1987) Report of the Ad Hoc Committee on Reconciliation of Approaches to Bacterial Systematics. *International Journal of Systematic Bacteriology* 37:463-464. <https://doi.org/10.1099/00207713-37-4-463>
- Wichtl M, Anton R (2003) *Plantes thérapeutiques (tradition, pratique officinale, science et thérapeutique)*. Deuxième édition .
- Wietzorrek A, Bibb M (1997) A novel family of proteins that regulates antibiotic production in streptomycetes appears to contain an OmpR-like DNA-binding fold. *Mol Microbiol* 25(6):1181–1184. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2958.1997.5421903.x>
- Williams ST, Goodfellow M, Alderson G, Wellington EMH, Sneath PHA, Sackins MJ (1983) Numerical Classification of *Streptomyces* and Related Genera. *Journal of General Microbiology* 129: 1743-1813.
- Williams ST, Wellington EMH (1984) Ecology of Actinomycetes. In: Goodfellow M, (Eds), *The biology of the Actinomycetes*. London 481-528
- Williams ST, Baltimore, Wihs (1986) *Bergey's manual of systematic bacteriology* 2299-2648
- Williams ST, Sharpe ME, Holt JG (1989) *Bergey's manual of systematic bacteriology*, Vol. 4. Williams and Wilkins, Baltimore.
- Worsley SF, Newitt J, Rassbach J, Batey SF, Holmes NA, Murrell JC, Wilkinson B, Hutchings MI (2020) *Streptomyces* endophytes promote host health and enhance growth across plant species. *Appl Environ Microbiol* 86:e01053-e1120. <https://doi.org/10.1128/AEM.01053-20>
- Wu W, Chen W, Liu S, Wu J, Zhu Y, Qin L, Zhu B (2021) Beneficial relationships between endophytic bacteria and medicinal plants. *Front Plant Sci* 12:646146. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.646146>
- Xie F, Pathom-aree W (2021) Actinobacteria from desert: Diversity and biotechnological applications. *Front Microbiol* 12: 765531. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.765531>
- Yashphe J, Feuerstein I, Barel S, Segal R (2008) The antibacterial and antispasmodic activity of *Artemisia herba-alba* Asso. II. Examination of essential oils from various chemotypes. *Int J Crude Drug Res* 25: 89 <https://doi.org/10.3109/13880208709088133>
- Yassin AF, Galinski EA, Wohlfarth A, Jahnke KD, Schaal KP, Trüper HG (1993) A new actinomycete species *Nocardopsis lucentensis* sp. nov. *Int. J. Syst. Bacteriol* 43:266-271.

- Yassin AF, Rainey FA, Burghardt J, Gierth D, Ungerechts J, Lux I, Seifert P, Bal C, Schaal KP (1997) Description of *Nocardiopsis synnemataformans* sp. nov., elevation of *Nocardiopsis alba* subsp. *prasina* to *Nocardiopsis prasina* comb. nov., and designation of *Nocardiopsis antarctica* and *Nocardiopsis alborubida* as later subjective synonyms of *Nocardiopsis dassonvillei*. *Int J Syst Evol Microbiol* 47:983–988. <https://doi.org/10.1099/00207713-47-4-983>
- Yekkour A, Meklat A, Bijani C, Toumatia O, Errakhi R, Lebrihi A, Mathieu F, Zitouni A, Sabaou N (2015) A novel hydroxamic acid-containing antibiotic produced by a Saharan soil-living *Streptomyces* strain. *Lett Appl Microbiol* 60: 589–596. <https://doi.org/10.1111/lam.12412>
- Yu JB, Bai M, Wang C, Wu H, Liang X (2024) Regulation of secondary metabolites accumulation in medicinal plants by rhizospheric and endophytic microorganisms. *Med Plant Biol* 3:e011. <https://doi.org/10.48130/mpb-0024-0011>
- Yushchuk O, Vior NM, Andreo-Vidal A, Berini F, Rückert C, Busche T, Binda E, Kalinowski J, Truman AW, Marinelli F (2021) Genomic-led discovery of a novel glycopeptide antibiotic by *Nonomuraea coxensis* DSM 45129. *ACS Chem Biol* 16:915–928. <https://doi.org/10.1021/acscchembio.1c00170>
- Zamoum M, Goudjal Y, Sabaou N, Barakate M, Mathieu F, Zitouni A (2015) Biocontrol capacities and plant growth-promoting traits of endophytic actinobacteria isolated from native plants of Algerian Sahara. *Journal of Plant Diseases and Protection* 122(5–6): 215–223. <https://doi.org/10.1007/BF03356555>
- Zhang Z, Wang Y, Ruan J (1998) Reclassification of *Thermomonospora* and *Microtetraspora*; establishment of the genus *Nonomuraea* gen. nov. *Int J Syst Bacteriol* 48:411–422. <https://doi.org/10.1099/00207713-48-2-411>
- Zhang X, Ren K, Du J, Liu H, Zhang L (2014) *Glycomyces artemisiae* sp. nov., an endophytic actinomycete isolated from the roots of *Artemisia argyi*. *Int J Syst Evol Microbiol* 64:3492–3495 <https://doi.org/10.1099/ijs.0.063388-0>
- Zhang Y, Han L, Chen C, Yang L, Fu J, Zhang X, Li W, Zhang L (2018) *Streptomyces qaidamensis* sp. nov., a novel actinobacterium isolated from desert sand in the Qaidam Basin. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 68: 3857–3863
- Zhao G-Z, Li J, Huang H-Y, Qin S, Wang Y, Zhang Y-Q, Zhu W-Y, Jiang C-L, Xu L-H, Li W-J (2009) *Streptomyces xinghaiensis* sp. nov., isolated from marine sediment. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 59(4):991–995. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.005041-0>
- Zhao GZ, Li J, Huang HY, Zhu WY, Zhao LX, Tang SK, Xu LH, Li WJ (2010) *Streptomyces artemisiae* sp. nov., isolated from surface-sterilized tissue of *Artemisia annua* L. *Int J Syst Evol Microbiol* 60:27–32. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.011965-0> **Error! Bookmark not defined.**
- Zhao K, Penttinen P, Xiao TGJ, Chen Q, Xu J (2011) The Diversity and antimicrobial activity of endophytic actinobacteria isolated from medicinal plants in Panxi Plateau, China. *Curr Microbiol* 62:182–190. <https://doi.org/10.1007/s00284-010-9685-3>

Zhao GZ, Li J, Zhu WY, Wei DQ, Zhang JL, Xu LH, Li WJ (2012a) *Pseudonocardia xishanensis* sp. nov., an endophytic actinomycete isolated from the roots of *Artemisia annua* L. *Int J Syst Evol Microbiol* 62: 2395-2399. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.037028-0>

Zhao GZ, Li J, Zhu WY, Tian SZ, Zhao LX, Yang LL, Xu LH, Li WJ (2012b) *Rhodococcus artemisiae* sp. nov., an endophytic actinobacterium isolated from the pharmaceutical plant *Artemisia annua* L. *Int J Syst Evol Microbiol* 62: 900-905. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.031930-0>

Zin NM, Sarmin NI, Ghadin N, Basri DF, Sidik NM, Hess WM, Strobel GA (2007) Bioactive endophytic *Streptomyces* from the Malay Peninsula. *FEMS Microbiol Lett* 274:83-88. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2007.00819.x>

Zitouni A, Lamari L, Boudjella H, Badji B, Sabaou N, Gaouar A, Mathieu F, Lebrihi A, Labeda DP (2004) *Saccharothrix algeriensis* sp. nov., isolated from Saharan soil. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol* 54:1377-1381.

Zitouni, A., Boudjella, H., Lamari, L., Badji, B., Mathieu, F., Lebrihi, A., & Sabaou, N. (2005). *Nocardiopsis* and *Saccharothrix* genera in Saharan soils in Algeria: Isolation, biological activities and partial characterization of antibiotics. *Research in Microbiology*, 156(9), 984–993. <https://doi.org/10.1016/j.resmic.2005.05.006>

## **ANNEXES**

**Annexe. 1**

Composition de bouillon Tryptone-Soja TSB (Downes et al. 2001).

Compositions	Milieux	TSB
<b>Peptone de caséine</b>		17g
<b>Peptone de soja</b>		03g
<b>Glucose</b>		2.5g
<b>K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub></b>		2.5g
<b>NaCl</b>		05g
<b>Eau distillée</b>		1L
<b>pH</b>		7.2

**Annexe. 2**

Composition de la gélose tryptone soja TSA (Downes et al. 2001).

Compositions	Milieux	TSA
<b>Peptone de caséine</b>		15g
<b>Peptone de soja</b>		05g
<b>NaCl</b>		05g
<b>Agar</b>		15g
<b>Eau distillée</b>		1L
<b>pH</b>		7.2

**Annexe. 3**

Solution à 0,3% de rouge Congo :

- **Congo Red** : 0,3 g
- **Eau distillée** : 100 mL

**Annexe. 4**

Pour préparer une solution de **NaCl à 1 M**, voici la composition :

- **NaCl (chlorure de sodium)** : 58,44 g
- **Eau distillée** : 1 litre

**Annexe.5**

Solution saline (Ghodsalavi et al. 2013).

- 05 mg/L de FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O
- 1,6 mg/L de MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O
- 1,4 mg/L de ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O
- 02 mg/L de CoCl<sub>2</sub>

### Annexe. 6

Les souches suivantes issues de la **collection American Type Culture Collection (ATCC)** ont également été utilisées : *Escherichia coli* ATCC 29522, *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 29553, *Staphylococcus aureus* ATCC 29213, *Staphylococcus aureus* ATCC 29523, *Salmonella typhimurium* ATCC 14028,

L'ensemble des souches bactériennes a été préalablement caractérisé pour leur **sensibilité aux antibiotiques** à l'aide d'un panel de huit antibiotiques commerciaux : **OX** (Oxacilline), **CAZ** (Ceftazidime), **IMI** (Imipénème), **PENI G** (Pénicilline G), **AK** (Amikacine), **GEN** (Gentamicine), **VANCO** (Vancomycine) et **ERYTHRO** (Érythromycine).

**Tableau 1.** Test de sensibilité aux antibiotiques des souches de référence.

Souches	OX	CAZ	IMI	PENI G	AK	GEN	VANCO	ERYTHRO
<i>Escherichia coli</i> ATCC 29522	R	S	/	/	S	S	/	/
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC 29553	/	S	S	/	S	S	/	/
<i>Salmonella typhimurium</i> ATCC 14028	R	/	I	/	/	/	/	/
<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 29213	/	/	/	R	/	/	R	I

R = Résistant ; S = Sensible ; I = Intermédiaire ; / = Non testé.

### Annexe 7

La souche **AL30** présentait le profil de résistance le plus étendu, montrant une résistance à **20 des 24 antibiotiques testés**. La **Figure 1** illustre quelques images d'**antibiogrammes** correspondant à cette souche.

