



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



# Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : SCIENCES

DEPARTEMENT : SCIENCES AGRONOMIQUES

## MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : **BENHAMIDA Khadidja**

DOMAINE : SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE (SNV)

FILIERE : SCIENCES AGRONOMIQUES

OPTION : PROTECTION DES VEGETAUX

### Thème

**Isolement et identification de *Trichoderma* sp. à partir de quelques plantes spontanées, dans la région de Laghouat.**

#### Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
AMARA Yacine	MCB	Président
ZAZA Messaouda	MAA	Examineur
MARFOUA Mériem	MCA	Rapporteur
BENHAFFAF Fatima		Co-rapporteur

Promotion : Juin - 2024

---

## *Dédicaces*

---

À mes chers parents

Ce mémoire est le fruit de vos encouragements constants et de votre confiance en moi. Sans votre patience, vos conseils et votre dévouement, ce voyage académique n'aurait pas été possible. Je vous remercie du fond du cœur pour tout ce que vous avez fait pour moi. Vous êtes mes héros et ma plus grande motivation

À mes chers frères

Abd-el-Hamid, pour ta sagesse et tes conseils avisés. À Hichem, pour ton soutien indéfectible et ta bonne humeur contagieuse. À Taher, pour ta persévérance et ton esprit combatif qui m'inspirent chaque jour. À Youcef, pour ton enthousiasme et ta capacité à me remonter le moral dans les moments difficiles. Chacun de vous a contribué à ma réussite de manière unique et précieuse. Je vous dédie ce mémoire en signe de profonde gratitude et d'affection sincère. Merci pour tout

À mes chères sœurs

À Fatima, pour ta sagesse et ton soutien inébranlable. À Aicha, pour ta gentillesse et ta capacité à illuminer mes journées. Chacune de vous a apporté une contribution unique et précieuse à ma réussite. Je vous dédie ce mémoire en signe de profonde gratitude et d'affection sincère. Merci pour tout.

À Amina

Nous avons surmonté les défis et célébré les succès. Je te remercie du fond du cœur pour ta collaboration précieuse et ton amitié sincère. Cette réussite est autant la tienne que la mienne. Merci pour cette belle expérience partagée

À mes amis et à toutes les personnes qui m'ont aidé

À mes amis, pour votre amitié sincère, votre soutien constant et les moments de joie partagés. À tous ceux qui m'ont aidé, pour vos conseils précieux, votre encouragement et votre aide inestimable. Votre soutien et votre aide ont été essentiels à l'accomplissement de ce travail. Merci infiniment pour tout ce que vous avez fait pour moi.

*BENHAMIDA Khadidja*

---

# Remerciements

---

Je remercie tout d'abord le bon Dieu tout puissant qui m'a donné la force et le courage pour terminer ce travail ;

Après avoir achevé ce travail, je m'aperçois que le plus dur reste à faire qui remercierais-je en premier ? quand je sais que la contribution de tous est efficiente.

- Ma profonde gratitude va à ma promotrice, le docteur MARFOUA Mériem. à l'université Amar TELIDJI -Laghouat-, pour l'insigne honneur qu'elle m'a fait en acceptant de me diriger pour la réalisation de ce travail.
- Mes sincères remerciements et ma respectueuse gratitude vont au doctorante Madame BENHAFFAF Fatima à l'université Amar TELIDJI -Laghouat-, qui a dirigé ce travail, m'a apporté toute sa compétence et son aide. Je suis infiniment reconnaissante pour sa disponibilité, ses conseils et ses idées malgré ses préoccupations.
- Avec beaucoup de plaisir, j'exprime ma reconnaissance au docteur Monsieur AMARA Yacine à l'université Amar TELIDJI -Laghouat- pour avoir accepté de présider cette séance.
- Que soient également vivement remercier, Madame ZAZA Messaouda à l'Université Amar TELIDJI -Laghouat- pour son obligeance en examinant ce travail.

Enfin, que celles et ceux qui m'ont apporté leur aide pour la réalisation de cet ouvrage trouvent ici ma profonde sympathie.

BENHAMIDA Khadidja

**BENHAMIDA K. (2024) : Isolement et caractérisation de *Trichoderma* sp. à partir de quelques plantes spontanées, dans la région de Laghouat.**

**Résumé**

L'agriculture intensive, bien qu'essentielle pour répondre aux besoins alimentaires, entraîne souvent une dégradation des sols et une pollution des eaux dues à l'utilisation excessive de fertilisants chimiques. Les biofertilisants, provenant de micro-organismes bénéfiques, offrent une alternative écologique en améliorant la disponibilité des nutriments et la structure du sol. Ils renforcent également la résilience des cultures face aux stress abiotiques. Les champignons de sol jouent un rôle clé dans la résilience des systèmes agricoles aux changements climatiques. Cette étude vise à explorer la diversité des champignons de sol dans la rhizosphère de plantes spontanées de la région de Laghouat, à identifier les espèces présentes et à évaluer leur potentiel en tant qu'agents de biocontrôle contre les pathogènes des plantes. L'isolement fongique a été réalisé à partir de plantes spontanées collectées dans diverses zones de Laghouat. Les isolats fongiques ont été cultivés sur un milieu PDA, et leur identification a été effectuée par des observations microscopiques et macroscopiques. Les isolats ont ensuite été testés pour leur tolérance à différents facteurs abiotiques, notamment la température et le pH, et pour leur potentiel antagoniste contre des pathogènes phytopathogènes. 357 colonies fongiques ont été recensées, réparties en 13 isolats appartenant à cinq genres : *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Rhizopus* et *Alternaria*. Les genres les plus abondants étaient *Aspergillus* et *Penicillium*, avec une distribution variée selon les échantillons de sol. Les tests de croissance ont montré que les températures optimales pour le développement des isolats variaient entre 22°C et 37°C. Aucune croissance n'a été observée à 45°C. Certains isolats d'*Aspergillus* et de *Penicillium* ont montré une capacité antagoniste efficace contre des pathogènes fongiques. Cette étude met en lumière la diversité et le potentiel des champignons de sol isolés à partir de plantes spontanées de Laghouat. Les isolats identifiés pourraient jouer un rôle crucial dans le développement de stratégies de gestion intégrée des ravageurs, contribuant à des systèmes agricoles plus durables et résilients.

**Mots clés :**

Isolats fongique, biodiversité, biocontrôle, Laghouat, plantes spontanées.

## ملخص

تلعب الفطريات التربة دورًا رئيسيًا في مقاومة النظم الزراعية للتلوثات المناخية. تهدف هذه الدراسة إلى استكشاف تنوع الفطريات التربة في الجذور المحيطة بالزبانات البرية في منطقة الغواط، وتحديد الأنواع الموجودة وتقييم قدرتها كعوامل مكافحة حيوية ضد مسببات الأمراض النباتية. تم عزل الفطريات من الزبانات البرية التي تم جمعها من مناطق مخبأة من الغواط. تم زراعة الفطريات المعزولة على وسط PDA، وتم إجراء توصيفها من خلال الملاحظات المجهرية والحيوية. تم اختبار النجمل للعوامل اللقاحية المخبأة، بما في ذلك درجة الحرارة ودرج الحموضة،

والقدرة المضادة للفطريات ضد مسببات الأمراض الفطرية. تم تسجيل 357 مستعمرة فطرية، موزعة إلى 13 معزولة يُنسبون إلى خمسة أجناس: (*Aspergillus*)، (*Penicillium*)، (*Fusarium*)، (*Rhizopus*) و (*Alternaria*) كانت الأجناس الأكثر وفرة هي (*Aspergillus*)، (*Penicillium*)، مع توزيع متنوع حسب عينات التربة. أظهرت اختبارات النمو أن درجات الحرارة المثلى لتطور المعزولات تراوحت بين 22°م و 37°م. لم يُلاحظ أي نمو عند

45°م. أظهرت بعض (*Aspergillus*)، (*Penicillium*)، قدرة مضادة فعالة ضد مسببات الأمراض معزولة

الفطرية. تسلط هذه الدراسة الضوء على تنوع وإمكانية الفطريات التربة المعزولة من الزبانات البرية في الغواط. يمكن أن تلعب المعزولة المحددة دورًا حاسمًا في تطوير استراتيجيات إدارة متكاملة للآفات، مما يساهم في نظم

تداعية

أكثر استدامة ومرونة.

## الكلمات الدالة :

عزلة فطرية، التنوع البيولوجي، المكافحة الحيوية، الغواط، الزبانات البرية.

***BENHAMIDA K. (2024): Isolation and characterization of Trichoderma sp. from some spontaneous plants in the Laghouat region.***

### **Summary**

Intensive agriculture, while essential for meeting food demands, often leads to soil degradation and water pollution due to excessive use of chemical fertilizers. Biofertilizers, derived from beneficial microorganisms, offer an ecological alternative by improving nutrient availability and soil structure. They also enhance crop resilience to abiotic stress. Soil fungi play a key role in the resilience of agricultural systems to climate change. This study aims to explore the diversity of soil fungi in the rhizosphere of spontaneous plants in the Laghouat region, identify the species present, and evaluate their potential as biocontrol agents against plant pathogens. Fungal isolation was carried out from spontaneous plants collected in various areas of Laghouat. The fungal isolates were cultivated on PDA medium, and their characterization was performed through microscopic and macroscopic observations. The isolates were then tested for their tolerance to different abiotic factors, including temperature and pH, and for their antagonistic potential against phytopathogenic pathogens. A total of 357 fungal colonies were recorded, divided into 13 isolates belonging to five genera: *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Rhizopus*, and *Alternaria*. The most abundant genera were *Aspergillus* and *Penicillium*, with varied distribution according to soil samples. Growth tests showed that the optimal temperatures for isolate development ranged between 22°C and 37°C. No growth was observed at 45°C. Some *Aspergillus* and *Penicillium* isolates exhibited effective antagonistic capacity against fungal pathogens. This study highlights the diversity and potential of soil fungi isolated from spontaneous plants in Laghouat. The identified isolates could play a crucial role in developing integrated pest management strategies, contributing to more sustainable and resilient agricultural systems.

### **Key words:**

Fungal isolates, biodiversity, biocontrol, Laghouat, spontaneous plants.

# Liste des tableaux

---

<b>Tableau 1</b>	Caractéristiques géographiques des trois zones d'échantillonnage	<b>20</b>
<b>Tableau 2</b>	Liste des échantillons de différents types de sol rhizosphérique des plantes spontanées collectés dans différentes zones de Laghouat	<b>22</b>
<b>Tableau 3</b>	Identification des isolats fongiques isolées des échantillons de rhizosphère des plantes spontanées de Laghouat	<b>41</b>
<b>Tableau 4</b>	Taux d'inhibition (en pourcentage) de la croissance mycélienne des agents pathogènes étudiés par méthode des disques	<b>51</b>
<b>Tableau 5</b>	Taux d'inhibition (en pourcentage) de la croissance mycélienne des agents pathogènes étudiés par méthode des stries et du disque	<b>53</b>
<b>Tableau 6</b>	Taux d'inhibition (en pourcentage) de la croissance mycélienne des agents pathogènes étudiés par méthode de confrontation indirecte	<b>57</b>

# Liste des figures

---

<b>Figure 1</b>	Localisation géographique des sites de prélèvement des échantillons de sol rhizosphérique	<b>21</b>
<b>Figure 2</b>	Techniques de purification des colonies sur PDA	<b>24</b>
<b>Figure 3</b>	Caractéristiques morphologiques du genre <i>Aspergillus</i>	<b>25</b>
<b>Figure 4</b>	Caractéristiques morphologiques du genre <i>Penicillium</i>	<b>27</b>
<b>Figure 5</b>	Caractéristiques morphologiques du genre <i>Alternaria</i>	<b>27</b>
<b>Figure 6</b>	Caractéristiques morphologiques du genre <i>Fusarium</i>	<b>28</b>
<b>Figure 7</b>	Caractéristiques morphologiques du genre <i>Rhizopus</i>	<b>29</b>
<b>Figure 8</b>	Confrontation directe (méthode des disques) entre le champignon pathogène et le champignon antagoniste sur milieu PDA	<b>29</b>
<b>Figure 9</b>	Confrontation directe (méthode de disques et stries) entre le champignon pathogène et le champignon antagoniste sur milieu PDA	<b>33</b>
<b>Figure 10</b>	Confrontation à distance entre l'antagoniste et l'agent pathogène	<b>34</b>
<b>Figure 11</b>	Méthodologie de travail	<b>34</b>
<b>Figure 12</b>	Exemple de l'aspect des colonies obtenues sur le milieu PDA	<b>36</b>
<b>Figure 13</b>	Nombre des genres en fonction des dilutions	<b>39</b>
<b>Figure 14</b>	Nombre total de genres identifiés dans les échantillons du sol étudiés	<b>40</b>
<b>Figure 15</b>	Abondance relative des espèces fongiques par site d'étude	<b>44</b>

## Liste des figures

<b>Figure 16</b>	Effet de la variation de la température sur le diamètre des colonies des isolats fongiques après 7 jours d'incubation	<b>44</b>
<b>Figure 17</b>	Effet de la variation de la température sur le diamètre des colonies des isolats fongiques après 7 jours d'incubation	<b>45</b>
<b>Figure 18</b>	Effet de la variation du pH sur le diamètre des colonies des isolats fongiques après 5 jours d'incubation	<b>47</b>
<b>Figure 19</b>	Effet de la variation du pH sur le diamètre des colonies des isolats fongiques après 9 jours d'incubation	<b>48</b>
<b>Figure 20</b>	Effet d'inhibition de la croissance mycélienne de <i>Fusarium oxysporium</i> F,sp, <i>Albedinis</i> (FAO) par confrontation directe (méthode des disques) en présence des champignons rhizosphériques après 7 jours d'incubation	<b>50</b>
<b>Figure 21</b>	Effet d'inhibition de la croissance mycélienne de <i>Fusarium culmorum</i> , par confrontation directe (méthode des disques), en présence des champignons rhizosphériques après 7 jours d'incubation	<b>51</b>
<b>Figure 22</b>	Effet d'inhibition de la croissance mycélienne de <i>Fusarium graminearum</i> , par confrontation directe (méthode des disques), en présence des champignons rhizosphériques après 7 jours d'incubation	<b>52</b>
<b>Figure 23</b>	Effet d'inhibition de la croissance mycélienne de <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>Albedinis</i> (FOA), par confrontation directe (méthode des stries et du disque), en présence des champignons rhizosphériques après 7 jours d'incubation	<b>53</b>
<b>Figure 24</b>	Effet d'inhibition de la croissance mycélienne de <i>Fusarium culmorum</i> , par confrontation directe (méthode des stries et du disque), en présence des champignons rhizosphériques après 7 jours d'incubation	<b>54</b>
<b>Figure 25</b>	Effet d'inhibition de la croissance mycélienne de <i>Fusarium graminearum</i> , par confrontation directe (méthode des stries et du disque), en présence des champignons rhizosphériques après 7 jours d'incubation	<b>55</b>
<b>Figure 26</b>	Effet d'inhibition de la croissance mycélienne de FOA, <i>F. culmorum</i> et <i>F. graminearum</i> , par confrontation indirecte, en présence d' <i>Aspergillus fumigatus</i> et <i>Aspergillus sp6</i> après 7 jours d'incubation	<b>55</b>

---

# Sommaire

---

<b>Dédicace</b>	<b>I</b>
<b>Remerciements</b>	<b>II</b>
<b>Résumé</b>	<b>III</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>IV</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>V</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>4</b>
<b>Première partie : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	<b>5</b>
<b>Chapitre I : Microflore du sol</b>	<b>6</b>
<b>I-1</b> Caractéristiques de microflore	<b>6</b>
<b>I-2</b> Rôle de la microflore du sol	<b>6</b>
<b>I-3</b> Composition des champignons de la microflore	<b>7</b>
<b>I-4</b> Caractéristiques des champignons de la microflore	<b>7</b>
<b>I-5</b> Rôle des champignons dans le sol	<b>7</b>
<b>I-6</b> Diversité et contribution à la biodiversité	<b>9</b>
<b>I-6-1</b> Mécanismes de biocontrôle	<b>9</b>
<b>I-6-2</b> Production de métabolites antimicrobiens	<b>9</b>
<b>I-6-3</b> Compétition pour les nutriments et l'espace	<b>9</b>
<b>I-6-4</b> Induction de la Résistance Systémique (ISR)	<b>10</b>
<b>Chapitre II : Lutte biologique</b>	<b>10</b>
<b>II-1</b> Champignons du sol comme agents de lutte biologique	<b>10</b>
<b>II-2</b> Avantages de la lutte biologique avec les champignons du sol	<b>10</b>
<b>II-3</b> Quelques applications pratiques de l'utilisation des champignons du sol	<b>11</b>
<b>II-3-1</b> Traitement des semences	<b>11</b>
<b>II-3-2</b> Formulations de biopesticides	<b>11</b>
<b>II-3-3</b> Amendements du sol	<b>13</b>
<b>II-3-4</b> Réhabilitation des sols dégradés	<b>14</b>
<b>II-3-5</b> Production de composés bioactifs	<b>15</b>
<b>II-4</b> Défis et perspectives de la lutte biologique avec les champignons du sol	<b>15</b>
<b>Deuxième partie : MATERIEL &amp; METHODES</b>	<b>16</b>
<b>Chapitre I : Description générale de la zone d'étude</b>	<b>17</b>
<b>I-1</b> Cadre physique	<b>8</b>
<b>I-1-1</b> Géomorphologie et pédologie	<b>18</b>

I-1-2	Caractéristiques climatiques	18
I-2	Cadre biotique	19
	<b>Chapitre II : Méthodes d'étude</b>	<b>20</b>
II-1	<b>Objectif</b>	<b>20</b>
II-2	Méthode d'échantillonnage	20
II-2-1	Milieu de culture	21
II-3	Technique d'isolement des microorganismes du sol	23
II-3-1	Méthode de dilution	23
II-3-2	Ensemencement sur milieu solide	24
II-3-3	Dénombrement des colonies et purification	24
II-3-4	Identification des microorganismes	24
II-4	Caractérisation macroscopique	25
II-4-1	Caractères morphologiques microscopiques	25
II-4-2	Conservation des isolats	25
II-5	Quelques données sur les genres isolées	26
II-5-1	Le genre <i>Aspergillus</i>	26
II-5-2	Le genre <i>Penicillium</i>	26
II-5-3	Le genre <i>Alternaria</i>	27
II-5-4	Le genre <i>Fusarium</i>	28
II-5-5	Le genre <i>Rhizopus</i>	28
II-5-6	Tolérance des isolats aux quelques facteurs abiotiques	29
II-6	Effet de la température sur la croissance des isolats	30
II-6-1	Effet de pH sur la croissance des isolats	31
II-6-2	Evaluation de l'activité antagoniste des isolats	31
II-7	Confrontation directe	32
II-7-1	Confrontation indirecte	32
II-7-2	Analyses statistiques et paramètres étudiés	34
	<b>Troisième partie : RESULTATS &amp; DISCUSSIONS</b>	<b>35</b>
	<b>Chapitre I : Analyse mycologique</b>	<b>39</b>
I-1	Répartition du nombre de colonies par échantillon	39
I-2	Caractérisation des souches isolées	39
I-3	Dénombrement des genres fongiques par dilution	40
I-4	Nombre de genres par échantillon	44
I-5	Abondance relative des espèces fongiques par site d'étude	44
	<b>Chapitre II : Caractérisation physiologique</b>	<b>45</b>
II-1	Tolérance des isolats fongiques aux quelques facteurs abiotiques	47

<b>II-1-1</b>	Effet de la température sur le diamètre des colonies des isolats fongiques	<b>47</b>
<b>II-1-2</b>	Effet de pH sur le diamètre des colonies des isolats fongiques	<b>47</b>
<b>II-2</b>	Evaluation de l'activité antagoniste des isolats fongiques	<b>49</b>
<b>II-2-1</b>	Confrontation directe	<b>50</b>
<b>II-3</b>	Confrontation indirecte	<b>50</b>
	<b>Discussion générale</b>	<b>53</b>
	<b>Conclusion générale</b>	<b>56</b>
	<b>Références bibliographiques</b>	<b>59</b>

---

# *Introduction générale*

Contexte, objectifs et démarche

---

## Introduction générale

L'agriculture intensive, bien qu'essentielle pour répondre aux besoins alimentaires mondiaux, a entraîné une utilisation excessive de fertilisants chimiques. Cette pratique a conduit à une dégradation significative des sols, à la pollution des eaux et à des impacts négatifs sur la biodiversité (**Sun *et al.*, 2020 ; Shao *et al.*, 2020**). Les biofertilisants, dérivés de micro-organismes bénéfiques comme les champignons mycorhiziens, représentent une solution respectueuse de l'environnement à ces problèmes. En plus d'améliorer la disponibilité des nutriments pour les plantes, ces biofertilisants renforcent la structure du sol et augmentent la résilience des cultures face aux stress abiotiques (**Zhang *et al.*, 2023**).

Les changements climatiques, avec leurs impacts sur les régimes de précipitations et les températures, posent des défis supplémentaires pour la production agricole. Les champignons du sol, grâce à leurs capacités d'adaptation et de symbiose avec les plantes, peuvent jouer un rôle crucial dans la résilience des systèmes agricoles face à ces changements. En renforçant les défenses naturelles des plantes et en améliorant l'efficacité de l'utilisation des ressources, ces micro-organismes contribuent à la stabilité et à la durabilité des productions agricoles dans un contexte de variabilité climatique accrue (**Rillig *et al.*, 2019 ; Kopeć, 2024**).

Les champignons de sol jouent un rôle essentiel dans les écosystèmes terrestres, influençant la santé des sols, la croissance des plantes et la biodiversité microbienne. Ils sont impliqués dans des processus écologiques fondamentaux tels que la décomposition de la matière organique, la libération de nutriments essentiels et la formation de symbioses avec les plantes. En particulier, les champignons endophytes et rhizosphériques peuvent avoir des effets bénéfiques sur la résistance des plantes aux stress biotiques et abiotiques, ce qui les rend intéressants pour les pratiques agricoles durables (**Johnson *et al.*, 2003 ; Rodriguez *et al.*, 2009 ; Rillig *et al.*, 2010 ; Berendsen *et al.*, 2012 ; Smith *et al.*, 2017**).

La région de Laghouat, avec son climat aride et ses sols spécifiques, présente une biodiversité unique de plantes spontanées qui pourraient héberger une variété de champignons de sol encore méconnus. Ces plantes, bien adaptées aux conditions locales, peuvent être des réservoirs naturels pour des champignons bénéfiques ayant des propriétés

de biocontrôle ou de promotion de la croissance des plantes. L'étude de cette diversité microbienne est essentielle pour comprendre les interactions sol-plante et pour identifier des agents potentiels de biocontrôle qui pourraient être utilisés dans des stratégies de gestion intégrée des ravageurs **Arshad *et al.*, 2007 ; Rodriguez *et al.*, 2008 ; Smith *et al.*, 2010 ; Al-Hatmi *et al.*, 2016 ; Verma *et al.*, 2019**).

Les plantes spontanées de Laghouat offrent un potentiel considérable dans le cadre du biocontrôle et de la gestion intégrée des ravageurs. Leur utilisation judicieuse peut contribuer à réduire l'utilisation de pesticides chimiques, à préserver la biodiversité et à promouvoir des systèmes agricoles plus durables et résilients aux changements environnementaux **(Jaiswal *et al.*, 2022)**. La diversité microbienne dans les sols est un facteur clé pour la santé des écosystèmes et la productivité agricole. Les microorganismes du sol, en particulier les champignons, jouent des rôles cruciaux dans les cycles biogéochimiques, la décomposition de la matière organique, et la suppression des pathogènes des plantes **(Garbeva, van Veen, & van Elsas, 2004)**. La rhizosphère, la zone de sol influencée par les racines des plantes, est particulièrement riche en microorganismes bénéfiques, y compris les champignons, qui peuvent agir comme agents de biocontrôle contre divers pathogènes des plantes **(Mendes *et al.*, 2013)**.

Dans les régions arides comme Laghouat, la connaissance de la diversité fongique et des interactions microbiennes dans la rhizosphère est limitée. Pourtant, cette compréhension est essentielle pour développer des stratégies durables de gestion des maladies des plantes qui s'adaptent aux conditions environnementales locales **(Kowalski, 2009)**. Des études récentes ont montré que les champignons antagonistes, tels que les espèces d'*Aspergillus* et de *Penicillium*, peuvent inhiber efficacement la croissance de pathogènes fongiques par la production de métabolites secondaires et de composés volatils **(Pandey *et al.*, 2019 ; Rinu *et al.*, 2014)**.

Ce travail vise à explorer la diversité fongique dans la rhizosphère de plantes spontanées à Laghouat, à identifier les espèces fongiques présentes, et à évaluer leur potentiel en tant qu'agents de biocontrôle contre les pathogènes des plantes. À travers des tests de croissance et des études d'antagonisme, cette recherche contribue à une meilleure compréhension des interactions fongiques dans les sols de Laghouat et ouvre des perspectives pour des applications agricoles durables.

Dans ce contexte, le but de nos recherches est de :

i) réaliser l'isolement de souches fongiques à partir des rhizosphères de différentes plantes spontanées collectées dans diverses zones de Laghouat,

ii) identifier et caractériser les souches isolées à travers des techniques morphologiques, afin de déterminer leur diversité et leur potentiel fonctionnel,

iii) tester l'efficacité des souches isolées contre quelques agents pathogènes phytopathogènes, pour évaluer leur potentiel en tant qu'agents de biocontrôle.

Les applications de cette étude sont d'ordre scientifique. Elle sert à explorer le potentiel des champignons de sol isolés pour une application en agriculture durable, visant à réduire l'utilisation de pesticides chimiques et à améliorer la santé des sols.

---

**PREMIERE PARTIE**

---

**SYNTHESE  
BIBLIOGRAPHIQUE**

---

## PREMIERE PARTIE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

### Chapitre I : Microflore du sol

#### I.1.- Caractéristiques de microflore

La microflore du sol joue un rôle crucial dans la pédologie principale et la stabilité du sol, ainsi que dans les domaines de la biodiversité et des écosystèmes locaux.

- **Bactéries** : Les bactéries du sol jouent un rôle crucial dans la décomposition de la matière organique, la fixation de l'azote atmosphérique et d'autres processus biogéochimiques. Des espèces telles que les actinomycètes et les cyanobactéries peuvent être importantes dans les sols semi-arides pour maintenir la fertilité du sol (**Gliński et al., 2011**).

- **Champignons** : Les champignons du sol, y compris les champignons mycorhiziens, sont importants pour la décomposition de la matière organique et la symbiose avec les racines des plantes. Ils peuvent aider les plantes à absorber les nutriments du sol, notamment dans des environnements pauvres en éléments nutritifs (**Smith & Read, 2008**).

- **Algues** : Les algues peuvent être présentes dans les sols semi-arides, contribuant à la production de matière organique et à la stabilisation des sols (**Smith & Read, 2008**).

- **Archées et autres microorganismes** : D'autres microorganismes tels que les archées (comme les halophiles) et les protozoaires peuvent également être présents, adaptés aux conditions extrêmes du sol (**Quenea, 2004**).

#### I.2.- Rôle de la microflore du sol

La microflore du sol joue plusieurs rôles essentiels dans l'écosystème et l'agriculture :

- **Décomposition des matières organiques** : Les microorganismes décomposent la matière organique morte, recyclant les nutriments essentiels pour les plantes.

- **Fixation de l'azote** : Les bactéries fixatrices d'azote contribuent à enrichir le sol en azote, un élément crucial pour la croissance des plantes (**Brady & Weil, 2016**).

- **Amélioration de la structure du sol** : Les microorganismes aident à former des agrégats dans le sol, améliorant ainsi sa structure et sa capacité à retenir l'eau.

- **Symbiose avec les plantes** : Les champignons mycorhiziens établissent des associations symbiotiques avec les racines des plantes, favorisant l'absorption des nutriments et améliorant la résistance des plantes au stress (**Brady & Weil, 2016**).

### **I.2.- Composition des champignons de la microflore**

Les champignons sont des organismes eucaryotes appartenant au règne *Fungi*, et ils jouent un rôle essentiel dans les écosystèmes terrestres, y compris dans le sol (**Philippe et al., 1999**).

Les champignons sont constitués de filaments appelés hyphes, qui forment un réseau appelé mycélium. Les hyphes sont composés de cellules multinucléées entourées par une paroi cellulaire ; ce sont des organismes hétérotrophes qui se nourrissent de matière organique en décomposant des substances complexes telles que la cellulose et la lignine. Ils absorbent les nutriments à travers leurs parois cellulaires. Et se reproduisent généralement par des spores, qui sont des structures de dispersion légères et résistantes (**Paul, 2015**).

### **I.3.- Caractéristiques des champignons de la microflore**

Les champignons ne peuvent pas effectuer de photosynthèse et dépendent donc de matière organique pour leur nutrition. Ce sont très adaptatifs et peuvent survivre dans une grande variété d'environnements, y compris des sols acides, alcalins, humides ou secs. Certains champignons établissent des relations symbiotiques avec d'autres organismes, tels que les plantes (mycorhizes) ou certains insectes (associations mutualistes) (**Paul, 2015**).

Les champignons produisent des métabolites spécialisés tels que des antibiotiques ou des enzymes, qui peuvent avoir des applications médicales ou industrielles.

### **I.4.- Rôle des champignons dans le sol**

Les champignons sont des décomposeurs clés dans le sol, dégradant la matière organique morte comme les feuilles, le bois et les débris végétaux. Ils libèrent des nutriments essentiels tels que l'azote, le phosphore et le carbone, rendant ces éléments disponibles pour d'autres organismes du sol. Ils établissent des associations symbiotiques avec les racines des plantes. Ils améliorent l'absorption des nutriments par les plantes

(notamment l'azote et le phosphore) et augmentent la résistance des plantes au stress environnemental. Le mycélium des champignons agit comme un réseau complexe dans le sol, favorisant la formation d'agrégats du sol et améliorant ainsi sa structure et sa stabilité (Guy, 1993).

Certains champignons du sol produisent des substances antibactériennes ou antifongiques qui peuvent inhiber la croissance de pathogènes nuisibles pour les plantes. Les champignons participent activement au cycle des nutriments dans le sol, en recyclant les éléments essentiels et en maintenant la fertilité du sol (Atlas *et al.*, 1992).

### **I.5.- Importance des champignons du sol**

Les champignons du sol, un royaume fongique fascinant et souvent méconnu, jouent un rôle crucial dans le maintien de l'équilibre des écosystèmes terrestres et de la santé des plantes. Leur présence discrète mais omniprésente dans le sol s'accompagne d'une multitude de fonctions essentielles qui contribuent au bon fonctionnement des environnements naturels et cultivés.

#### **a. Décomposition de la matière organique et cycle des nutriments**

Les champignons du sol, en tant que décomposeurs primaires, assument une tâche essentielle dans le cycle des nutriments en dégradant la matière organique morte, telle que les feuilles, les tiges et les racines des plantes. Cette activité de décomposition libère des nutriments minéraux essentiels, tels que l'azote, le phosphore et le potassium, qui sont ensuite rendus disponibles pour être absorbés par les plantes. Ce processus continu permet de recycler les nutriments dans l'écosystème et favorise la fertilité du sol (Aerts, 2003).

#### **b. Formation de la structure du sol et amélioration de la rétention d'eau**

Les champignons du sol, à travers leur réseau mycélien étendu, contribuent à la formation de la structure agrégée du sol. Ces agrégats permettent d'améliorer la porosité du sol, favorisant ainsi l'infiltration de l'eau et l'aération, tout en réduisant l'érosion et le compactage. De plus, les champignons mycorrhiziens, qui forment des associations symbiotiques avec les racines des plantes, augmentent la surface d'absorption des plantes, leur permettant d'accéder à plus d'eau et de nutriments, même dans des conditions de stress hydrique (Rillig & Mummey, 2006).

**c. Protection des plantes contre les agents pathogènes et les stress environnementaux**

De nombreuses espèces de champignons du sol agissent comme des agents de biocontrôle naturels, protégeant les plantes contre un large éventail de maladies fongiques, bactériennes et virales. Ces champignons antagonistes peuvent parasiter les agents pathogènes, produire des antibiotiques ou stimuler les défenses naturelles des plantes. De plus, certains champignons du sol peuvent aider les plantes à tolérer des stress environnementaux tels que la sécheresse, la salinité et les températures extrêmes (**Devi et al., 2020**).

**d. Promotion de la croissance des plantes et augmentation des rendements**

Les champignons mycorhiziens, en établissant des relations symbiotiques avec les racines de plus de 80 % des plantes terrestres, jouent un rôle crucial dans la promotion de la croissance des plantes et l'augmentation des rendements agricoles. Ces champignons améliorent l'absorption d'eau et de nutriments par les plantes, augmentent leur résistance aux stress et stimulent leur production de phytohormones bénéfiques (**Barea et al., 2008**).

**e. Diversité et contribution à la biodiversité**

Les champignons du sol représentent l'un des groupes d'organismes les plus divers de la planète, avec des milliers d'espèces encore à découvrir. Cette diversité fongique contribue de manière essentielle à la richesse biologique des écosystèmes terrestres et joue un rôle important dans le maintien des fonctions écosystémiques (**Powell & Rillig, 2018**).

**I.6.- Mécanismes de biocontrôle****I.6.1.- Production de métabolites antimicrobiens**

Certains champignons mycorhiziens produisent des métabolites secondaires ayant des propriétés antifongiques, antibactériennes et peuvent produire des composés inhibant la croissance d'autres champignons pathogènes (**Smith & Read, 2008**).

**I.6.2.- Compétition pour les nutriments et l'espace**

Le champignon bénéfique peut coloniser les mêmes niches écologiques que les pathogènes des plantes, les privant ainsi des ressources nécessaires à leur développement. Cette compétition biologique réduit la survie et la prolifération des pathogènes (**Van Loon, Bakker & Pieterse, 1998**).

### **I.6.3.- Induction de la Résistance Systémique (ISR)**

Certains champignons non pathogènes peuvent stimuler les mécanismes de défense des plantes. Par exemple, des interactions avec des champignons peuvent induire la production de composés phénoliques et d'autres défenses chimiques chez les plantes, augmentant leur résistance aux infections futures (**Van Loon, Bakker & Pieterse, 1998**).

## **Chapitre II : Lutte biologique**

L'agriculture moderne est confrontée à de nombreux défis, notamment la lutte contre les agents pathogènes végétaux et les ravageurs, qui causent des pertes importantes de récoltes et menacent la sécurité alimentaire. Les pesticides chimiques, bien que souvent efficaces, ont des impacts environnementaux néfastes et peuvent présenter des risques pour la santé humaine. Dans ce contexte, la lutte biologique, qui utilise des organismes vivants pour contrôler les populations nuisibles, se présente comme une alternative durable et prometteuse (**Ekström & Ekbom, 2011**).

La lutte biologique repose sur l'utilisation d'organismes antagonistes, tels que les champignons du sol, les bactéries, les virus, les nématodes ou les insectes prédateurs, pour réguler naturellement les populations de nuisibles. Ces antagonistes peuvent agir par différents mécanismes, tels que la prédation, le parasitisme, la compétition, l'antibiose ou la production de toxines (**Hawkins & Cornell, 2004**).

### **II.1.- Champignons du sol comme agents de lutte biologique**

Les champignons du sol, en particulier les espèces appartenant aux genres *Trichoderma*, *Beauveria* et *Metarhizium*, sont des agents de lutte biologique particulièrement efficaces contre un large éventail d'agents pathogènes fongiques, bactériens et d'insectes ravageurs. Ils peuvent agir par différents mécanismes, comme le parasitisme direct des agents pathogènes, la production d'enzymes lytiques qui dégradent leurs parois cellulaires, la compétition pour les ressources nutritives ou l'induction des défenses naturelles des plantes (**Knudsen et al., 1997**).

### **II.2.- Avantages de la lutte biologique avec les champignons du sol**

L'utilisation de champignons du sol comme agents de lutte biologique présente de nombreux avantages par rapport aux pesticides chimiques :

✓ Sécurité environnementale : Les champignons du sol sont des organismes naturels présents dans l'environnement et ne présentent généralement pas de risques pour la santé humaine ou la biodiversité.

✓ Large spectre d'action : De nombreuses espèces de champignons du sol peuvent contrôler un large éventail d'agents pathogènes et de ravageurs, réduisant ainsi la nécessité d'utiliser des pesticides multiples.

✓ Efficacité durable : Les champignons du sol peuvent s'établir durablement dans le sol et continuer à exercer leur activité de lutte biologique sur plusieurs saisons.

✓ Compatibilité avec d'autres méthodes de lutte : La lutte biologique avec les champignons du sol peut être facilement intégrée à d'autres méthodes de lutte antiparasitaire, telles que la lutte culturale ou la lutte génétique.

### **II.3.- Quelques applications pratiques de l'utilisation des champignons du sol**

De nombreuses applications réussies de la lutte biologique avec les champignons du sol ont été démontrées dans divers systèmes de culture. Par exemple, le champignon *Trichoderma harzianum* est utilisé pour contrôler la pythiose du riz, tandis que le champignon *Beauveria bassiana* est utilisé pour lutter contre le doryphore de la pomme de terre (Sharma *et al.*, 2019).

#### **II.3.1.- Traitement des semences**

Inoculer les semences avec des souches bénéfiques peut protéger les plantules contre les pathogènes du sol et améliorer la germination et la vigueur initiale des plantes (Harman & Uphoff, 2019).

#### **II.3.2.- Formulations de biopesticides**

Les spores et extraits des souches non pathogènes peuvent être formulés en biopesticides appliqués sur les cultures pour contrôler les infections fongiques. Par exemple, des suspensions de spores peuvent être pulvérisées sur les feuilles pour lutter contre les maladies foliaires (Whipps, 2001).

Les champignons du sol peuvent être utilisés pour lutter contre les pathogènes des plantes en compétition pour les nutriments, en produisant des antibiotiques naturels, ou en parasitant directement les agents pathogènes. Exemples :

***Trichoderma sp.*** : Utilisé pour combattre des pathogènes tels que *Pythium*, *Rhizoctonia*, et *Fusarium*.

***Gliocladium sp.*** : Connu pour ses propriétés antifongiques contre les champignons pathogènes des plantes.

Les champignons du sol peuvent promouvoir la croissance des plantes en stimulant la production de phytohormones ou en améliorant la structure du sol. Exemples :

***Trichoderma sp.*** : Induit la résistance systémique chez les plantes, renforçant leurs défenses naturelles.

***Beauveria bassiana*** : Non seulement un agent de biocontrôle contre les insectes, mais également stimulant de la croissance des plantes.

Les champignons du sol peuvent induire une résistance systémique chez les plantes, renforçant leurs défenses naturelles contre une variété de pathogènes et de stress environnementaux. Exemples :

***Trichoderma harzianum*** : Utilisé pour induire une résistance systémique chez les plantes contre des pathogènes comme *Botrytis cinerea* et *Alternaria solani*.

***Piriformospora indica*** : Stimule les défenses des plantes contre les agents pathogènes et améliore leur tolérance aux stress abiotiques.

L'ajout de champignons bénéfiques au sol (bioaugmentation) pour améliorer la santé des plantes et la qualité du sol. Exemples :

**Applications de consortia fongiques** : Mélanges de plusieurs champignons bénéfiques utilisés pour augmenter la biodiversité microbienne du sol et améliorer la santé des cultures.

**Utilisation de champignons endophytes** : Inoculation des plantes avec des champignons endophytes qui colonisent les tissus internes et offrent une protection contre les pathogènes.

Les champignons peuvent être utilisés pour contrôler les nématodes phytopathogènes, qui sont des parasites nuisibles pour les cultures. Exemples :

***Paecilomyces lilacinus*** : Utilisé pour contrôler les nématodes à kystes et à galles, réduisant les dégâts causés aux cultures.

***Arthrobotrys spp.*** : Champignons prédateurs de nématodes qui piègent et digèrent ces parasites dans le sol.

### **II.3.3.- Amendements du sol**

Incorporer des composts ou des biofertilisants enrichis avec un champignon bénéfique dans le sol peut améliorer la santé globale du sol et réduire l'incidence des maladies des racines. Ces pratiques augmentent la biodiversité microbienne, créant un environnement plus hostile aux pathogènes (**Harman & Uphoff, 2019**).

Certains champignons du sol améliorent la disponibilité des nutriments pour les plantes en décomposant la matière organique ou en solubilisant les minéraux du sol. Exemples :

**Mycorhizes arbusculaires (AMF)** : Formant des associations symbiotiques avec les racines des plantes, améliorant l'absorption des phosphates et d'autres nutriments.

***Penicillium sp.*** : Capable de solubiliser les phosphates dans le sol, augmentant leur disponibilité pour les plantes.

Les champignons saprophytes jouent un rôle crucial dans la décomposition de la matière organique, recyclant les nutriments essentiels pour les plantes. Exemples :

***Aspergillus sp.*** : Décompose la matière organique complexe en substances plus simples et disponibles pour les plantes.

***Fusarium oxysporum*** (non pathogène) : Participe à la décomposition de la matière organique dans le sol.

Les champignons du sol, en particulier les mycorhizes, jouent un rôle crucial dans l'amélioration de la structure du sol, augmentant sa porosité et sa capacité à retenir l'eau.

Exemples :

**Glomus spp.** : Forme des mycorhizes arbusculaires qui améliorent l'agrégation du sol et sa capacité à retenir l'eau, favorisant une meilleure croissance des plantes en conditions de stress hydrique.

**Mycorhizes ectomycorrhiziennes** : Associées aux arbres forestiers, elles améliorent la stabilité du sol et la résilience des écosystèmes forestiers.

Utilisation de champignons mycorhiziens pour aider à la restauration de la végétation dans les zones perturbées ou dégradées. Exemples :

**Utilisation de champignons mycorhiziens** : Pour améliorer la survie et la croissance des plantes dans les sols dégradés ou contaminés, favorisant la restauration des écosystèmes.

#### **II.3.4.- Réhabilitation des sols dégradés**

Les champignons du sol peuvent être utilisés pour restaurer les sols dégradés en améliorant leur structure, leur fertilité et leur microbiote. Exemples :

**Mycorhizes** : Utilisées pour la restauration des sols après des perturbations telles que l'érosion, la déforestation, ou l'exploitation minière.

**Trichoderma sp.** : Capable de décomposer les résidus de pesticides et autres contaminants, contribuant à la remédiation des sols pollués.

Utilisation de champignons pour dégrader ou immobiliser les contaminants dans les sols pollués, contribuant à la réhabilitation des sites. Exemples :

**Pleurotus ostreatus** : Utilisé pour la dégradation de polluants organiques tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les pesticides.

**Aspergillus niger** : Capable de solubiliser les métaux lourds et de réduire leur toxicité dans le sol.

### II.3.5.- Production de composés bioactifs

Les champignons du sol produisent divers composés bioactifs qui peuvent être utilisés en agriculture pour améliorer la santé des plantes et la protection contre les maladies.

Exemples :

**Antibiotiques naturels** : Produits par des champignons comme *Trichoderma* et utilisés pour inhiber les pathogènes.

**Enzymes dégradant les parois cellulaires** : Utilisées pour protéger les plantes contre les pathogènes fongiques.

Certains champignons du sol produisent des phytohormones ou des métabolites qui stimulent la croissance des plantes. Exemples :

***Penicillium spp.*** : Capable de produire des acides organiques qui solubilisent les phosphates et améliorent la nutrition des plantes.

***Pseudomonas fluorescens* (associé aux champignons)** : Contribue à la production de phytohormones comme les auxines, qui favorisent la croissance racinaire.

Certaines mycotoxines produites par les champignons peuvent avoir des effets bénéfiques en agriculture, en agissant comme des agents de biocontrôle. Exemples :

**Trichothécènes produits par *Trichoderma spp.*** : Utilisés pour inhiber la croissance des champignons pathogènes sans affecter les plantes hôtes.

### II.4.- Défis et perspectives de la lutte biologique avec les champignons du sol

Malgré ses nombreux avantages, la lutte biologique avec les champignons du sol n'est pas sans défis. La formulation et l'application des agents de lutte biologique peuvent être plus complexes que celles des pesticides chimiques. De plus, les conditions environnementales peuvent influencer l'efficacité des champignons du sol. Des recherches continues sont nécessaires pour mieux comprendre les mécanismes d'action des champignons du sol, optimiser leur formulation et leur application, et développer des stratégies de lutte biologique plus efficaces et durables (Sulaiman & Bello, 2024).

---

# **DEUXIEME PARTIE**

---

## **MATERIEL & METHODES**

---

---

# **Chapitre I**

---

## **Description générale de la zone d'étude**

---

## DEUXIEME PARTIE : MATERIEL & METHODES

### Chapitre I : Description générale de la zone d'étude

Laghouat est une ville située au cœur de l'Algérie, dans la région des hautes plaines du Sud. La région de Laghouat présente des caractéristiques géographiques et climatiques distinctes qui en font un site d'étude intéressant pour diverses recherches scientifiques, y compris les études microbiologiques et environnementales.

#### 1.- Cadre physique

##### I.1.1.- Géomorphologie et pédologie

La région de Laghouat se caractérise particulièrement par un sol désertique et semi-désertique, souvent pauvre en matière organique et sujet à l'érosion. Ces sols peuvent être sablonneux, rocailleux ou argileux, avec une faible capacité de rétention d'eau avec un pH des sols peut varier mais tend à être neutre à légèrement alcalin. Elle abrite une diversité de plantes spontanées qui sont adaptées à ces milieux arides (**Bensaid, 2013**).

Elles sont également une partie intégrante de l'écosystème local, fournissant des habitats et des ressources pour la microflore et la faune sauvage et contribuant à la biodiversité régionale (**Chenchouni, 2012**).

Dans cette étude, nous avons examiné l'extraction d'échantillons de sol provenant de différentes régions de Laghouat, à savoir : *Hamda, Daya, Fassefssa et Kaf-Mokran*.

##### I.1.2.- Caractéristiques climatiques

La région de Laghouat, située au Sahara algérien, est caractérisée par un environnement aride et semi-aride (**Pouget, 1980**), où les conditions climatiques extrêmes imposent des défis uniques à la flore locale.

Laghouat bénéficie d'un climat désertique chaud, avec des étés très chauds et des hivers frais. Les précipitations sont rares et irrégulières. Les températures estivales peuvent dépasser 40 °C, tandis que les hivers peuvent voir des températures descendre en dessous de 0 °C pendant la nuit. Les précipitations annuelles sont faibles, généralement inférieures à 200 mm par an.

## 2.- Cadre biotique

Malgré ces conditions difficiles, Laghouat abrite une diversité remarquable de plantes spontanées qui ont su s'adapter et prospérer dans ce milieu inhospitalier.

Les plantes spontanées de Laghouat ont développé une gamme d'adaptations pour survivre dans un environnement aride. Leurs systèmes racinaires sont souvent profonds et étendus, ce qui leur permet d'atteindre les réserves d'eau souterraines (**Guterman, 2002**).

De plus, de nombreuses espèces ont développé des mécanismes de résistance à la sécheresse, tels que des feuilles épaisses ou succulentes pour minimiser la perte d'eau par transpiration.

Malgré les conditions climatiques contraignantes, la région de Laghouat abrite une diversité surprenante de plantes spontanées. Parmi celles-ci, on trouve des espèces adaptées aux zones arides telles que l'Alfa (*Stipa tenacissima*), l'Armoise blanche (*Artemisia herba alba*), le jujubier (*Ziziphus jujuba*) et l'Armoise champêtre (*Artemisia campestris*).

Ces plantes jouent un rôle essentiel dans l'équilibre des écosystèmes locaux en fournissant nourriture et abri à la faune indigène, tout en contribuant à la stabilisation des sols et à la conservation de la biodiversité (**Harper, 1977**).

Les plantes spontanées présentent également un potentiel agronomique prometteur, notamment dans le cadre du biocontrôle. En tant que réservoirs naturels de biodiversité, ces plantes peuvent jouer un rôle crucial dans la régulation des populations de ravageurs et des maladies des cultures (**Altieri, 1995**).

Dans le cadre de la gestion intégrée des ravageurs, les plantes spontanées peuvent être utilisées de différentes manières. Par exemple : des bandes de végétation spontanée peuvent être laissées en bordure des champs pour servir de refuge aux ennemis naturels des ravageurs, tels que les prédateurs et les parasitoïdes d'insectes (**Landis et al., 2000**).

De plus, certaines plantes spontanées peuvent être cultivées comme des cultures compagnes ou intercalaires pour repousser les ravageurs des cultures principales ou pour attirer les insectes pollinisateurs bénéfiques (**Altieri & Letourneau, 1982**).

La région de Laghouat comprend plusieurs zones distinctes, chacune présentant des caractéristiques géographiques, topographiques et pédologiques uniques. Afin de mieux comprendre les différences entre ces zones, il est essentiel d'analyser ces caractéristiques de manière comparative. Dans ce contexte, Hadjeb, Dhaya, Fassefssa, Hamda et Kaf-mokran ont été sélectionnées comme zones d'échantillonnage pour cette étude.

Le tableau ci-dessous présente une comparaison détaillée de ces quatre zones d'échantillonnage. Les critères de comparaison incluent le relief, l'altitude, l'hydrographie, le climat, les caractéristiques physiques et le pH du sol. Cette comparaison permet de mettre en lumière les atouts et les défis de chaque zone,

**Tableau 1 : Caractéristiques géographiques des trois zones d'échantillonnage**

	<b>Dhaya</b>	<b>Fassefssa</b>	<b>Kaf-mokran</b>	<b>Hamda</b>
<b>Reliefs</b>	zone relativement plate avec des collines modérées. Le terrain est souvent utilisé pour l'agriculture.	terrain légèrement vallonné. La topographie peut inclure des plaines et des petites collines.	terrain qui est plus varié, incluant des zones de plaine ainsi que des collines plus prononcées.	terrain qui est plus varié, incluant des zones de plaine ainsi que des collines plus prononcées.
<b>Climat</b>	Climat semi-aride avec des étés très chauds et des hivers doux à frais. Les précipitations sont rares et irrégulières.	semi-aride, avec des variations locales possibles en termes de température et de précipitations.	semi-aride avec des caractéristiques similaires aux autres zones, mais des variations microclimatiques peuvent être présentes en fonction de l'altitude et de la proximité des oueds.	semi-aride avec des caractéristiques similaires aux autres zones, mais des variations microclimatiques peuvent être présentes en fonction de l'altitude et de la proximité des oueds.
<b>Hydrographie</b>	La présence de cours d'eau saisonniers ou d'oueds peut être notable, mais les ressources en eau sont	La disponibilité en eau est limitée, avec des oueds et des sources saisonnières. L'irrigation est souvent	Les ressources en eau peuvent être encore plus limitées, dépendant principalement des précipitations irrégulières et	Les ressources en eau peuvent être encore plus limitées, dépendant principalement des précipitations irrégulières et

	généralement limitées.	nécessaire pour l'agriculture.	des oueds saisonniers.	des oueds saisonniers.
<b>Altitude</b>	Située à une altitude moyenne d'environ 700 à 800 mètres au-dessus du niveau de la mer.	Altitude moyenne similaire, variant autour de 700 à 900 mètres au-dessus du niveau de la mer.	L'altitude peut varier davantage, allant de 700 à 1000 mètres au-dessus du niveau de la mer, avec des zones plus élevées offrant des vues panoramiques.	L'altitude peut varier davantage, allant de 700 à 1000 mètres au-dessus du niveau de la mer, avec des zones plus élevées offrant des vues panoramiques.
<b>Caractéristiques physiques</b>	La région comprend des sols arides et sableux, avec une végétation clairsemée adaptée au climat semi-aride. Les plaines sont souvent utilisées pour la culture de céréales et l'élevage.	Les sols peuvent être légèrement plus fertiles dans les vallées, ce qui permet une agriculture diversifiée. L'irrigation est souvent nécessaire en raison de la variabilité de la disponibilité en eau.	Les sols sont généralement arides, avec une couverture végétale éparse. Les zones de colline peuvent être utilisées pour l'élevage extensif, tandis que les dépressions peuvent capter l'eau de pluie saisonnière, favorisant la végétation temporaire.	Les sols sont généralement arides, avec une couverture végétale éparse. Les zones de colline peuvent être utilisées pour l'élevage extensif, tandis que les dépressions peuvent capter l'eau de pluie saisonnière, favorisant la végétation temporaire.
<b>pH du sol</b>	légèrement alcalins à modérément alcalins, avec des valeurs de pH typiquement comprises entre 7,5 et 8,5.	légèrement à modérément alcalins, avec des valeurs de pH similaires, autour de 7,5 à 8,5.	les sols peuvent présenter une alcalinité similaire, avec des valeurs de pH autour de 7,5 à 8,5. Cependant, les variations topographiques	les sols peuvent présenter une alcalinité similaire, avec des valeurs de pH autour de 7,5 à 8,5. Cependant, les variations topographiques

---

# **Chapitre II**

---

## **Méthodes d'étude**

---

## **DEUXIEME PARTIE : MATERIEL & METHODES**

### **Chapitre II : Méthodes d'étude**

#### **II.1.- Objectif**

Cette étude vise à identifier les microorganismes fongiques présents dans les rhizosphères de certaines plantes spontanées de la région de Laghouat. La partie pratique de cette recherche a été menée dans le laboratoire pédagogique du domaine des sciences de la nature et de la vie de l'université Amar TELIDJI - Laghouat.

#### **II.2.- Méthode d'échantillonnage**

Douze (12) échantillons de sol rhizosphérique ont été collectés dans quatre zones différentes de la région de Laghouat pendant les mois de janvier, février et mars 2024 (**Fig.1**).

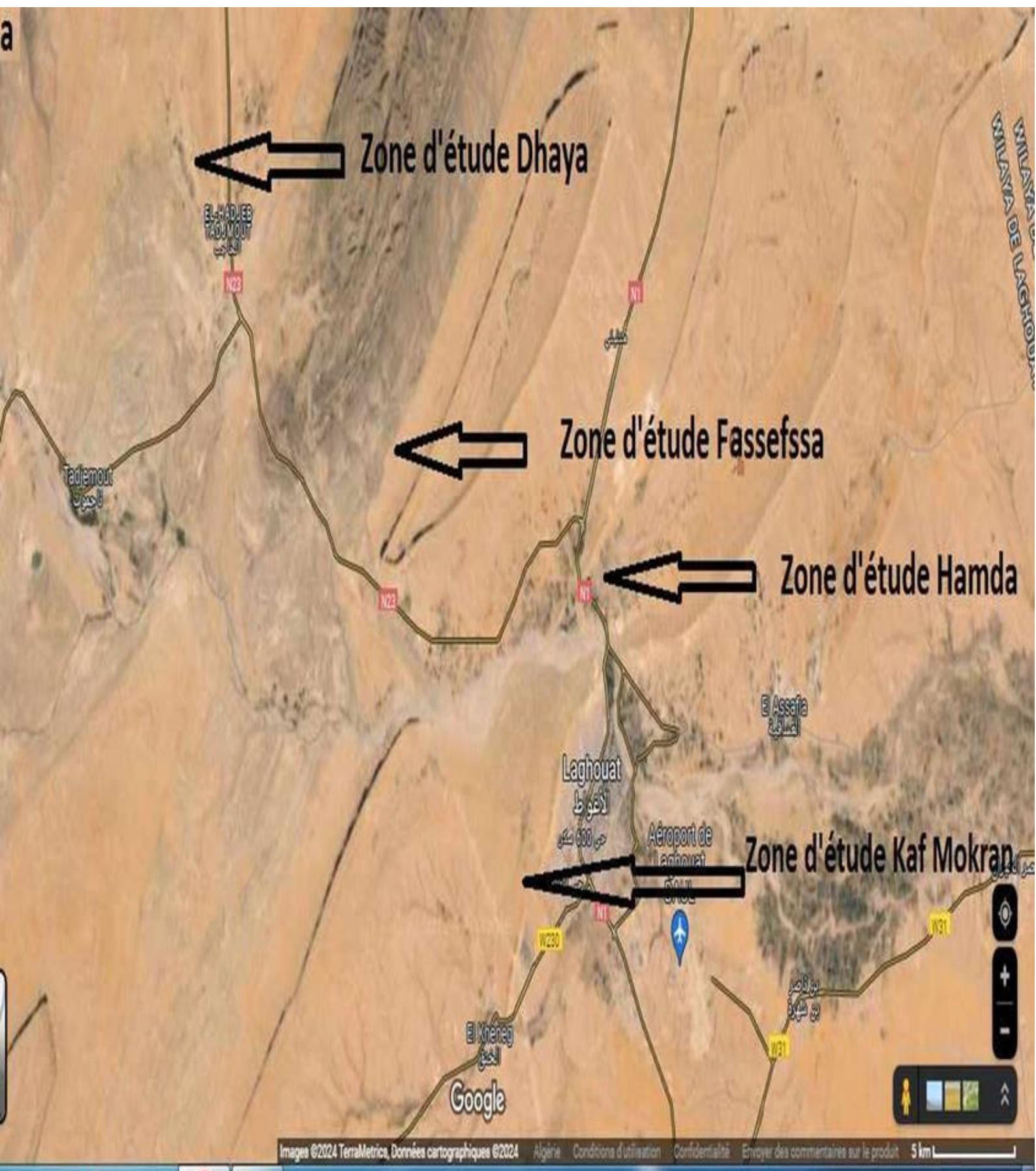














Figure 1 : Localisation géographique des sites de prélèvement des échantillons de sol rhizosphérique.

Les échantillons ont été prélevés au hasard à une profondeur de 20 cm dans différentes rhizosphères de plantes spontanées. Ils ont été placés dans des sachets en plastique étiquetés, puis transportés au laboratoire et conservés à température ambiante jusqu'à leur analyse (Tab.1).

Tableau 2 : Liste des échantillons de différents types de sol rhizosphérique des plantes spontanées collectés dans différentes zones de la région de Laghouat.

Echantillons	Région	Rhizosphère	Photo
01	<i>Dhaya</i>	Rhizosphère d' <i>Alfa</i> (حلفاء)	
02	<i>Dhaya</i>	Rhizosphère de Remth (رمث)	
03	<i>Dhaya</i>	Rhizosphère de Laurier (دقلة)	
04	Fassefssa	Rhizosphère d'euphorbe (لبين)	
05	Fassefssa	Rhizosphère de Forssk moq (باقل)	
06	Fassefssa	Rhizosphère de Jujubie (سدرة)	
07	Fassefssa	Rhizosphère d'Armoise champêtre (دقفت)	
08	Fassefssa	Rhizosphère de Tamarix (طرفة)	
09	<i>Hamda</i>	Rhizosphère d'Armoise blanche (شبيح)	
10	<i>Kaf-Mokran</i>	Rhizosphère d' <i>Alfa</i> (حلفاء)	

11	<i>Kaf-Mokran</i>	Rhizosphère d'Astragale (قندال)	
12	<i>Kaf-Mokran</i>	Rhizosphère de Retam (رتم)	

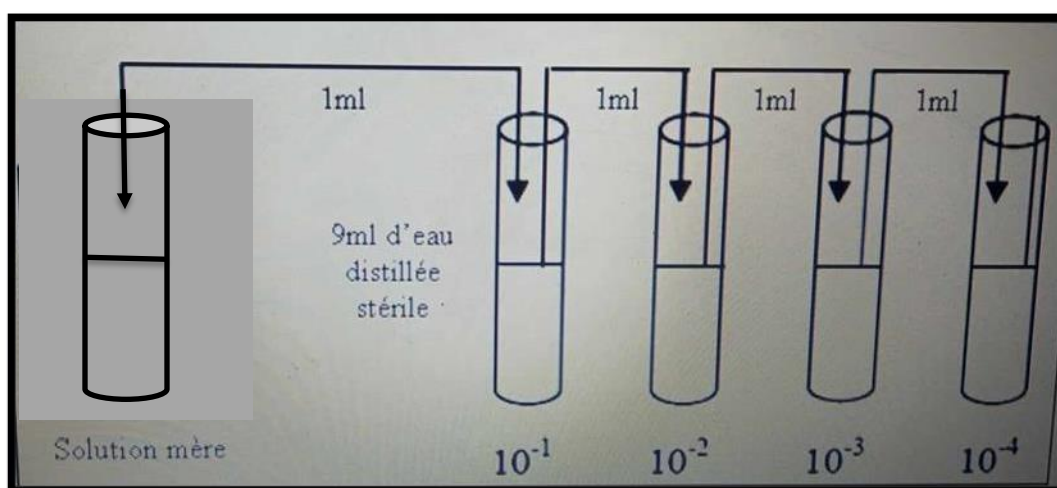
**II.3.- Technique d'isolement des microorganismes du sol**

L'isolement des microorganismes (mycètes) est réalisé selon la méthode de suspension par dilutions décrite par (**Kiddir 2018**). Cette méthode a pour but de diminuer la charge microbienne en diluant l'échantillon de sol analysé.

Elle facilite une purification ultérieure plus aisée et permet d'obtenir des colonies bien séparées à partir des plantes spontanées.

### II.3.1.- Méthode de dilution

Avant de commencer le travail, il est important de créer une zone stérile en utilisant la flamme d'un bec Bunsen sur une paillasse soigneusement nettoyée (**Fig. 3**). Ensuite, la suspension mère est préparée en mélangeant 1 g de chaque échantillon avec 9 ml d'eau distillée stérile (**Rapilly, 1968**). À l'aide d'une micropipette, 1 ml de la solution mère est prélevé et ajouté à 9 ml d'eau distillée stérile dans un tube à essai, ce qui permet d'obtenir une suspension microbienne diluée à  $10^{-1}$  par rapport à la suspension mère.



**Figure 3 : Méthode de suspension dilutions.**

De la même manière, 1 ml de la suspension  $10^{-1}$ , préalablement agitée à l'aide d'un vortex, est prélevé avec une micropipette et dilué dans un second tube à essai contenant 9 ml d'eau distillée stérile pour obtenir une dilution de  $10^{-2}$ . Ce processus est répété pour chaque dilution jusqu'à atteindre une diminution exponentielle de la charge microbienne de l'échantillon mère à  $10^{-4}$ .

### II.3.2.- Ensemencement sur milieu solide

En utilisant une micropipette, 1 ml de chaque dilution est prélevé et ensemencé sur le milieu de culture (PDA) avec trois répétitions. Les boîtes de Pétri sont ensuite homogénéisées en étalant à l'aide d'une pipette pasteur. Les préparations sont ensuite incubées à  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  jusqu'à ce que des colonies apparaissent clairement.

### II.3.3.- Dénombrement des colonies et purification

Après un développement adéquat, des colonies de différents aspects apparaissent dans la même boîte de Pétri. Les colonies sont alors dénombrées et caractérisées de manière préliminaire en vue de la purification (**Fig. 4**).



**Figure 4 : Techniques de purification des colonies sur PDA.**

Pour obtenir des colonies pures, une série de repiquages successifs est réalisée. La purification se fait en prélevant un fragment de colonie à l'aide d'une pipette Pasteur stérilisée, puis en le déposant au centre d'une nouvelle boîte de Pétri contenant le même milieu d'ensemencement. Les boîtes sont ensuite incubées pendant 7 jours à 25 °C.

## **II.3.4.- Identification des microorganismes**

### **II.3.4.1.- Caractérisation macroscopique**

Selon **Dufresne (2014)**, l'identification macroscopique des champignons repose généralement sur l'observation des critères suivants : la couleur (surface, revers, pigments diffusibles), la texture (laineuse, duveteuse, poudreuse, lisse), la topographie (plate, surélevée, cérébriforme, avec stries radiales). Ces observations se font à l'œil nu et à la loupe binoculaire. L'odeur du champignon peut également être un élément d'identification important, mais en raison du risque potentiel d'inhalation des spores et autres, il est strictement interdit de procéder à un examen olfactif des cultures.

### **II.3.4.2.- Caractères morphologiques microscopiques**

Ce type d'identification repose principalement sur l'étude morphologique du mycélium, notamment sur la nature des hyphes (cloisonnés ou non), le type et l'apparence du système sporal, ainsi que les caractéristiques de la spore asexuée (couleur, taille) (**Guiraud, 2003**). Les isolats ont été examinés au microscope en tant que frottis humides. Pour préparer un frottis humide (**Zaitlin et al., 2003**), un échantillon est prélevé sur la bordure de la colonie, où les structures fertiles sont jeunes et le nombre de spores est modéré.

Une goutte d'eau distillée est ajoutée à la préparation, qui est ensuite recouverte délicatement d'une lamelle (Nguymen, 2007). De plus, l'utilisation d'un microscope optique a permis de photographier le mycélium. Les isolats fongiques ont été identifiés en utilisant les clés de Barnett et Hunter (1972) ainsi que celles de Champignon (1997). Ces données ont permis de déterminer le genre, et parfois l'espèce, de chaque souche.

## II.5.- Conservation des isolats

Les souches fongiques purifiées sont ensemencées sur un milieu gélosé incliné (PDA + antibiotique), puis incubées à 25 °C jusqu'à sporulation. Ensuite, elles sont réfrigérées à 4 °C (Bensmira, 2006). Les isolats doivent être repiqués tous les 6 mois (Botton *et al.*, 1990).

### II.5.1.- Quelques données sur les genres isolées

#### II.5.1.1.- Le genre *Aspergillus*

Le genre *Aspergillus* est un groupe de champignons filamenteux appartenant à la famille des Aspergillacées dans l'ordre des Eurotiales (Fig. 5). Ces champignons sont largement répandus dans l'environnement et sont connus pour leur capacité à produire une grande variété de métabolites secondaires (Samuels, 2006 ; Druzhinina *et al.*, 2006 ; Lopes *et al.*, 2012).

Selon Frisvad (2015), la classification taxonomique de ce genre est la suivante :

- Règne : *Fungi* (Champignons)
- Division : *Ascomycota* (Ascomycètes)
- Classe : Eurotiomycetes
- Ordre : Eurotiales
- Famille : *Aspergillaceae*
- Genre : *Aspergillus*

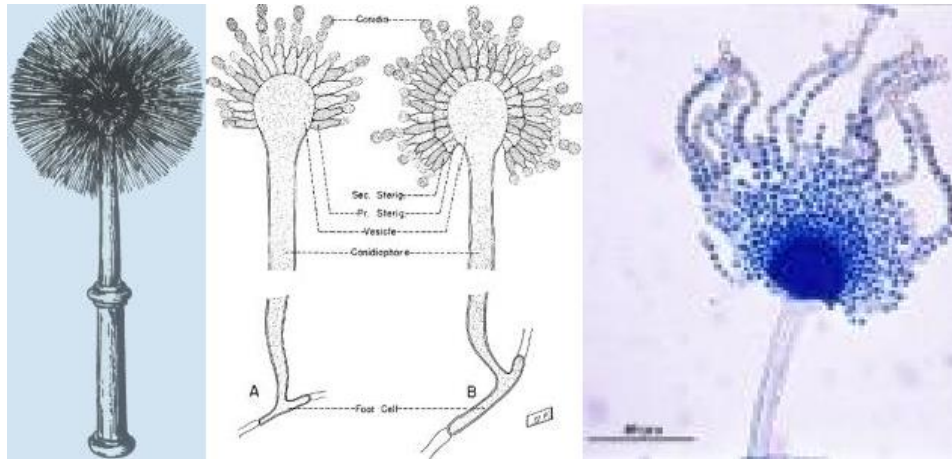


Figure 5 : Caractéristiques morphologiques du genre *Aspergillus*.

### II.5.1.2.- Le genre *Penicillium*

Le genre *Penicillium* est un groupe de champignons filamenteux appartenant à la famille des Trichocomacées, dans l'ordre des Eurotiales (**Fig. 6**). Ces champignons sont largement répandus dans l'environnement et comprennent de nombreuses espèces importantes du point de vue économique, médical et scientifique (**Samuels, 2006 ; Druzhinina et al., 2006 ; Lopes et al., 2012**).

Selon **Frisvad (2015)**, la classification taxonomique de ce genre est la suivante :

- **Règne :** *Fungi* (Champignons)
- **Division :** *Ascomycota* (Ascomycètes)
- **Classe :** Eurotiomycetes
- **Ordre :** Eurotiales
- **Famille :** *Trichocomaceae*
- **Genre :** *Penicillium*

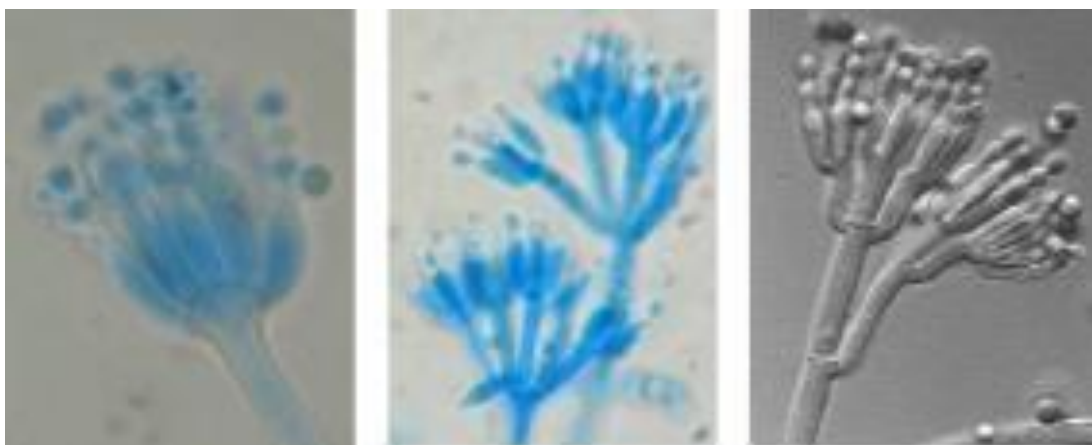


Figure 6 : Caractéristiques morphologiques du genre *Penicillium*.

### II.5.1.3.- Le genre *Alternaria*

Le genre *Alternaria* est un groupe de champignons filamenteux appartenant à la famille des Pleosporacées, dans l'ordre des Pleosporales (**Fig. 7**). Ces champignons sont ubiquitaires dans l'environnement et comprennent de nombreuses espèces importantes en pathologie végétale et en allergologie humaine (**Samuels, 2006 ; Druzhinina et al., 2006 ; Lopes et al., 2012**).

Selon **Woudenberg et al., (2013)**, la classification taxonomique de ce genre est la suivante :

- Règne : *Fungi* (Champignons)
- Division : *Ascomycota* (Ascomycètes)
- Classe : Dothideomycetes
- Ordre : Pleosporales
- Famille : *Pleosporaceae*
- Genre : *Alternaria*



**Figure 7 :** Caractéristiques morphologiques du genre *Alternaria*.

### II.5.1.4.- Le genre *Fusarium*

Le genre *Fusarium* est un groupe de champignons filamenteux appartenant à la famille des Nectriacées, dans l'ordre des Hypocreales (**Fig. 8**). Ces champignons sont ubiquitaires dans l'environnement et comprennent de nombreuses espèces qui peuvent être bénéfiques ou pathogènes pour les plantes, les animaux et les humains (**Samuels, 2006 ; Druzhinina et al., 2006 ; Lopes et al., 2012**).

Selon **Leslie & Summerell (2006)**, la classification taxonomique de ce genre est la suivante :

- Règne : *Fungi* (Champignons)
- Division : *Ascomycota* (Ascomycètes)
- Classe : Sordariomycetes
- Ordre : Hypocreales
- Famille : *Nectriaceae*
- Genre : *Fusarium*



Figure 8 : Caractéristiques morphologiques du genre *Fusarium*.

#### II.5.1.5.- Le genre *Rhizopus*

Le genre *Rhizopus* est un groupe de champignons filamenteux appartenant à la famille des Mucoracées, dans l'ordre des Mucorales (**Fig. 9**). Ces champignons sont largement répandus dans l'environnement et comprennent plusieurs espèces importantes sur le plan industriel et médical (**Gams & Bissett, 1998**). Selon **Fungorum (2022) and MycoBank (2022)**, la classification taxonomique de ce genre est la suivante :

- Règne : *Fungi* (Champignons)
- Division : *Zygomycota* (Zygomycètes)
- Classe : Zygomycetes
- Ordre : Mucorales
- Famille : *Mucoraceae*
- Genre : *Rhizopus*

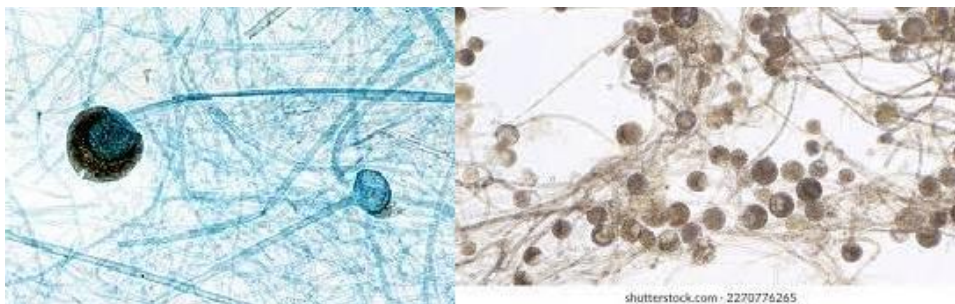


Figure 9 : Caractéristiques morphologiques du genre *Rhizopus*.

## II.6.- Tolérance des isolats aux quelques facteurs abiotiques

Les facteurs environnementaux, tels que l'aération, le pH, la disponibilité d'eau, les nutriments et la température, influencent la croissance des micro-organismes et jouent un rôle déterminant sur la biodiversité microbienne dans un habitat particulier (**Brock et al., 1994 ; Dix et Webster, 1995**).

Pour étudier l'effet de deux facteurs abiotiques (température, pH) sur le milieu le plus favorable à la croissance mycélienne, quatre isolats ont été sélectionnés parmi les isolats obtenues : *Aspergillus fumigatus*, *Aspergillus sp6*, *Fusarium sp*, et *Penicillium sp4*. Les deux facteurs ont été étudiés à divers niveaux.

Pour chaque niveau, deux répétitions de boîtes de Pétri ont été inoculées pour chaque isolat. L'évolution de la croissance mycélienne a été évaluée quotidiennement en mesurant les diamètres perpendiculaires de chaque colonie.

### II.6.1.- Effet de la température sur la croissance des isolats

La température affecte les processus vitaux ; ses effets chez les champignons influencent la croissance mycélienne et la fructification (**Marc, 2018**). La température d'incubation est un facteur crucial pour le métabolisme et la croissance des cellules (**Ana et Navarro, 2014**). La résistance des champignons à différentes températures a été validée. Les températures de 22 °C et 28 °C sont considérées comme idéales pour le développement des mycéliums, tandis que les températures de 37 °C et 45 °C ont été choisies en fonction des plantes hôtes (plantes spontanées) vivant dans des régions sahariennes où les températures sont très élevées.

La tolérance des isolats fongiques a été testée à différentes températures de croissance minimale, optimale et maximale, respectivement autour de 22 °C, 28 °C, 37 °C et 45 °C. Les boîtes ont ensuite été incubées pendant une période de 7 jours (**Fig. 10**).

### **II.6.2.- Effet de pH sur la croissance des isolats**

Les micromycètes peuvent se développer dans une large gamme de pH ; leur croissance est optimale dans des conditions de pH comprises entre 3 et 8 (**Tabuc, 2007**). Pour évaluer l'influence du pH sur la croissance mycélienne, nous avons utilisé comme milieu de culture le PDA avec une gamme de pH allant de 4 à 9. Cette méthode consiste à préparer un milieu PDA en surfusion, réparti dans des erlenmeyers de 100 ml, auxquels sont ajoutées des quantités différentes d'acide chlorhydrique ou d'hydroxyde de sodium pour obtenir le pH désiré.

Chaque pH obtenu est contrôlé à l'aide d'un pH-mètre pour une éventuelle correction. Après autoclavage, les milieux de culture tamponnés sont coulés dans des boîtes de Pétri etensemencés avec un explant mycélien déposé au centre des boîtes, qui sont ensuite incubées à 25 °C à l'obscurité. Deux répétitions ont été réalisées pour chaque isolat (**Fig. 11**).

## **II.7.- Evaluation de l'activité antagoniste des souches isolées**

Pour étudier l'activité antagoniste in vitro des isolats, les trois isolats *d'Aspergillus fumigatus*, *Aspergillus* sp6, *Fusarium* sp. et *Penicillium* sp4 ont été confrontés aux souches de *Fusarium oxysporum* albidinis, *Fusarium culmorum* et *Fusarium graminearum*.

Ce test a été réalisé en milieu PDA, qui assure de bonnes conditions de culture pour les agents pathogènes et les souches isolées (**Comporta, 1985**), en utilisant deux méthodes de confrontation :

### **II.7.1.- Confrontation directe**

#### **II.7.1.1.- Méthode des disques**

Appelée également "technique des cultures opposées", cette méthode consiste à placer dans la même boîte de Pétri contenant un milieu PDA deux pastilles gélosées de 6mm de diamètre. L'une contient le champignon antagoniste et l'autre l'agent pathogène (**Caron, 2002**) (**Fig. 12**).

Les deux pastilles sont disposées le long d'un axe diamétral à une distance de 3 à 5 cm du centre de la boîte, et les repiquages sont effectués simultanément (**Benhamou et Chet, 1996**). L'incubation est réalisée à 25 °C pendant sept jours avec une observation quotidienne.

Après une incubation de sept jours à 25 °C à l'obscurité, le pourcentage d'inhibition (IC) de la croissance mycélienne du pathogène par l'antagoniste a été évalué selon la méthode de **Caron (2002)**.

$$\text{IC \%} = (\text{DT}-\text{DPA}/\text{DT}) \times 100 \dots\dots\dots (\text{Eq. 1})$$

**DT** : Croissance diamétrale du témoin ;

**DPA** : Croissance diamétrale mycélienne du pathogène en présence de l'antagoniste.



**Figure 12 : Confrontation directe (méthode des disques) entre le champignon pathogène et le champignon antagoniste sur milieu PDA.**

### II.7.1.2.- Méthode des stries et du disque

Cette méthode implique l'inoculation d'un disque de champignon pathogène d'un côté de la boîte de Pétri contenant un milieu PDA. L'antagoniste est appliqué sous forme de stries de l'autre côté, souvent à l'aide d'une pipette Pasteur pour déposer une suspension fongique, afin d'observer les interactions directes entre les deux champignons. L'incubation se fait à une température de 25 °C pendant sept jours, avec une surveillance quotidienne (**Fig.13**).

$$\text{I (\%)} = (\text{D0}-\text{D1}) / \text{D0} \times 100 \dots\dots\dots (\text{Eq. 2})$$

**I** : Le pourcentage d'inhibition ;

**D0** : La distance de croissance du pathogène en absence de l'antagoniste ;

**D1** : La distance de croissance du pathogène en présence de l'antagoniste.

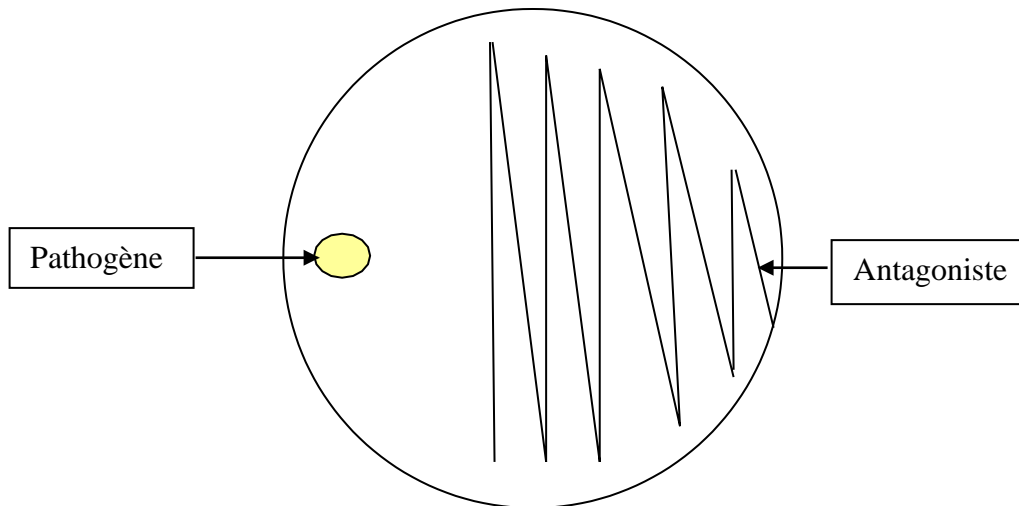


Figure 13 : Confrontation directe (méthode de disque et stries) entre le champignon pathogène et le champignon antagoniste sur milieu PDA.

### II.7.2.- Confrontation indirecte

Ce test est réalisé selon la méthode de **Daami-Remadi et El Mahjoub (2001)**. Des disques de 5 mm de diamètre de l'isolat antagoniste et de la souche pathogène sont déposés dans deux boîtes de Pétri séparées contenant le milieu PDA. Les deux boîtes sont ensuite superposées, avec l'antagoniste en bas et le pathogène en haut. La jonction entre les deux boîtes est assurée par du parafilm pour éviter toute perte des substances volatiles. Les boîtes sont incubées à l'obscurité à 25 °C pendant 7 jours (**Fig. 14**).

Le diamètre moyen des colonies traitées est mesuré quotidiennement pendant une période de 7 jours. L'évaluation de l'inhibition exercée est estimée par le calcul du pourcentage d'inhibition (I) de la croissance mycélienne selon la formule suivante (**Hmouni et al., 1996**).

$$I (\%) = (1 - C_n / C_o) \times 100 \dots\dots\dots (\text{Eq. 3})$$

C<sub>n</sub> : Le diamètre moyen des colonies en présence de l'antagoniste ;

C<sub>o</sub> : Le diamètre moyen des colonies témoin.

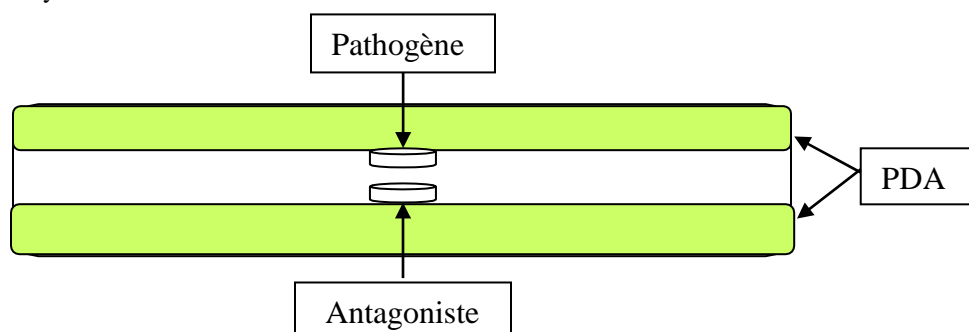


Figure 14 : Confrontation à distance entre l'antagoniste et agent pathogène.

**II.8.- Analyses statistiques et paramètres étudiés**

L'effet de quelques facteurs abiotiques : Température et pH sur le diamètre des colonies ainsi que l'effet antagoniste de ces isolats sur certains champignons pathogènes ont été étudiés. Des analyses de variance (ANOVA) ont été utilisées pour tester les effets de quelques facteurs et traitements. Les moyennes ont été comparées à l'aide du test de Tukey post-hoc. Les analyses statistiques ont été réalisées en utilisant le logiciel R version 4.2.2 pour Windows.

La **figure 15** résume la méthodologie globale du travail :

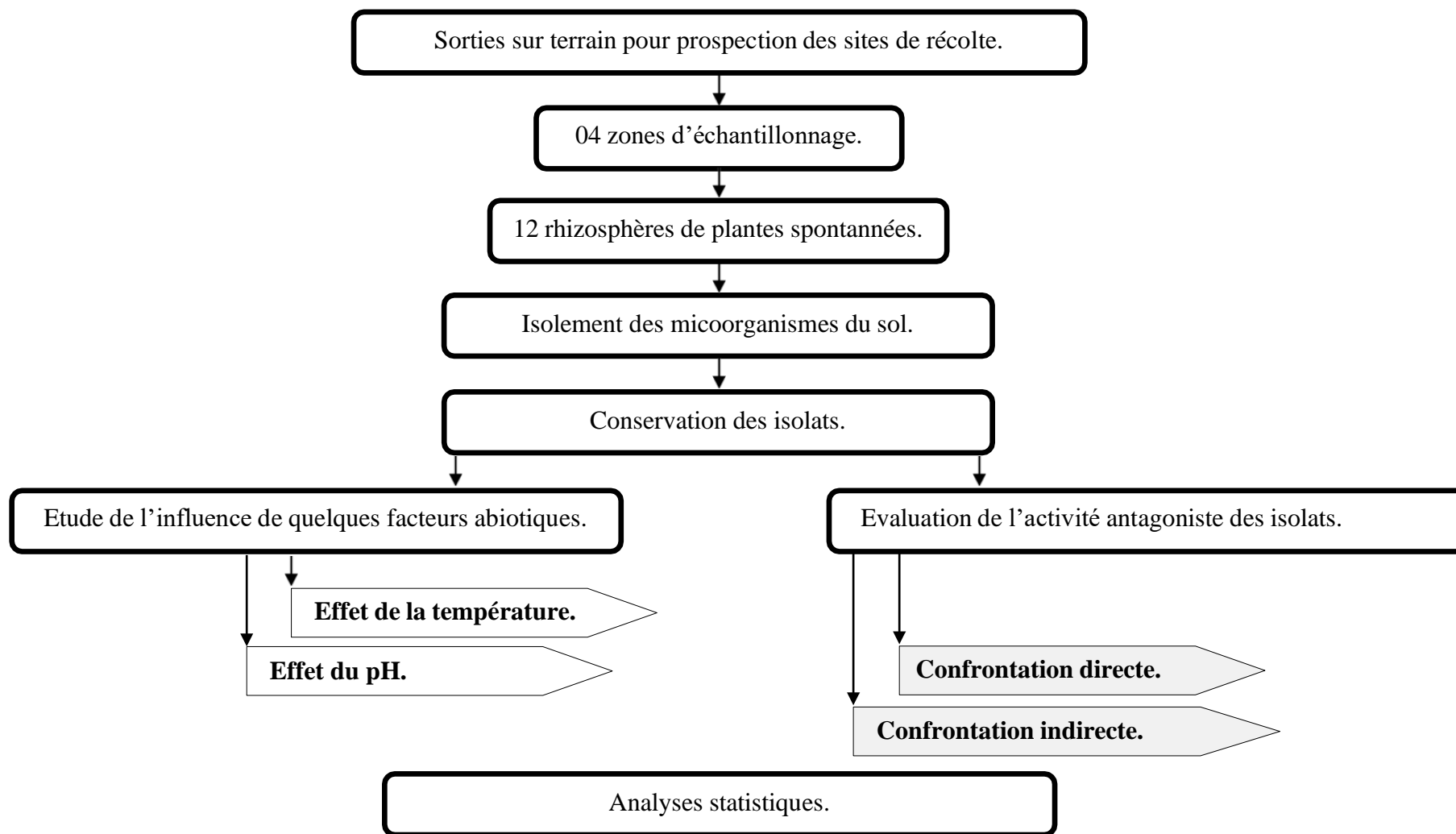


Figure 15 : Méthodologie de travail.

---

# **TROISIEME PARTIE**

---

## **RESULTATS & DISCUSSIONS**

---

---

# **Chapitre 1**

---

## **Analyse mycologique**

---

## TROISIEME PARTIE : RESULTATS & DISCUSSIONS

### Chapitre 1 : Analyse mycologique

Ce chapitre présente des informations relatives à l'inventaire de la flore microbienne de la rhizosphère de certaines plantes spontanées de la région étudiée. Ces informations servent à mieux comprendre les interactions entre les plantes et les micro-organismes de la rhizosphère, ainsi qu'à évaluer le rôle de cette flore microbienne dans la santé des plantes et la fertilité des sols.

Une diversité fongique significative a été observée après l'analyse mycologique de nos échantillons de plantes spontanées sur un milieu de culture PDA.

Les deux dernières décennies de recherche sur la biodiversité du sol ont révélé que les communautés souterraines sont d'une diversité remarquable et qu'elles jouent un rôle majeur dans la formation de la biodiversité en surface, du fonctionnement des écosystèmes terrestres, ainsi que de leurs réponses écologiques et évolutives aux changements environnementaux (**Bardgett et al., 2014**).

#### I.1.- Inventaire de la flore fongique de la région d'étude

Au total, **357** colonies fongiques ont été recensées dans l'ensemble des échantillons prélevés dans les différentes régions de la wilaya de Laghouat (*Daya, Fassefssa, Hamda, Kaf-Mokran*) (**Fig.16**).

Parmi ces colonies, 70 proviennent de "E03"(Laurier), 63 de "E10"(Alfa), 56 de "E02"(Remth), 52 de "E07"(Armoise champêtre), 48 de "E06"(Jujubier), 32 de "E09"(Armoise blanche), 28 de "E04"(Euphorbe), 3 de "E05"(Forssk moq), 2 de "E01"(Alfa) et 2 de "E11"(Astragal). Enfin, "E08" (Tamarix) présente le plus faible nombre avec 1 colonie.



**Figure 16 : Exemple de l'aspect des colonies obtenues sur le milieu PDA.**

### I.2.- Répartition du nombre de colonies par échantillon

La figure 22 montre que l'échantillon de Laurier "E03" est le plus représenté avec 19 % des colonies, suivi de l'échantillon d'Alfa "E10" avec 17,64 %, de l'échantillon de Remth "E02" avec 15,68 %, de l'échantillon d'Armoise champêtre "E07" avec 14,56 %, et de l'échantillon de Jujubier "E06" avec 13,44 %. L'échantillon d'Armoise blanche "E09" représente 8,96 % et l'échantillon d'Euphorbe "E04" 7,84 % des colonies totales. Les autres échantillons présentent généralement un faible pourcentage (**Fig.17**).

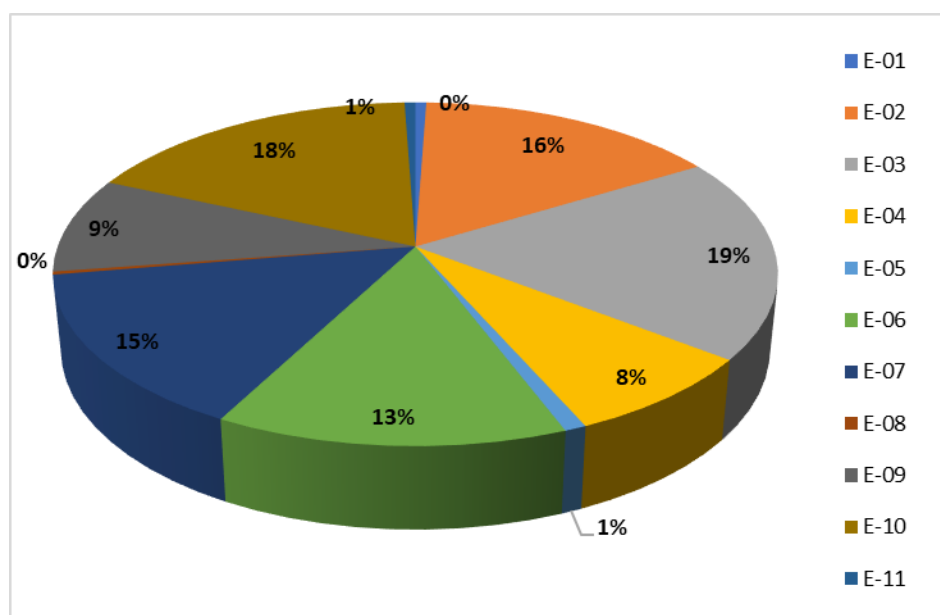


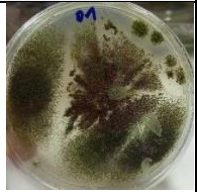
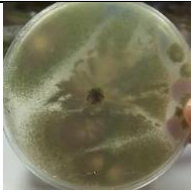
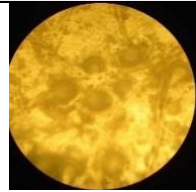
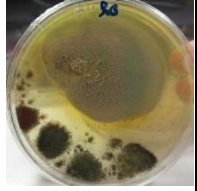

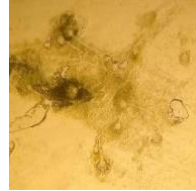
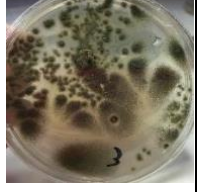
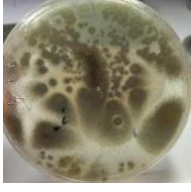

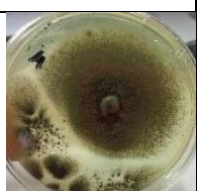


Figure 17 : Répartition du nombre de colonies par échantillon.

### I.3.- Identification des isolats

L'isolement réalisé à partir des rhizosphères des plantes spontanées a permis d'obtenir 13 isolats fongiques appartenant à cinq genres différents. Parmi ceux-ci, on trouve huit espèces d'*Aspergillus*, deux espèces de *Penicillium*, ainsi qu'une espèce de *Fusarium*, *Rhizopus* et *Alternaria* chacune.

Les caractéristiques microscopiques des isolats représentatives sont répertoriées dans le tableau 2. Les caractéristiques macroscopiques de culture des isolats fongiques isolées ont également été décrites, et ces caractéristiques sont résumées dans le tableau 2. Les observations ont été effectuées à des grossissements de 10 et 40. Nous avons suivi la classification adoptée par **Barnett et Hunter (1972)**.

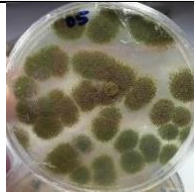

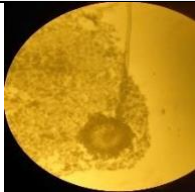

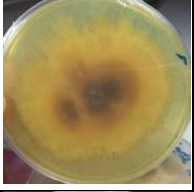
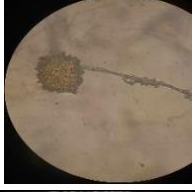

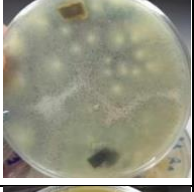



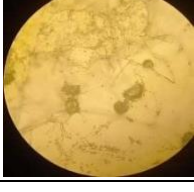
Tableau 3 : Caractérisation des souches fongiques isolées des échantillons de rhizosphère des plantes spontanées de Laghouat (1/3).

Genre	Espèce fongique	Aspect macroscopique (Recto)	Aspect macroscopique (Verso)	Caractéristiques macroscopiques	Aspects microscopiques au grossissement ×40	Caractéristiques microscopiques
<i>Aspergillus</i>	<i>Aspergillus</i> sp1					
	<i>Aspergillus glaucus</i> (L) Link, 1809			Colonies vert olive à gris-vert, poudreuse, croissance rapide, des bords irréguliers.		Les conidiophores courts et lisses, conidies rondes en chaîne.
	<i>Aspergillus fumigatus</i> Fresen, 1867			Poudreuses à granuleuse blanc puis vert, jaune, noir.		Mycélium septe et ramifié conidiospores non cloisonnés, terminé par une vésicule gonflée, portant des phialides en forme de bouteille Les spores produites en longues chaînes au bout des phialides.
	<i>Aspergillus</i> sp4			Revers incolore, jaune, rouge.		Filaments mycéliens fins, septés, réguliers ;

Source : BENHAMIDA K. (2024).

Remarque : La classification est faite selon **Barnett et Hunter (1972)**. Et une communication personnelle de **Dr. HATTAB S.** (enseignant- chercheur à UATL).

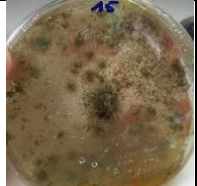
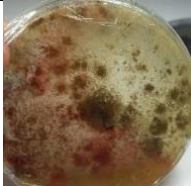

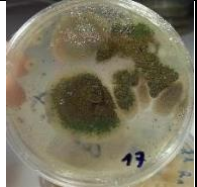
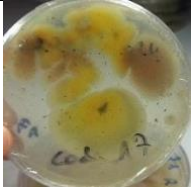




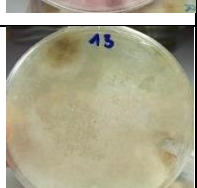
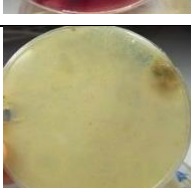
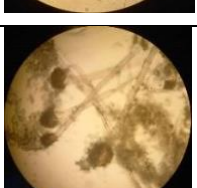

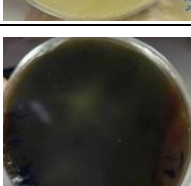

Tableau 2 : Caractérisation des souches fongiques isolées des échantillons de rhizosphère des plantes spontanées de Laghouat (Suite 2/3).

Genre	Espèce fongique	Aspect macroscopique (Recto)	Aspect macroscopique (Verso)	Caractéristiques macroscopiques	Aspects microscopiques au grossissement ×40	Caractéristiques microscopiques
Aspergillus	<i>Aspergillus</i> sp5					
	<i>Aspergillus</i> sp6					
	<i>Aspergillus niger</i> Van Tieghem, 1867			Croissance rapide, colonies planes avec un aspect velouté d'une couleur verte cresson à marron.		Mycélium non cloisonné, la tête porte de nombreux conidiophores, phialides formées sur la vésicule.
	<i>Aspergillus</i> sp8					

Source : BENHAMIDA K. (2024).

Remarque : La classification est faite selon **Barnett et Hunter (1972)**. Et une communication personnelle de **Dr. HATTAB S.** (enseignant- chercheur à UATL).

Tableau 2 : Caractérisation des souches fongiques isolées des échantillons de rhizosphère des plantes spontanées de Laghouat (Suite 3/3).

Genre	Espèce fongique	Aspect macroscopique (Recto)	Aspect macroscopique (Verso)	Caractéristiques macroscopiques	Aspects microscopiques au gros. ×40	Caractéristiques microscopiques
<i>Penicillium</i>	<i>Penicillium</i> sp1			Colonies poudreuses et blanc puis bleu vert généralement vertes, revers incolore.		Filament mycéliens septés, porte des conidiospores. Des spores unicellulaires, globuleuses, cylindriques ou fusiformes, grisâtres ou verdâtres.
	<i>Penicillium</i> sp2			Croissance rapide, des colonies duveteuses à poudreux avec une couleur verte.		Structure en forme de pinceau avec des filaments mycéliens : fins, septés, à bords parallèles.
<i>Fusarium</i>	<i>Fusarium</i> sp.			Croissance rapide avec une texture cotonneuse à laineuse ; blanchâtre puis rosées ; violettes ou jaune. Revers incolore à jaune puis rouge foncé.		La présence de macro conidies fusiformes et cloisonnés. Microconidies uni ou pluricellulaires piriformes fusiformes, cylindriques, ou ovoïdes isolés solitaires ou groupées, disposées ou verticale, ou plus rarement en chainettes.
<i>Rhizopus</i>	<i>Rhizopus</i> sp.			Colonie à croissance rapide et très grossière		Sporanges sombres contenant des spores de couleur pale à foncée
<i>Alternaria</i>	<i>Alternaria</i> sp.			Croissance rapide colonies avec une texture épaisse, aspes duveteux d'une couleur marron à noir.		Filaments septés, fin et régulier bruns foncés à noirs. Conidies pluricellulaires en chaînes brunes irrégulières ; souvent en forme de massue, cloisonnées longitudinalement et transversalement.

Source : BENHAMIDA K. (2024).

Remarque : La classification est faite selon **Barnett et Hunter (1972)**. Et une communication personnelle de **Dr. HATTAB S.** (enseignant- chercheur à UATL).

#### I.4.- Dénombrement des genres fongiques par dilution

Comme le montre la **figure 18**, la répartition des genres fongiques recensés dans les différentes dilutions au cours de la période d'échantillonnage est la suivante :

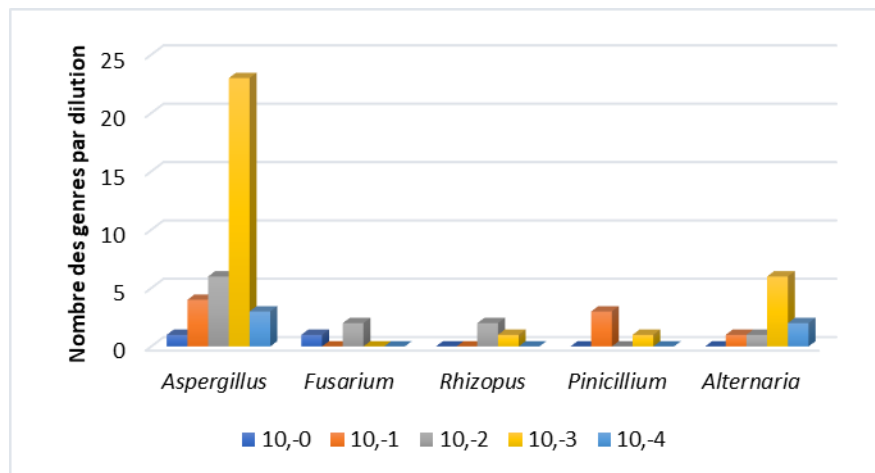


Figure 18 : Nombre des genres fongiques en fonction des dilutions.

- Dilution  $10^{-1}$  : Quatre colonies *Aspergillus* sont notées et suivies par le genre *Penicillium* avec trois colonies.
- Dilution  $10^{-2}$  : *Rhizopus* et *Fusarium* avec deux colonies.
- Dilution  $10^{-3}$  : *Aspergillus* présente dans tous les échantillons avec une valeur plus élevée de vingt-trois colonies, suivi par *Alternaria* six colonies.
- Dilution  $10^{-4}$  : *Aspergillus* marque la première position avec trois colonies, suivi par *Alternaria* avec deux colonies.

#### I.5.- Nombre de genres par échantillon

La différence de la diversité fongique entre les échantillons de sols étudiés est représentée sur la **figure 19** :

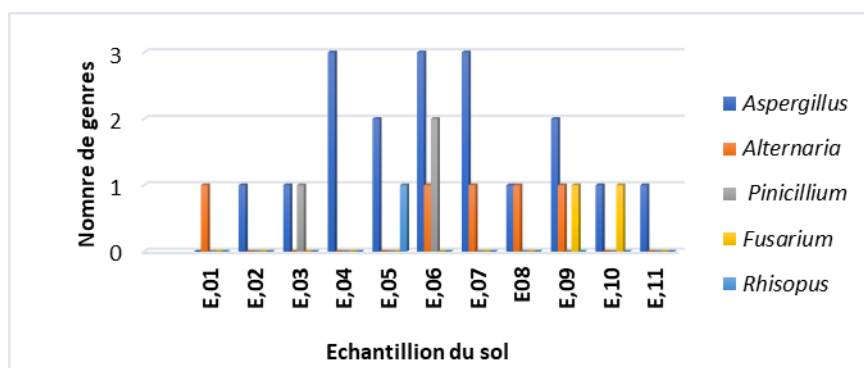


Figure 19 : Nombre total de genres identifiés dans les échantillons du sol étudiés.

Les échantillons de sol E.06 et E.09 présentent la plus grande diversité fongique parmi tous les échantillons étudiés, avec 3 genres fongiques identifiés dans chacun :

- **E.06(Jujubier):** *Penicillium*, *Aspergillus*, *Alternaria* ;
- **E.09(Armoise blanche):** *Fusarium*, *Aspergillus*, *Alternaria*.

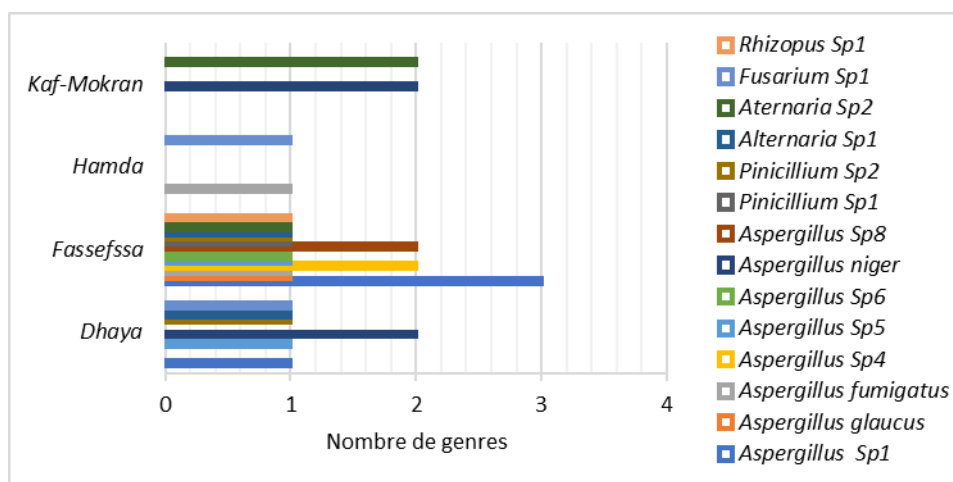
Les échantillons E.03, E.05, E.07 et E.10 se classent en deuxième position avec 2 genres fongiques recensés dans chacun :

- **E.03(Laurier):** *Penicillium*, *Aspergillus* ;
- **E.05(Forssk moq):** *Aspergillus*, *Rhizopus* ;
- **E.07(Armoise champêtre):** *Aspergillus*, *Alternaria* ;
- **E.10(Alfa):** *Aspergillus*, *Fusarium*.

Enfin, les échantillons E.02(Remth), E.04(Euphorbe) et E.08(Tamarix) présentent un seul genre fongique identifié : *Aspergillus*.

#### I.6.- Abondance relative des espèces fongiques par site d'étude

L'analyse des échantillons de sol a permis d'identifier un total de 5 genres fongiques et 14 espèces fongiques (**Fig. 20**).



**Figure 20 : Abondance relative des espèces fongiques par site d'étude.**

Parmi ces espèces, *Fassefssa* se distingue avec le plus grand nombre d'espèces identifiées, soit 11. *Daya* se classe en deuxième position avec 6 espèces, tandis que *Hamda* et *Kaf-Mokran* présentent chacune seulement 2 espèces fongiques.

---

# **Chapitre 2**

---

## **Caractérisation physiologique**

---

## TROISIEME PARTIE : RESULTATS & DISCUSSIONS

### Chapitre 2 : Caractérisation physiologique

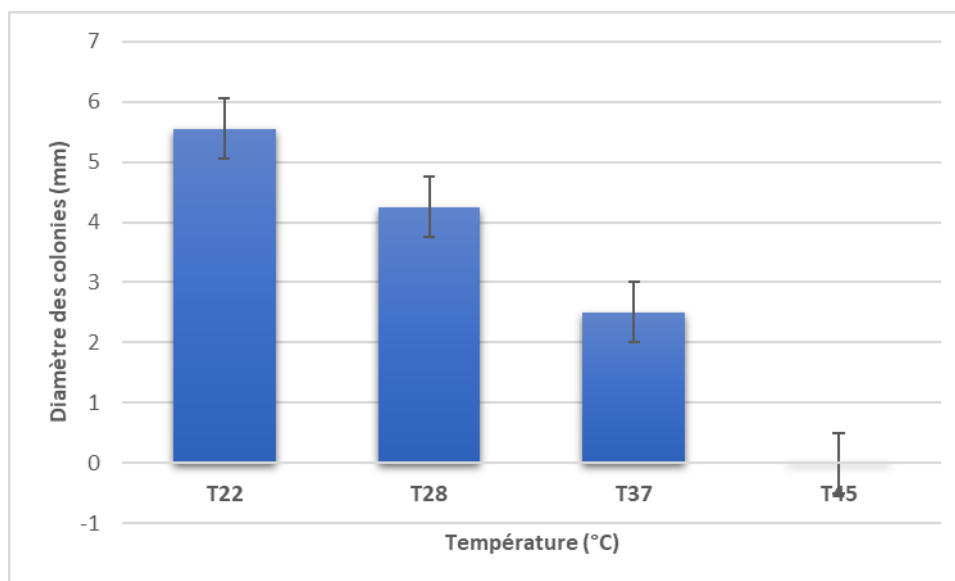
Les résultats des tests de culture effectués sur les isolats fongiques provenant de la rhizosphère de quelques plantes spontanées de la zone d'étude ont été analysés statistiquement.

#### II.1.- Tolérance des isolats fongiques aux quelques facteurs abiotiques

Les caractéristiques physiologiques de la culture des isolats fongiques ont été étudiés pour 04 espèces (*Aspergillus fumigatus*, *Aspergillus* sp6, *Pinicillium* sp2, *Fusarium* sp1) collectées au niveau de notre zone d'étude.

##### II.1.1.- Effet de la température sur le diamètre des colonies des isolats fongiques

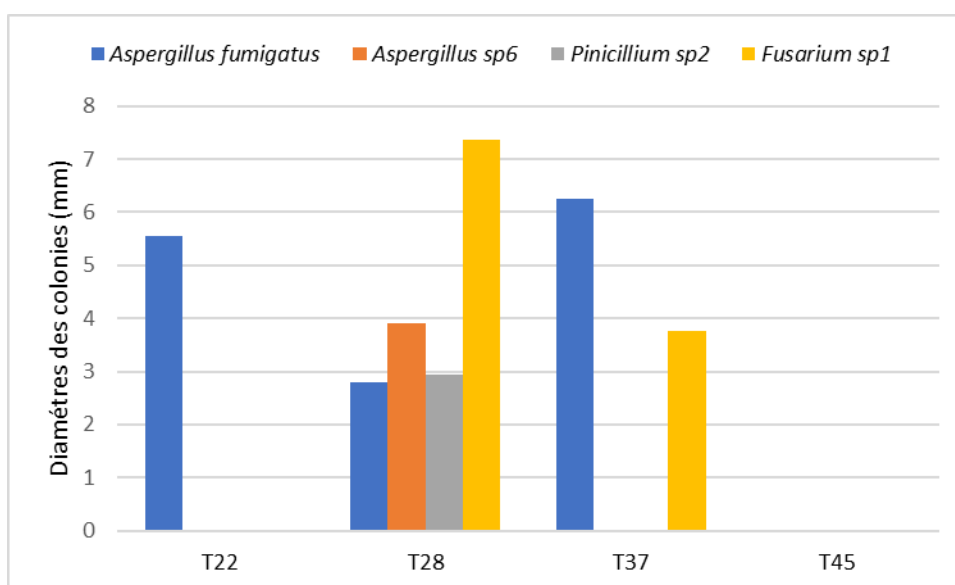
Le test de stress thermique détermine la tolérance des isolats fongiques à différentes températures (22, 28, 37 et 45 °C) en évaluant le diamètre des colonies des champignons testés après 7 jours d'incubation (**Fig. 21**).



**Figure 21 : Effet de la variation de la température sur le diamètre des colonies des isolats fongiques après 7 jours d'incubation.**

Pour la température de 22°C, après 7 jours d'incubation, une croissance nettement plus faible est observée par rapport aux témoins respectifs chez tous les isolats fongiques étudiés. Cette croissance atteint 5,5mm pour l'isolat fongique *Aspergillus fumigatus*.

Après 7 jours d'incubation à 28°C, une croissance rapide est observée chez tous les isolats fongiques étudiés par rapport aux témoins respectifs. La croissance varie entre 3,9mm pour l'isolat fongique d'*Aspergillus* sp6, et 2,8mm pour l'isolat fongique d'*Aspergillus fumigatus*. Une croissance très rapide est observée pour l'isolat fongique de *Fusarium* sp1, avec un diamètre variant entre 6,8mm et 7,9mm. En revanche, pour l'isolat fongique : *Penicillium* sp2, les diamètres varient entre 2,8mm et 3,1mm (**Fig. 22**).



**Figure 22 : Effet de la variation de la température sur le diamètre des colonies de chaque isolat fongique après 7 jours d'incubation.**

L'évaluation du diamètre des colonies de champignons testés à une température de 37°C, après 7 jours d'incubation, montre une croissance nettement plus faible par rapport aux témoins respectifs pour tous les isolats fongiques étudiés. Cette croissance varie de 3,5mm à 4mm pour l'isolat fongique de *Fusarium* sp1, tandis qu'une croissance très rapide, avec un diamètre variant de 5mm à 7,5mm, est observée chez l'isolat fongique d'*Aspergillus fumigatus*.

L'évaluation du diamètre des colonies des champignons endophytes testés à une température de 45°C, après 7 jours d'incubation, montre qu'aucune croissance n'a été observée pour les isolats fongiques utilisés par rapport aux témoins respectifs enregistrés chez tous les isolats fongiques étudiés.

La température idéale pour le développement des champignons varie selon l'espèce, mais généralement, les champignons de ces genres se développent bien dans une gamme de températures modérées. Voici quelques informations générales basées sur les références

bibliographiques disponibles : *Aspergillus fumigatus*, température optimale : 37°C, il peut croître dans une gamme de 12-55°C (Latgé, 1999) ; *Aspergillus* sp6, température optimale : 30-37°C (Klich, 2002) ; *Penicillium* sp2, température optimale : 20-25°C, il peut croître à des températures plus basses (jusqu'à 5°C pour certaines espèces) (Pitt & Hocking, 2009) ; *Fusarium* sp1, température optimale : 25-30°C (Leslie & Summerell, 2006).

### II.1.2.- Effet de pH sur le diamètre des colonies des isolats fongiques

Ce test vise à montrer l'influence de la variation du pH : 4, 5, 6, 7, 8 et 9 du milieu de culture sur l'activité antifongique des champignons. Afin de surveiller les résultats de cette méthode, des évaluations ont été réalisées après 5 jours et après 9 jours d'incubation.

#### II.1.2.1.- Après 5 jours

Il est important de noter que le *Fusarium* sp1 est prédominant à tous les pH, avec une croissance rapide et un diamètre des colonies variant de 1,9mm à 4,4mm. En ce qui concerne l'*Aspergillus fumigatus*, il se développe à toutes les valeurs de pH, mais avec une croissance faible, et un diamètre variant de 1mm à 2mm (Fig. 23).

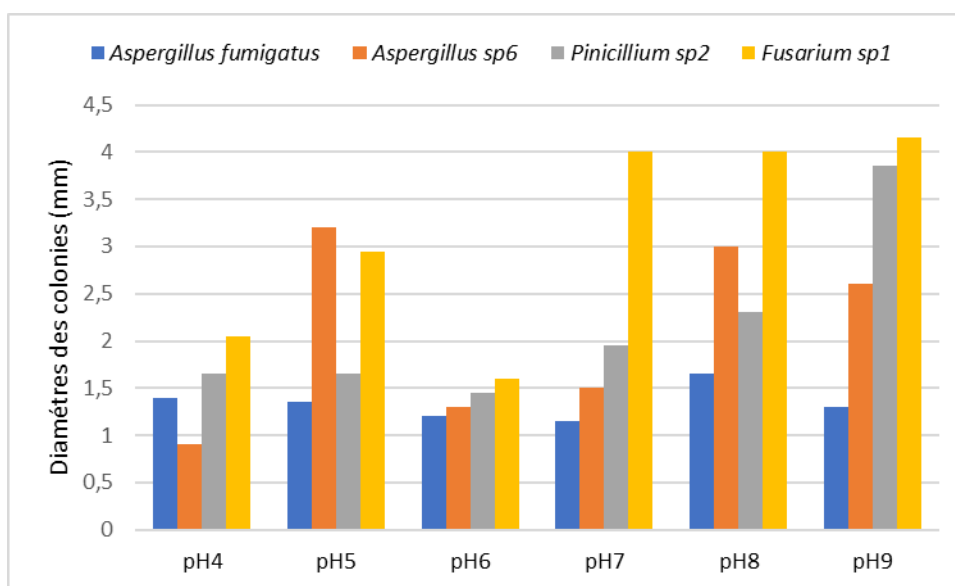
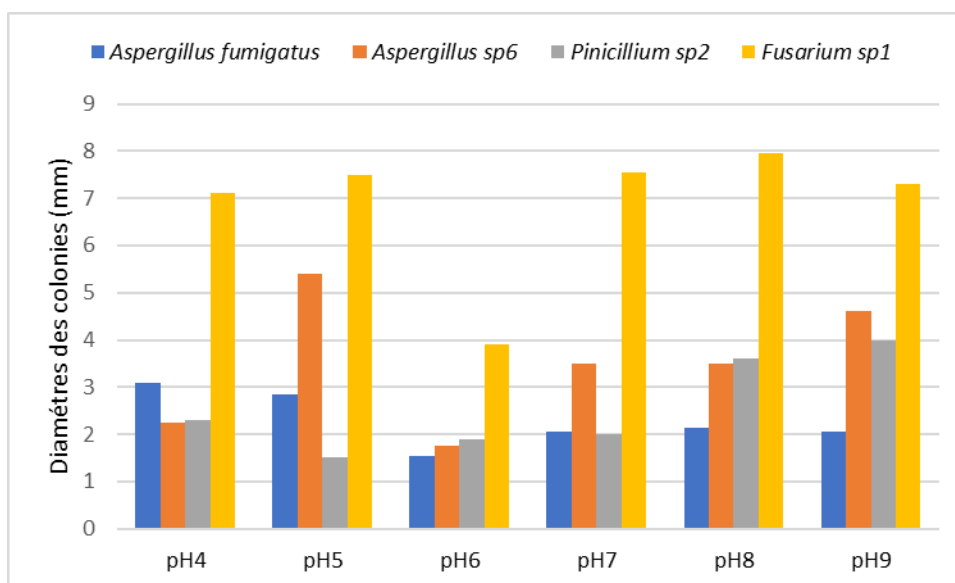


Figure 23 : Effet de la variation du pH sur le diamètre des colonies des isolats fongiques après 5 jours d'incubation.

Les pH optimaux pour la croissance d'*Aspergillus* sp6 sont 5, 8 et 9 avec des diamètres variants entre 3,8mm, 4mm, et 4,2mm. En ce qui concerne les pH optimaux pour la croissance de *Penicillium* sp2, ils sont 8 et 9 avec des diamètres variants entre 4,3mm et 5,6mm.

### II.1.2.2.- Après 9 jours

La **figure 24** représente les résultats après 9 jours d'incubation.



**Figure 24 : Effet de la variation du pH sur le diamètre des colonies des isolats fongiques après 9 jours d'incubation.**

Il est important de noter que le *Fusarium* est toujours prédominant à tous les pH, avec une croissance très rapide et un diamètre des colonies variant de 7,1mm à 8mm. Quant à l'*Aspergillus fumigatus*, il se développe à tous les pH, mais avec une croissance moyenne et un diamètre variant de 0,1mm à 3,2mm.

## II.2.- Evaluation de l'activité antagoniste des isolats fongiques

### II.2.1.- Confrontation directe

#### II.2.1.1.- Méthode des disques

Après 7 jours d'incubation et des observations quotidiennes, les résultats montrent que la croissance mycélienne des isolats fongiques témoins est plus importante que celle obtenue avec les différentes confrontations (pathogène-antagoniste) (**Tab.3**).

Le taux d'inhibition maximum a été enregistré en présence d'*Aspergillus fumigatus*, avec 83,07% vis-à-vis de *F. oxysporum* f.sp. albedinis (FOA) (**Fig. 25**), 64,28 % vis-à-vis de *Fusarium culmorum* (**Fig.26**), et 42,85% vis-à-vis de *Fusarium graminearum*. En présence de *Fusarium sp1*, le taux d'inhibition est de 50,76% vis-à-vis de FOA, 42,85% vis-à-vis de *Fusarium culmorum*, et 39,68% vis-à-vis de *Fusarium graminearum* (**Fig.27**).

Tableau4 : Taux d'inhibition (en pourcentage) de la croissance mycélienne des agents pathogènes étudiés par méthode des disques.

Pathogènes Isolats	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>Albedinis</i> (FOA)	<i>Fusarium culmorum</i>	<i>Fusarium graminearum</i>
<i>Aspergillus fumigatus</i>	83,07%	64,28%	42,85%
<i>Aspergillus</i> sp6	46,15%	28,57%	28,57%
<i>Penicillium</i> sp2	16,92%	20%	17,46%
<i>Fusarium</i> sp1	50,76%	42,85%	39,68%

*Aspergillus* sp6 a montré un taux d'inhibition de 46,15% vis-à-vis de FOA (Fig.25), 28,57% vis-à-vis de *Fusarium culmorum* (Fig.26), et 28,57% vis-à-vis de *Fusarium graminearum*. Par contre, *Penicillium* sp2 a marqué le plus faible taux d'inhibition, avec 16,92% vis-à-vis de FOA 20% vis-à-vis de *Fusarium culmorum*, et 17,46% vis-à-vis de *Fusarium graminearum* (Fig.27).

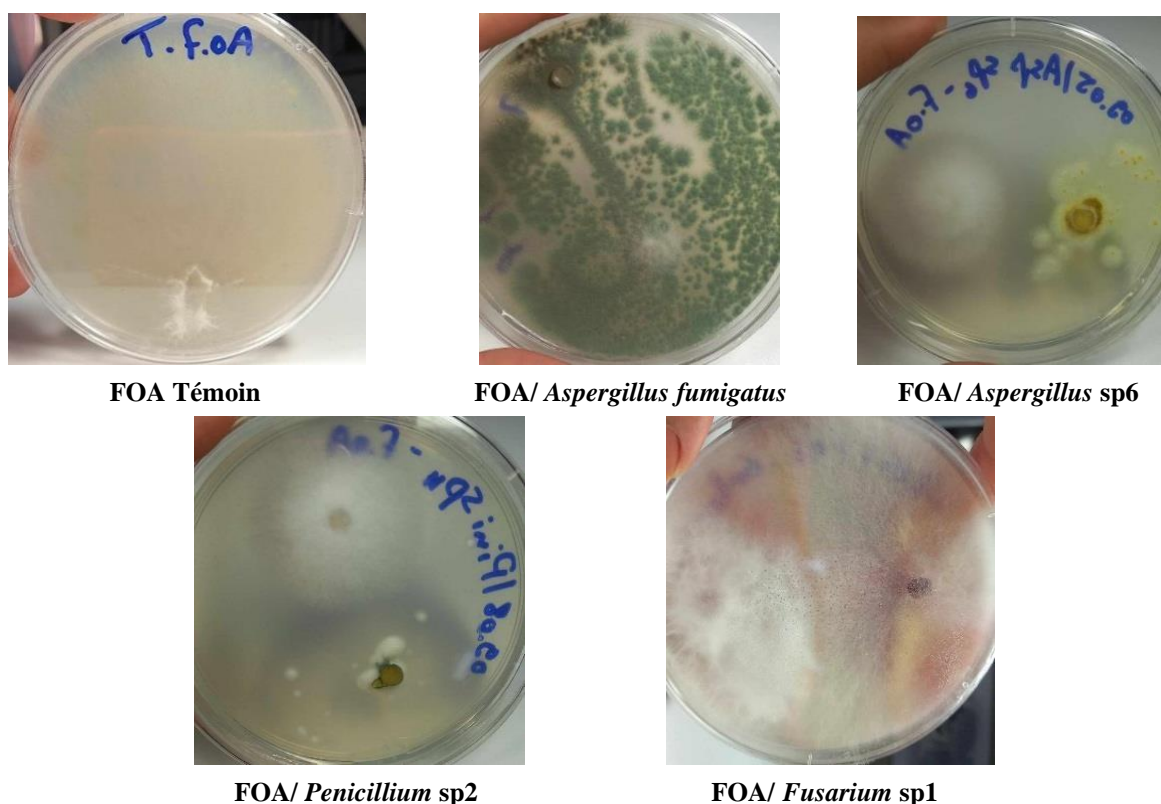


Figure 25 : Effet d'inhibition de la croissance mycélienne de *Fusarium oxysporum* f. sp. *Albedinis* (FOA), par confrontation directe (méthode des disques), en présence des champignons rhizosphériques après 7 jours d'incubation.

Les résultats obtenus montrent que la croissance mycélienne des souches témoins est plus importante que celle observée lors des différentes confrontations (pathogène-antagoniste). *Aspergillus fumigatus* produit un grand nombre de spores, ce qui le rend plus compétitif en augmentant ses capacités inhibitrices. La compétition entre les microorganismes se fait également pour les nutriments et l'espace occupé. En excréant des chélateurs spécifiques de fer-ferrique, nommés sidérophores, ils mobilisent le fer et inhibent la croissance d'autres microorganismes. *Aspergillus fumigatus* est capable de synthétiser des sidérophores, un pigment diffusible observé dans le milieu de culture dans nos boîtes (Schrettl & Haas, 2011 ; Beauvais & Latgé, 2020 ; Keller, 2020 ; Carbo *et al.*, 2021).

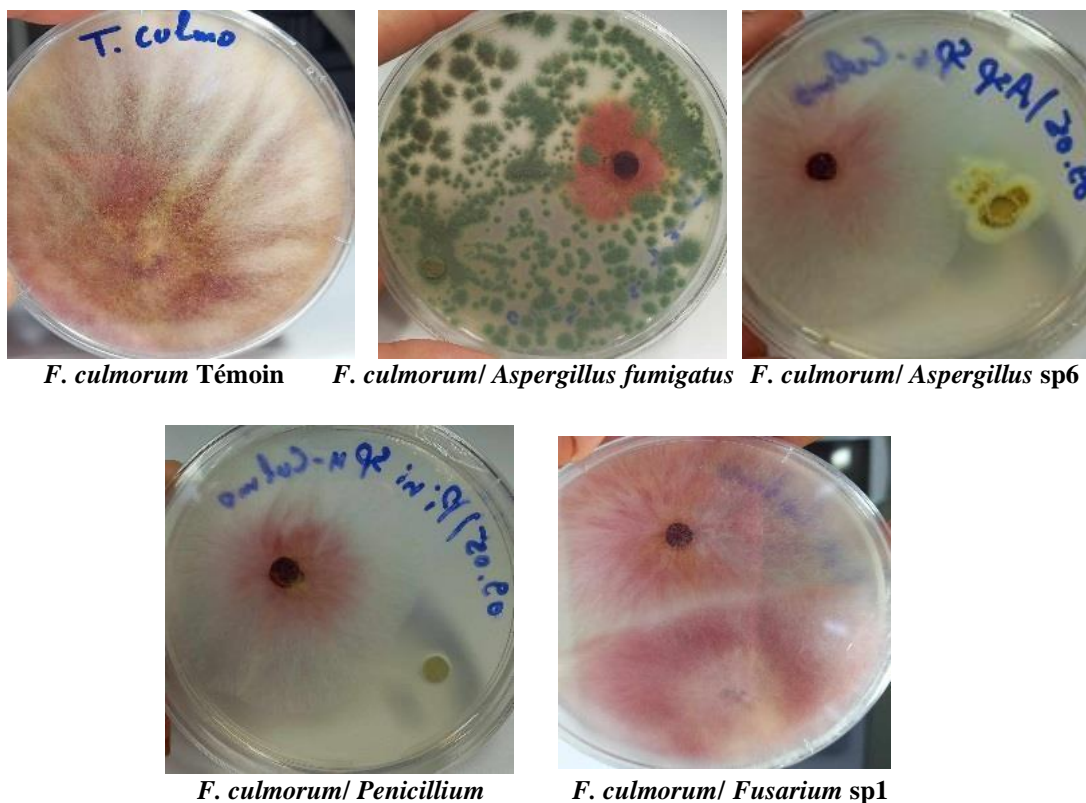


Figure 26 : Effet d'inhibition de la croissance mycélienne de *Fusarium culmorum*, par confrontation directe (méthode des disques), en présence des champignons rhizosphériques après 7 jours d'incubation.

*Aspergillus* sp6 utilise l'antibiose comme mécanisme d'action pour concurrencer les autres microorganismes, produisant des métabolites très toxiques (Li *et al.*, 2023). Au-delà d'une période de sept jours, *Fusarium* sp1 envahit les colonies de *Fusarium* et sporule même sur celles-ci, révélant ainsi son pouvoir hautement myco-parasitaire. L'envahissement de *Fusarium* sp1 est rapide et intense (Zhang *et al.*, 2023).

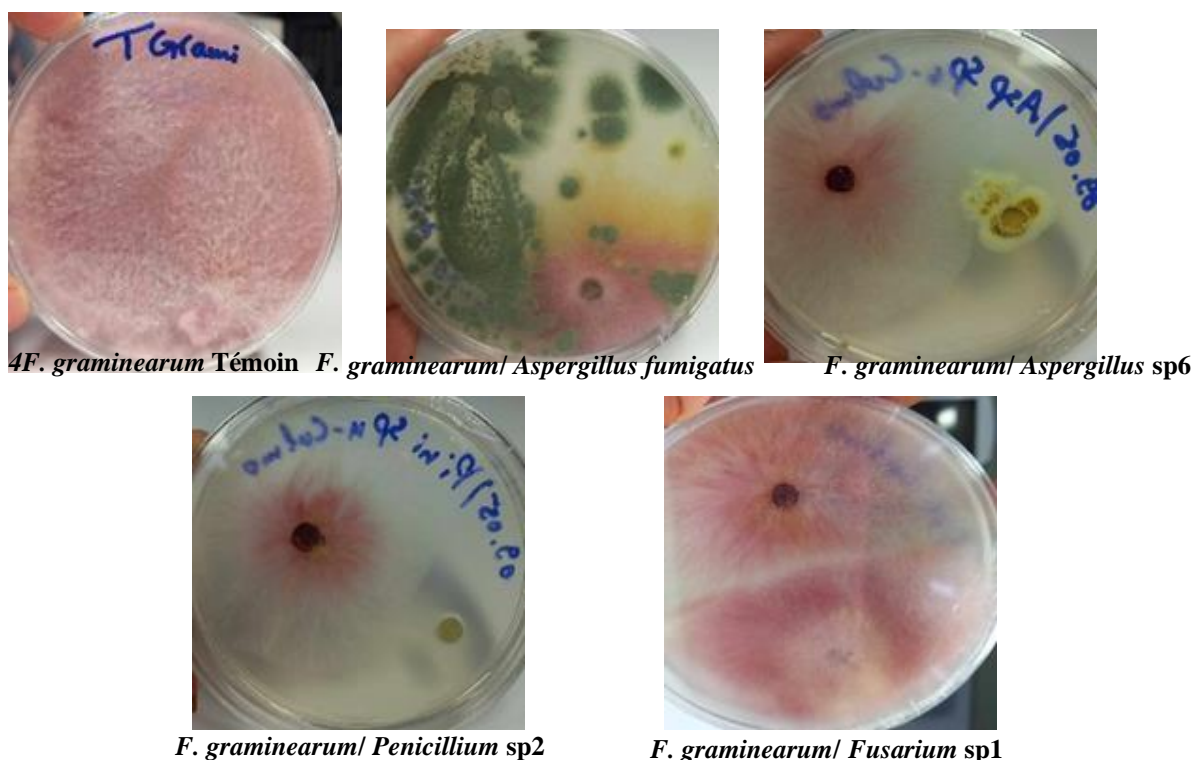


Figure 27 : Effet d'inhibition de la croissance mycélienne de *Fusarium graminearum*, par confrontation directe (méthode des disques), en présence des champignons rhizosphériques après 7 jours d'incubation.

*Penicillium* sp2 utilise le mycoparasitisme contre les champignons pathogènes étudiés, FOA, *F. culmorum* et *F. graminearum*. L'inhibition de ces derniers se fait sans pénétration des hyphes, ce qui peut être considéré comme un effet de mycoparasitisme indirect (Klich, 2002 ; McMullen *et al.*, 2012 ; Palumbo *et al.*, 2016 ; Podgórska-Kryszczuk *et al.*, 2022).

### II.2.1.2.- Méthode des stries et du disque

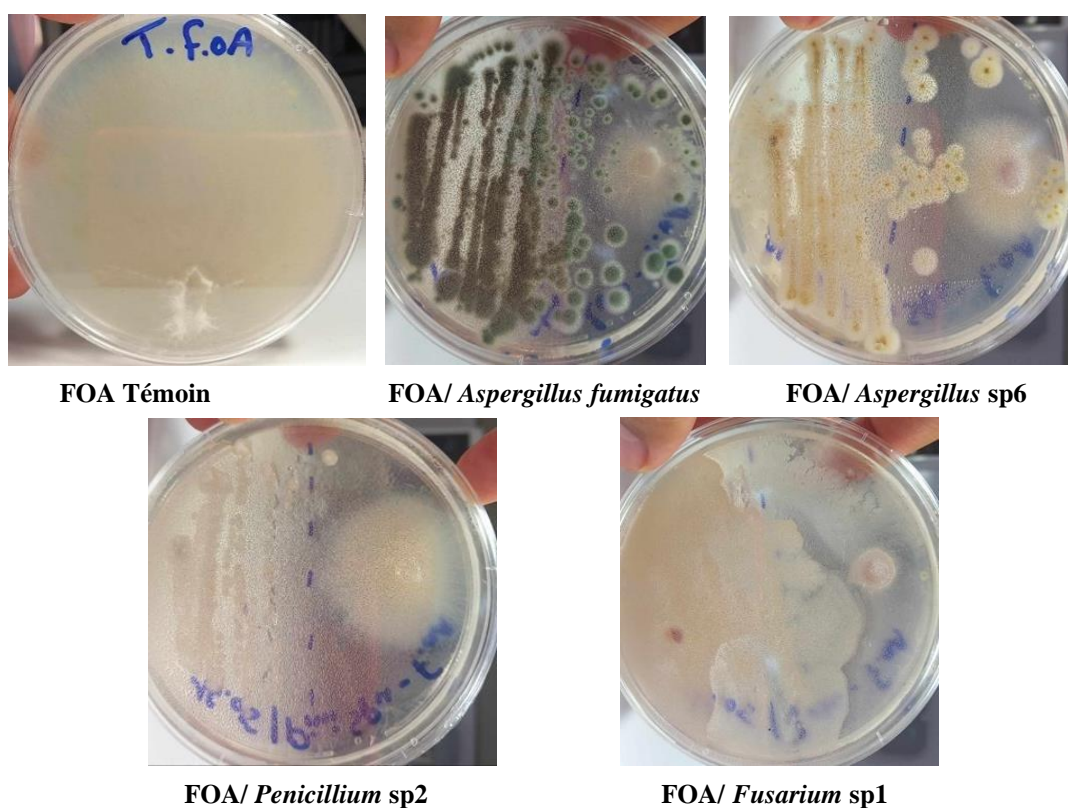
Les résultats obtenus après 7 jours d'incubation et une observation quotidienne indiquent que la croissance mycélienne des souches témoins est supérieure à celle observée lors des différentes confrontations (pathogène-antagoniste) (Tab.4).

Tableau 5 : Taux d'inhibition (en pourcentage) de la croissance mycélienne des agents pathogènes étudiés par méthode des stries et du disque.

Pathogènes Isolats	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. Albedinis (FOA)	<i>Fusarium culmorum</i>	<i>Fusarium graminearum</i>
<i>Aspergillus fumigatus</i>	69,23%	21,42%	28,57%
<i>Aspergillus</i> sp6	56,92%	1,42%	15,87%
<i>Penicillium</i> sp2	38,46%	52,85%	19,04%
<i>Fusarium</i> sp1	83,07%	60%	34,92%

Le taux d'inhibition maximum a été enregistré en présence de *Fusarium* sp1, avec 83,07% vis-à-vis de FOA, (**Fig.28**) 60% vis-à-vis de *F. culmorum* (**Fig.29**), et 34,92% vis-à-vis de *F. graminearum* (**Fig.30**).

En présence d'*Aspergillus fumigatus*, le taux d'inhibition est de 69,23% vis-à-vis de FOA (**Fig.28**) de 21,42% vis-à-vis de *F. culmorum* (**Fig.29**), et de 28,57% vis-à-vis de *F. graminearum* (**Fig.30**) (Bilska *et al.*, 2018 ; Park *et al.*, 2019 ; Khan & Javaid, 2022 ; Blaszczyk *et al.*, 2023).



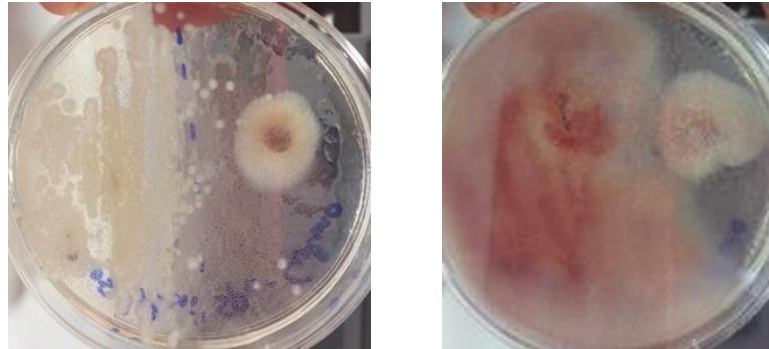
**Figure 28 :** Effet d'inhibition de la croissance mycélienne de *Fusarium oxysporum* f. sp. Albedinis (FOA), par confrontation directe (méthode des stries et du disque), en présence des champignons rhizosphériques après 7 jours d'incubation.

*Penicillium* sp2 a montré un taux d'inhibition de 38,46% vis-à-vis de FOA (**Fig.28**), de 52,85% vis-à-vis de *F. culmorum* (**Fig.29**), et de 19,04% vis-à-vis de *F. graminearum* (**Fig.30**).

En revanche, *Aspergillus* sp6 a marqué le faible taux d'inhibition, avec 56,92% vis-à-vis de FOA (**Fig.28**), 1,42% vis-à-vis de *F. culmorum* (**Fig.29**), et 15,87% vis-à-vis de *F. graminearum* (**Fig.30**) (Zhang *et al.*, 2016 ; Samy & Ignacimuthu, 2020).



*F. culmorum* Témoin    *F. culmorum/ Aspergillus fumigatus*    *F. culmorum/ Aspergillus sp6*



*F. culmorum/ Penicillium*

*F. culmorum/ Fusarium sp1*

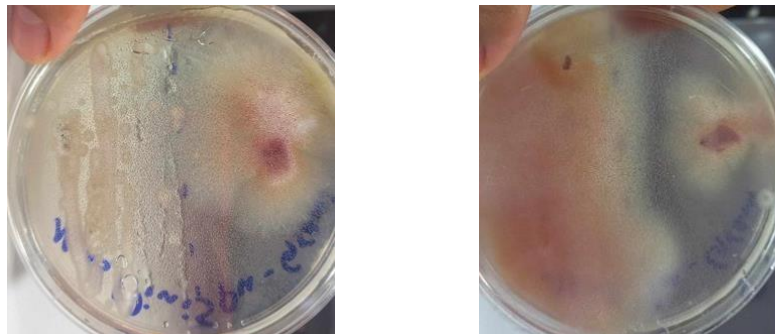
Figure 29 : Effet d'inhibition de la croissance mycélienne de *Fusarium culmorum*, par confrontation directe (méthode des stries et du disque), en présence des champignons rhizosphériques après 7 jours d'incubation.



*F. graminearum* Témoin

*F. graminearum/ Aspergillus fumigatus*

*F. graminearum/ Aspergillus sp6*



*F. graminearum/ Penicillium sp2*

*F. graminearum/ Fusarium sp1*

Figure 30 : Effet d'inhibition de la croissance mycélienne de *Fusarium graminearum*, par confrontation directe (méthode des stries et du disque), en présence des champignons rhizosphériques après 7 jours d'incubation.

## II.2.2.- Confrontation indirecte

Cette technique nous a permis de mettre en évidence l'effet inhibiteur à distance d'*Aspergillus fumigatus* et *Aspergillus* sp6 sur différents agents pathogènes testés (Fig.31).

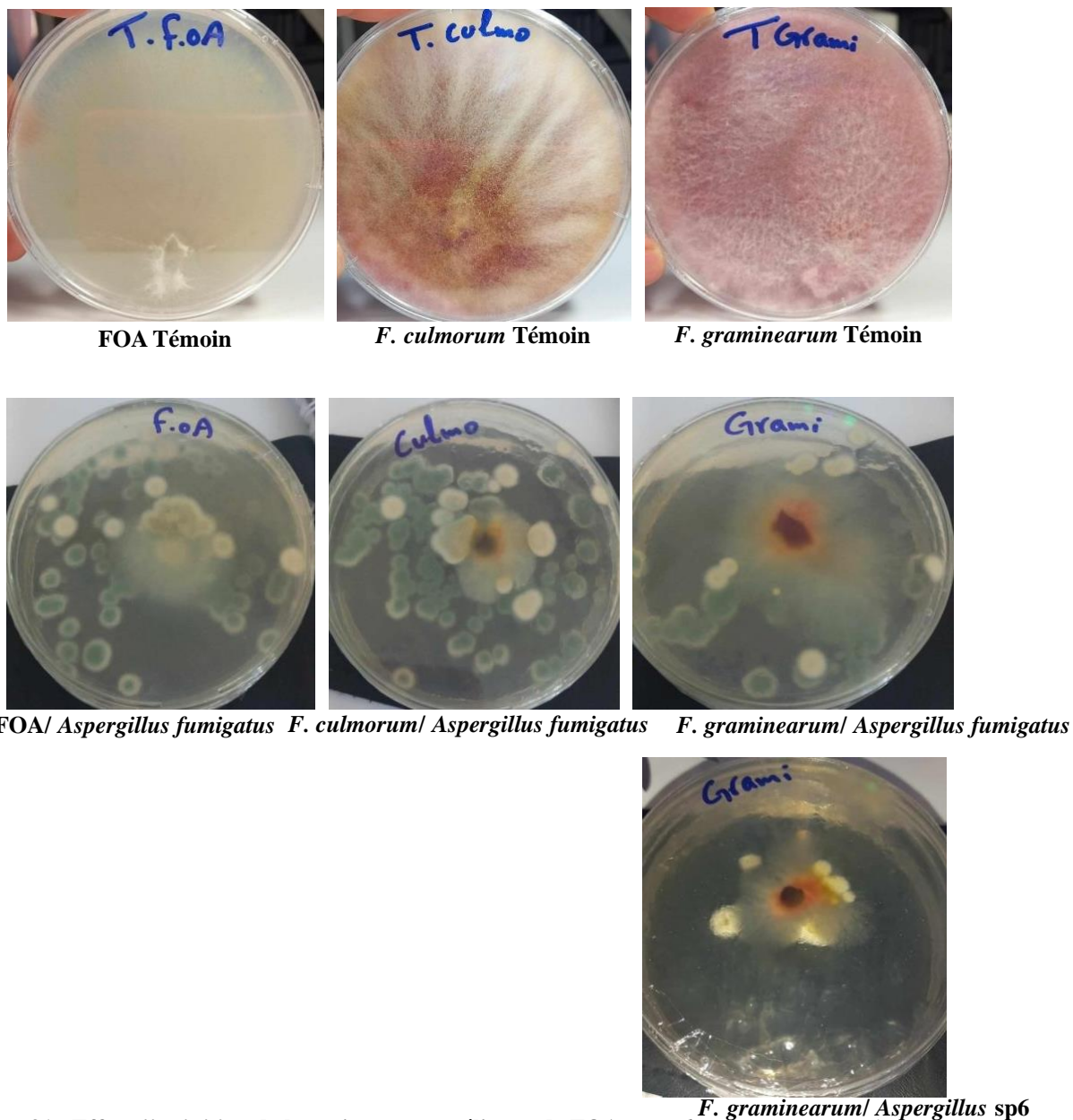


Figure 31 : Effet d'inhibition de la croissance mycélienne de FOA, *F. culmorum* et *F. graminearum*, par confrontation indirecte, en présence d'*Aspergillus fumigatus* et *Aspergillus* sp6 après 7 jours d'incubation.

Les résultats montrent un ralentissement de la croissance mycélienne des souches pathogènes par les antagonistes, comparativement aux témoins. Contrairement au test de confrontation directe, la croissance mycélienne continue d'évoluer avec le temps. Malgré l'absence de contact direct, les antagonistes exercent un effet inhibiteur sur le développement des colonies pathogènes. Cet effet est évalué en mesurant les diamètres des colonies pathogènes en présence et en absence de l'antagoniste.

Les résultats indiquent que l'inhibition est due à la production de substances volatiles par *Aspergillus fumigatus* et *Aspergillus* sp6, capables de limiter et même de stopper le développement des agents pathogènes. La capacité à produire ces substances varie selon les isolats. Après 7 jours d'incubation avec une observation quotidienne des isolats fongiques sélectionnés d'après les résultats des techniques de confrontation directe, les résultats montrent que l'effet inhibiteur sur la croissance mycélienne des pathogènes par *Aspergillus fumigatus* et *Aspergillus* sp6 est plus important comparé aux autres antagonistes (**Tab.5**).

**Tableau 6 : Taux d'inhibition (en pourcentage) de la croissance mycélienne des agents pathogènes étudiés par confrontation indirecte.**

Pathogènes Isolats	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>Albedinis</i> (FAO)	<i>Fusarium culmorum</i>	<i>Fusarium graminearum</i>
<i>Aspergillus fumigatus</i>	40%	42,85%	50%
<i>Aspergillus</i> sp6	-	-	87,3%

Le taux d'inhibition maximum a été enregistré en présence d'*Aspergillus* sp6 avec 87,30% vis-à-vis de FAO. En présence d'*Aspergillus fumigatus*, le taux d'inhibition est de 40% vis-à-vis de FAO, 42,85% vis-à-vis de *F. culmorum*, et 50% vis-à-vis de *F. graminearum* (**Fig.31**).

---

# *Discussion générale*

---

## Discussion générale

Le présent travail a consisté à évaluer la diversité et à identifier les microorganismes présents dans la rhizosphère de quelques plantes spontanées de différentes régions de Laghouat. Les résultats de la caractérisation morphologique, tant macroscopique que microscopique, de nos souches (*Aspergillus*, *Fusarium*, *Alternaria*, *Rhizopus* et *Penicillium*), étudiées sur milieu PDA, le plus couramment utilisé, ont révélé cinq morphotypes différents : cotonneux, granuleux, duveteux, floconneux et poudreux.

La diversité fongique varie entre les échantillons de sols étudiés. L'échantillon E.06 a révélé le plus grand nombre de genres en comparaison avec les autres échantillons. Au total, cinq genres fongiques et 14 espèces ont été identifiés. *Fassefssa* se classe en première position avec 11 espèces, suivi de *Daya* avec 6 espèces, tandis que *Hamda* et *Kaf-Mokran* ne contiennent que 2 espèces chacun.

L'effet de la température sur la croissance mycélienne des différents isolats fongiques a été observé sur le milieu PDA. Une inhibition totale de la croissance mycélienne est observée à 45 °C, tandis qu'à 37 °C, la croissance est ralentie pour toutes les isolats fongiques. La croissance maximale (optimale) est observée à 22 °C et 28 °C pour toutes les isolats fongiques.

L'effet des différents pH sur la croissance des isolats fongiques isolées montre un effet significatif. Après 7 jours d'incubation, la meilleure croissance est observée au pH 4 pour les isolats fongiques *Fusarium* sp1 et *Aspergillus* sp6, suivie du pH 5. Une différence significative dans la croissance des isolats fongiques n'a pas été observée aux pH 8 et 9. Après 48 heures d'incubation, un envahissement mycélien total de la surface de la boîte de Pétri est observé. La croissance la plus faible est observée au pH 6 pour *Aspergillus fumigatus* (Rangel *et al.*, 2015 ; Dhingra & Andes, 2019 ; Le & van der Heijden, 2019 ; Jain & Hasan, 2020 ; Kalra & Mehrotra, 2021).

Les résultats des tests d'antagonisme par confrontation directe, utilisant des isolats fongiques *Aspergillus fumigatus*, *Aspergillus* sp6, *Penicillium* sp2, et *Fusarium* sp1, montrent un effet inhibiteur sur les isolats fongiques pathogènes. Les colonies des isolats

pathogènes occupent une très petite surface comparativement au témoin, correspondant à une inhibition de la croissance mycélienne de l'agent pathogène.

Les tests d'antagonisme *in vitro* contre trois souches pathogènes ont donné des résultats positifs avec les deux méthodes testées (confrontation directe et indirecte), utilisant *Aspergillus fumigatus* (Kowalik, 2007 ; Aydogdu *et al.*, 2008 ; Fracchia *et al.*, 2011), *Aspergillus* sp6, *Penicillium* sp2 (Bezerra *et al.*, 2012 ; Nicoletti & De Stefano, 2012 ; Ben Mefteh *et al.*, 2018), et *Fusarium* sp1 comme souches antagonistes. Ces souches ont totalement inhibé la croissance des champignons pathogènes. Aussi, Elad *et al.*, (1982) ; Gupta & Tuohy, (2011) et Howell (2003) montrent l'effet antagoniste général de quelques genres utilisés sur l'environnement.

---

# *Conclusion générale*

---

## Conclusion générale

Ce travail a mis en lumière la diversité fongique présente dans la rhizosphère de quelques plantes spontanées dans différentes régions de Laghouat. À travers des méthodes de caractérisation morphologique et des tests de croissance sur milieu PDA, cinq genres fongiques (*Aspergillus*, *Fusarium*, *Alternaria*, *Rhizopus* et *Penicillium*) ont été identifiés, représentant 14 espèces distinctes. La richesse en espèces varie selon les échantillons de sol, avec *Fassefssa* et *Daya* se distinguant par la plus grande diversité fongique, tandis que *Hamda* et *Kaf-Mokran* montrent une diversité relativement faible.

Les effets de la température et du pH sur la croissance mycélienne des souches isolées ont également été examinés. Il a été observé que la température optimale pour la croissance se situe entre 22 °C et 28 °C, tandis qu'une inhibition totale se produit à 45 °C. En ce qui concerne le pH, une croissance optimale a été observée à un pH de 4 pour certaines souches de *Fusarium* et *Aspergillus*, avec une croissance significativement réduite à des pH plus élevés.

Les tests d'antagonisme ont révélé que certaines souches, notamment *Aspergillus fumigatus*, *Aspergillus* sp6, *Penicillium* sp2 et *Fusarium* sp1, possèdent des propriétés inhibitrices sur la croissance de pathogènes fongiques. Ces résultats sont prometteurs pour le développement de biocontrôles naturels contre les maladies fongiques des plantes.

En conclusion, cette étude contribue à une meilleure compréhension de la diversité microbienne dans les sols de Laghouat et offre des perspectives intéressantes pour l'application de microorganismes antagonistes dans la gestion des pathogènes fongiques. Les données obtenues peuvent servir de base pour des recherches futures visant à :

### **Études approfondies sur les mécanismes d'antagonisme :**

- Mener des recherches supplémentaires pour comprendre les mécanismes biochimiques et moléculaires par lesquels les isolats antagonistes inhibent les pathogènes fongiques.
- Identifier les métabolites secondaires produits par ces isolats qui pourraient avoir des propriétés antifongiques.
- Effectuer des tests de pathogénicité.

- Compléter l'identification des isolats.

**Application en conditions réelles :**

- Tester l'efficacité des isolats antagonistes identifiées dans des conditions de champ pour évaluer leur potentiel en tant qu'agents de biocontrôle.
- Étudier l'impact de ces isolats sur la santé des plantes et les rendements agricoles dans des environnements naturels et agricoles.

**Exploration de la synergie entre souches :**

- Étudier les interactions entre différentes souches antagonistes pour déterminer si des combinaisons de souches peuvent avoir un effet synergique sur la suppression des pathogènes.
- Développer des consortia microbiens pour une gestion intégrée des maladies fongiques.

**Extension à d'autres régions et cultures :**

- Étendre la recherche à d'autres régions et types de sols pour évaluer la diversité microbienne et le potentiel des souches antagonistes dans divers contextes agroécologiques.
- Appliquer les souches identifiées à d'autres cultures pour vérifier leur efficacité dans des systèmes agricoles variés.

---

*Références  
bibliographiques*

---

## Références bibliographiques

### -A-

1. **Aerts, R. (2003).** The Role of Various Types of Mycorrhizal Fungi in Nutrient Cycling and Plant Competition. In: van der Heijden, M.G.A., Sanders, I.R. (eds) Mycorrhizal Ecology. Ecological Studies, vol 157. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-38364-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-540-38364-2_5)
2. **Al-Hatmi, A.M.S., Meis, J.F., & de Hoog, G.S. (2016).** Fungi Associated with Plants in Arid and Semi-Arid Regions. *Critical Reviews in Microbiology*, 42(2), 354-378. DOI: [10.3109/1040841X.2014.913002](https://doi.org/10.3109/1040841X.2014.913002)
3. **Arshad, M., Frankenberger, W.T., & Macler, B.A. (2007).** Plant Growth-Promoting Rhizobacteria and Root System Functional Development in Desert Plants. *Journal of Arid Environments*, 70(3), 427-439. DOI: [10.1016/j.jaridenv.2007.01.005](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2007.01.005)
4. **Aydogdu, H., Asan, A., & Azar, C. (2008).** Biological control potential of *Aspergillus fumigatus* against *Fusarium* species in agricultural soils. *Mycopathologia*, 165(5), 357-368. doi:[10.1007/s11046-007-9089-2](https://doi.org/10.1007/s11046-007-9089-2)

### -B-

5. **Barea, JM., Azcón, R., Azcón-Aguilar, C. (2008).** Mycorrhizal Fungi and Plant Growth Promoting Rhizobacteria. In: Varma, A., Abbott, L., Werner, D., Hampp, R. (eds) *Plant Surface Microbiology*. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-74051-3\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-540-74051-3_20)
6. **Beauvais, A., & Latgé, J. P. (2020).** Analysis and description of the stages of *Aspergillus fumigatus* biofilm formation using scanning electron microscopy. *BMC Microbiology*, 20(1), 1-10. <https://doi.org/10.1186/s12866-020-01809-7>
7. **Ben Mefteh, F., Daoud, A., Chenari Bouket, A., et al. (2018).** Date palm trees root-derived endophytes as fungal cell factories for diverse bioactive metabolites. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(7), 1986. [doi:10.3390/ijms19071986](https://doi.org/10.3390/ijms19071986)
8. **Berendsen, R.L., Pieterse, C.M., & Bakker, P.A. (2012).** Plant–Microbe Interactions Promoting Plant Growth and Health: Perspectives for Controlled Use of Microorganisms in Agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 3, 248. DOI: [10.3389/fpls.2012.00248](https://doi.org/10.3389/fpls.2012.00248)
9. **Bezerra, J. D., Santos, M. G., Svedese, V. M., et al. (2012).** Richness of endophytic fungi isolated from *Opuntia ficus-indica* Mill. (Cactaceae) and preliminary screening for enzyme production. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28(5), 1989-1995. [doi:10.1007/s11274-011-1001-2](https://doi.org/10.1007/s11274-011-1001-2)

10. **Bilska, K.; Stuper-Szablewska, K.; Kulik, T.; Buśko, M.; Żaluski, D.; Jurczak, S.; Perkowski, J. (2018).** Changes in Phenylpropanoid and Trichothecene Production by *Fusarium culmorum* and *F. graminearum* Sensu Stricto via Exposure to Flavonoids. *Toxins*, 10, 110. <https://doi.org/10.3390/toxins10030110>
11. **Błaszczak, L.; Ćwiek-Kupczyńska, H.; Hoppe Gromadzka, K.; Basińska-Barczak, A.; Stępień, Ł.; Kaczmarek, J.; Lenc, L. (2023).** Containment of *Fusarium culmorum* and Its Mycotoxins in Various Biological Systems by Antagonistic *Trichoderma* and *Clonostachys* Strains. *J. Fungi*, 9, 289. <https://doi.org/10.3390/jof9030289>
12. **Błaszowski, J., Kozłowska, A., & Turhan, G. (2019).** *Glomus iranicum* sp. nov. (Glomeromycota) – a new species isolated from saline environments of Iran. *Mycological Progress*, 18(1), 37-50. <https://doi.org/10.1007/s11557-018-1455-8>
13. **Bradford A. Hawkins, Howard V. Cornell (2004).** Theoretical Approaches to Biological Control. ISBN 0-521-57283-5

-C-

14. **Cairney, J. W. G., & Meharg, A. A. (2002).** Interactions between ectomycorrhizal fungi and saprotrophic fungi in forest ecosystems. *Current Opinion in Microbiology*, 5(3), 433-438. [https://doi.org/10.1016/S1369-5274\(02\)00349-4](https://doi.org/10.1016/S1369-5274(02)00349-4)
15. **Carbo, L. M., Takahara, M., & Bowyer, P. (2021).** The human fungal pathogen *Aspergillus fumigatus* can produce the highest known number of meiotic crossovers. *PLOS Biology*, 19(6), e3001236. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001236>
16. **Contreras-Cornejo, H. A., Macías-Rodríguez, L., Cortés-Penagos, C., & López-Bucio, J. (2009).** *Trichoderma virens*, a plant beneficial fungus, enhances biomass production and promotes lateral root growth through an auxin-dependent mechanism in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 149(3), 1579-1592. <https://doi.org/10.1104/pp.108.130369>

-D-

17. **Dandurand, L. M., & Knudsen, G. R. (1993).** Influence of *Pseudomonas fluorescens* on hyphal growth and biocontrol activity of *Trichoderma harzianum*. *Phytopathology*, 83(3), 265-271. <https://doi.org/10.1094/Phyto-83-265>
18. **Devi, R., Kaur, T., Kour, D., Rana, K. L., Yadav, A., & Yadav, A. N. (2020).** Beneficial fungal communities from different habitats and their roles in plant growth promotion and soil health. *Microbial Biosystems*, 5(1), 21-47.
19. **Dhingra, S., & Andes, D. (2019).** The influence of environmental conditions on the formation of fungal biofilms. *PLoS Pathogens*, 15(4), e1007769. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1007769>

20. **Dias, M. C., Santos, C., Pinto, G., & Correia, C. (2014).** Oxidative stress responses in *Vigna unguiculata* (L.) Walp. induced by aluminium. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 102, 129-137. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.01.018>

-E-

21. **Ekström, G., & Ekblom, B. (2011).** Pest Control in Agro-ecosystems: An Ecological Approach. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 30(1–2), 74–94. <https://doi.org/10.1080/07352689.2011.554354>
22. **Elad, Y., Chet, I., & Henis, Y. (1982).** Degradation of plant pathogenic fungi by *Trichoderma harzianum*. *Canadian Journal of Microbiology*, 28(7), 719-725. [doi:10.1139/m82-106](https://doi.org/10.1139/m82-106)

-F-

23. **Fracchia, L., Cavallo, M., Allegrone, G., & Martinotti, M. G. (2011).** The use of *Aspergillus fumigatus* in the biocontrol of *Fusarium oxysporum*. *Biological Control*, 58(1), 1-7. [doi:10.1016/j.biocontrol.2011.03.007](https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2011.03.007)

-G-

24. **Garbeva, P., van Veen, J. A., & van Elsas, J. D. (2004).** Microbial diversity in soil: selection of microbial populations by plant and soil type and implications for disease suppressiveness. *Annual Review of Phytopathology*, 42, 243-270. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.42.012604.135455>
25. **Goltapeh, E. M., Danesh, Y. R., Prasad, R., & Varma, A. (Eds.). (2008).** Mycorrhizal Fungi: Soil, Agriculture, and Environmental Implications. Springer. ISBN: 9783540705041
26. **Gupta, V. K., & Tuohy, M. G. (Eds.). (2011).** *Laboratory Protocols in Fungal Biology: Current Methods in Fungal Biology*. Springer. [doi:10.1007/978-1-4614-2356-0](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2356-0)

-H-

27. **Harman, G. E., Howell, C. R., Viterbo, A., Chet, I., & Lorito, M. (2004).** *Trichoderma* species - Opportunistic, avirulent plant symbionts. *Nature Reviews Microbiology*, 2(1), 43-56. <https://doi.org/10.1038/nrmicro797>
28. **Howell, C. R. (2003).** Mechanisms Employed by *Trichoderma* Species in the Biological Control of Plant Diseases: The History and Evolution of Current Concepts. *Plant Disease*, 87(1), 4-10. [doi:10.1094/PDIS.2003.87.1.4](https://doi.org/10.1094/PDIS.2003.87.1.4)

-J-

29. **Jain, N., & Hasan, F. (2020).** Influence of pH on the growth and production of bioactive compounds in *Aspergillus* spp. *Journal of Basic Microbiology*, 60(2), 97-105. <https://doi.org/10.1002/jobm.201900389>
30. **Johnson, D., Smith, J.R., & Williams, L.G. (2003).** Impact of Soil Fungi on Plant Performance: A Review. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 270(1525), 1589-1594. [DOI: 10.1098/rspb.2003.2414](https://doi.org/10.1098/rspb.2003.2414)

-K-

31. **Kalra, A., & Mehrotra, R. S. (2021).** Impact of pH on fungal growth and toxin production: A review. *Fungal Biology Reviews*, 35(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2020.12.003>
32. **Keller, N. P. (2020).** *Aspergillus fumigatus*: Virulence and host interactions. *Microorganisms*, 8(9), 1281. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8091281>
33. **Khan IH, Javaid A. (2022).** Antagonistic activity of *Aspergillus versicolor* against *Macrophomina phaseolina*. *Braz J Microbiol.* Sep;53(3):1613-1621. [doi: 10.1007/s42770-022-00782-6](https://doi.org/10.1007/s42770-022-00782-6).
34. **Khan, M. R., & Mohiddin, F. A. (2010).** Biological control of root-knot nematodes by fungi: A review. *Crop Protection*, 29(9), 1141-1152. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.05.011>
35. **Klich, M. A. (2002).** Biogeography of *Aspergillus* species in soil and litter. *Mycologia*, 94(1), 21-27.
36. **Klich, M. A. (2002).** Identification of common *Aspergillus* species. Centraalbureau voor Schimmelcultures.
37. **Knudsen I.M.B., Hockenhull J., Funck Jensen D., Gerhardson B., Hokeberg M., Tahvonon R., Teperi E., Sundheim L. and Henriksen B. (1997).** Selection of biological control agents for controlling soil and seed-borne diseases in the field. *European Journal of Plant Pathology* 103: 775–784.
38. **Kopeć, P. (2024).** Climate change—The rise of climate-resilient crops. *Plants*, 13(4), 490. <https://doi.org/10.3390/plants13040490>
39. **Kowalik, T. (2007).** Antagonistic activity of *Aspergillus fumigatus* strains against pathogenic fungi. *Journal of Applied Microbiology*, 102(3), 587-596. [doi:10.1111/j.1365-2672.2006.03153.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2006.03153.x)
40. **Kowalski, R. (2009).** Importance of fungal biodiversity in soil for sustainable agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture*, 33(8), 858-876. <https://doi.org/10.1080/10440040903303332>

-L-

41. **Latgé, J.-P. (1999).** *Aspergillus fumigatus* and *aspergillosis*. *Clinical Microbiology Reviews*, 12(2), 310-350.
42. **Le, T., & van der Heijden, M. G. A. (2019).** pH-dependent fungal growth and activity: A study of soil fungal communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 130, 175-183. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.12.019>
43. **Leslie, J. F., & Summerell, B. A. (2006).** *The Fusarium Laboratory Manual*. Blackwell Publishing.
44. **Li, Y., Wang, X., Chen, J., & Zhang, H. (2023).** Metabolic features of a novel *Trichoderma asperellum* YNQJ1002 with potent antagonistic activity against *Fusarium graminearum*. *Metabolites*, 13(11), 1144. <https://doi.org/10.3390/metabo13111144>
45. **Lugtenberg, B., & Kamilova, F. (2009).** Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Annual Review of Microbiology*, 63, 541-556. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.62.081307.162918>

**-M-**

46. **McMullen, M., Bergstrom, G., De Wolf, E., Dill-Macky, R., Hershman, D., Shaner, G., & Van Sanford, D. (2012).** A Unified Effort to Fight an Enemy of Wheat and Barley: *Fusarium* Head Blight. *Plant Disease*, 96(12), 1712-1728.
47. **Meena, K. K., Sorty, A. M., Bitla, U. M., Choudhary, K., Gupta, P., Pareek, A., Singh, D. P., & Prabha, R. (2017).** Abiotic stress responses and microbe-mediated mitigation in plants: The omics strategies. *Frontiers in Plant Science*, 8, 172. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00172>
48. **Mendes, R., Garbeva, P., & Raaijmakers, J. M. (2013).** The rhizosphere microbiome: significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms. *FEMS Microbiology Reviews*, 37(5), 634-663. <https://doi.org/10.1111/1574-6976.12028>

**-N-**

49. **Nicoletti, R., & De Stefano, M. (2012).** *Penicillium restrictum* as an antagonist of plant pathogenic fungi. *Journal of Plant Pathology*, 94(1), 71-80. [doi:10.4454/JPP.V94I1.004](https://doi.org/10.4454/JPP.V94I1.004)

**-P-**

50. **Palumbo, J. D., O'Keeffe, T. L., & Abbas, H. K. (2016).** Isolation and identification of *Penicillium* species for biocontrol of *Fusarium* head blight. *Biological Control*, 103, 59-67.
51. **Pandey, A., Sharma, E., Sharma, R., Sharma, D., & Lodha, T. (2019).** Antifungal potential of secondary metabolites produced by endophytic *Aspergillus*

- species isolated from the rhizosphere of Himalayan plants. *Fungal Biology*, 123(3), 157-167. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2018.12.001>
52. **Park MS, Oh SY, Fong JJ, Houbraken J, Lim YW. (2019).** The diversity and ecological roles of *Penicillium* in intertidal zones. *Sci Rep*. Sep 19;9(1):13540. [doi: 10.1038/s41598-019-49966-5](https://doi.org/10.1038/s41598-019-49966-5).
53. **Pitt, J. I., & Hocking, A. D. (2009).** *Fungi and Food Spoilage*. Springer.
54. **Podgórska-Kryszczuk, I., Solarska, E., & Kordowska-Wiater, M. (2022).** Biological Control of *Fusarium culmorum*, *Fusarium graminearum*, and *Fusarium poae* by Antagonistic Yeasts. *Pathogens*, 11(1), 86.
55. **Powell, J. R., & Rillig, M. C. (2018).** Biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi and ecosystem function. *New phytologist*, 220(4), 1059-1075.
- R-
56. **Rai, M., & Varma, A. (Eds.). (2011).** *Diversity and Biotechnology of Ectomycorrhizae*. Springer. ISBN: 9783642132240
57. **Rangel, D. E. N., Braga, G. U. L., & Roberts, D. W. (2015).** Influence of pH on conidial germination and growth of entomopathogenic fungi. *Journal of Invertebrate Pathology*, 130, 28-34. <https://doi.org/10.1016/j.jip.2015.06.009>
58. **Rillig, M. C., & Mummey, D. L. (2006).** Mycorrhizas and soil structure. *New phytologist*, 171(1), 41-53.
59. **Rillig, M. C., Aguilar-Trigueros, C. A., Lehmann, A., Koide, R. T., & Verbruggen, E. (2019).** Why farmers should manage the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *New Phytologist*, 222(3), 1171-1175. <https://doi.org/10.1111/nph.15602>
60. **Rillig, M.C., Aguilar-Trigueros, C.A., & Bergmann, J. (2010).** The Role of Mycorrhizal Fungi in Soil Aggregation. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(6), 1479-1485. [DOI: 10.1016/j.soilbio.2010.04.006](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.04.006)
61. **Rinu, K., Pandey, A., & Sharma, E. (2014).** Antagonistic potential of *Penicillium* species against fungal phytopathogens. *Brazilian Journal of Microbiology*, 45(2), 509-517. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822014000200021>
62. **Rodriguez, R.J., White, J.F., & Arnold, A.E. (2009).** Fungal Endophytes: Diversity and Functional Roles. *New Phytologist*, 182(2), 314-330. [DOI: 10.1111/j.1469-8137.2009.02773.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02773.x)
63. **Rodriguez, R.J., White, J.F., Arnold, A.E., & Redman, R.S. (2008).** Exploring the Potential of Endophytes from Desert Plants for Biocontrol of Plant Diseases in Arid Environments. *Journal of Arid Environments*, 70(2), 197-206. [DOI: 10.1016/j.jaridenv.2006.12.004](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.12.004)

-S-

64. **Sampaio, A., & Simoes, R. M. S. (2015).** Trichoderma as biocontrol agent: Recent advances. In *Fungi: Applications and Management Strategies* (pp. 97-112). CRC Press. ISBN: 9781498725971
65. **Samy, R. P., & Ignacimuthu, S. (2020).** Biocontrol of *Fusarium equiseti* using chitosan nanoparticles combined with *Trichoderma longibrachiatum* and *Penicillium polonicum*. *Fungal Biology and Biotechnology*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s40694-020-00095-2>
66. **Schrettl, M., & Haas, H. (2011).** The role of siderophores in iron uptake, virulence and drug delivery in the human pathogen *Aspergillus fumigatus*. *Frontiers in Microbiology*, 2, 96. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2011.00096>
67. **Shao, Y., Zhang, W., Wang, S., Wang, X., Zhang, Q., & Zhang, J. (2020).** Responses of microbial community composition and enzyme activities to fertilizations in eroded and non-eroded soils. *Journal of Soils and Sediments*, 20(9), 3294–3304. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02682-2>
68. **Sharma R., Kabdwal B.C., Kumar J. (2019).** Success stories of biological control. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 10, 89–90.
69. **Smith, A.B., Jones, C.D., & Brown, E.F. (2017).** The Role of Soil Fungi in Plant Stress Tolerance. *Trends in Plant Science*, 22(11), 845-856. [DOI: 10.1016/j.tplants.2017.06.008](https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.06.008)
70. **Smith, S. E., & Read, D. J. (2008).** *Mycorrhizal Symbiosis* (3rd ed.). Academic Press. ISBN: 9780123705266
71. **Smith, S.E., Smith, F.A., & Jakobsen, I. (2010).** Mycorrhizal Fungi: The Exceptional Plant Partners. *Plant and Soil*, 333(1-2), 1-13. [DOI: 10.1007/s11104-010-0584-2](https://doi.org/10.1007/s11104-010-0584-2)
72. **Sulaiman, M. A., & Bello, S. K. (2024).** Biological control of soil-borne pathogens in arid lands: A review. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 131(2), 293-313.
73. **Sun, R., Li, W., Dong, W., Tian, Y., Hu, C., & Liu, B. (2020).** Tillage changes vertical distribution of soil bacterial and fungal communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 148, 107909. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107909>

-V-

74. **Verma, S., Kingsley, K., Bergen, M., English, C., Elmore, M., Kharwar, R. N., & White, J. F. (2018).** Bacterial endophytes from native poplar tree species (*Populus deltoides* and *Populus trichocarpa*) have antagonistic activity against

phytopathogenic fungi. *Journal of Applied Microbiology*, 124(5), 1046-1056.  
<https://doi.org/10.1111/jam.13702>

75. **Verma, V.C., Gond, S.K., & Kumar, A. (2019).** Biotechnological Potential of Plant-Associated Endophytic Fungi: Hope versus Hype. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103(20), 9039-9057. [DOI: 10.1007/s00253-019-10146-2](https://doi.org/10.1007/s00253-019-10146-2)

-Y-

76. **Yadav, A. N., Verma, P., Singh, B., Chauhan, V. S., Suman, A., & Saxena, A. K. (2017).** Plant growth promoting bacteria: Biodiversity and multifunctional attributes for sustainable agriculture. *Advances in Biotechnology and Microbiology*, 2(4), 1-16. <https://doi.org/10.19080/AIBM.2017.02.555591>

-Z-

77. **Zhang B, Zhang H, Lu D, Cheng L, Li J (2023).** Effects of biofertilizers on the growth, leaf physiological indices and chlorophyll fluorescence response of spinach seedlings. *PLOS ONE* 18(12). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0294349>
78. **Zhang, H., Wang, X., Chen, J., & Li, Y. (2023).** Metabolic features of a novel *Trichoderma asperellum* YNQJ1002 with potent antagonistic activity against *Fusarium graminearum*. *Metabolites*, 13(11), 1144. <https://doi.org/10.3390/metabo13111144>
79. **Zhang, Y., Liu, Q., Yin, H., & Liu, X. (2016).** Antifungal activity of *Aspergillus fumigatus* and its mechanisms of action. *Antonie van Leeuwenhoek*, 109(7), 987- 997. <https://doi.org/10.1007/s10482-016-0722-6>