

UNIVERSITÉ MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI
BORDJ (BOU ARREKIDJ)

UNIVERSITY MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI
BORDJ (BOU ARREKIDJ)

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريريج

Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi B.B.A.

كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الارض والكون

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers

قسم العلوم الفلاحية

Département des Sciences Agronomiques



UNIVERSITÉ MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI
BORDJ (BOU ARREKIDJ)

UNIVERSITY MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI
BORDJ (BOU ARREKIDJ)

Mémoire

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Protection des végétaux

Thème

Étude de l'effet antagoniste des *Trichoderma* spp contre les
pathogènes de blé dur (*Triticum durum* Desf.)..

Présenté par : KECHIDA Ghazala et BOUZIANE Amina

Devant le jury :

Président : M . TIAIBAMCB (Université de BBA)

Encadrant : D. MOUTASSEM MCA (Université de BBA)

Co_Encadrant : A . SAIDI..... (Université de BBA)

Examineur : M . SAIFIMCA (Université de BBA)

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

Avant tout nous remercions Allah le tout puissant de nous avoir accordé la foi, le courage, la santé et les moyens de conception de ce modeste travail.

Nous remercions toute l'équipe pédagogique de l'université de Mohamed El Bachir El Ibrahimi - BBA

Nous remercions l'ingénieure de laboratoire, Mme Saidi Amal, pour ses conseils et son accompagnement tout au long de nos travaux

Nos remerciements les plus respectueux aux membres du jury pour avoir accepté de juger ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadrant, le Professeur Moatassem Dahou, pour avoir proposé ce sujet pertinent et pour son encadrement tout au long de la réalisation de ce travail de recherche. Nous apprécions grandement ses conseils précieux, son dévouement, sa patience, ainsi que sa disponibilité constante pour répondre à nos questions. Nous le remercions également pour le partage de ses connaissances et de son expertise dans ce domaine. Il nous a accordé sa confiance et nous a offert une grande autonomie, ce qui a grandement enrichi notre expérience de recherche.

Nous remercions tous les enseignantes de notre promotion

Enfin nous remercions nos familles surtout nos parents.

Merci

Dédicace

**À mes chers parents, Que Dieu leur accorde longue vie et les récompense pour tout leur amour.
Votre soutien et vos prières ont été la lumière qui a éclairé mon chemin**

**À l'âme pure de ma tante bien-aimée, Dalila Bouziane, Que Dieu t'accorde Sa miséricorde et
m'accorde la joie de te retrouver au Paradis. Ton souvenir vit à jamais dans mon cœur. Ton
absence n'a jamais éteint ta présence dans mes prières.**

**À mes frères bien-aimés : Mohamed, Bilal, Zakaria et Ibrahim, Vous avez toujours été mon pilier
et ma force. Que Dieu vous garde.**

**À ma famille et à mes amies fidèles, Vous qui m'avez accompagnée avec affection et loyauté tout au
long de ce parcours, Recevez toute ma reconnaissance et ma profonde gratitude. Votre place dans
mon cœur est inoubliable**

À tous nos collègues de la promotion Protection des végétaux.

**Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce travail soit possible, je vous dis
merci.**

Amina

Dédicace

À mon père et à ma mère, Le battement de mon cœur et la lumière de mon chemin, Je vous adresse toute ma gratitude, car sans vos prières et votre tendresse, je ne serais pas arrivée jusqu'ici.

À l'âme de mon cher grand-père, Que Dieu te fasse miséricorde et t'accorde une place dans Son vaste Paradis. Ton souvenir est gravé dans mon cœur, et ton amour ne s'effacera jamais.

À mes chers frères et sœurs : Imane, Manel, Inès et mon frère Amine, Vous avez toujours été mon soutien et ma compagnie fidèle. Recevez tout mon amour et ma profonde reconnaissance.

A tous mes enseignants toute au long de mes études.

A tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Ghazalla

Résumé

L'objectif principal de cette étude est de tester l'efficacité des antagonistes biologiques (*Trichoderma* spp) contre la fusariose de l'épi de blé dur (*Triticum durum* L.) causée par *F. graminearum* *in vitro* et *in vivo*. Les essais *in vitro* ont illustré une activité antagoniste des espèces de *Trichoderma* sur la croissance mycélienne du *F. graminearum* variable entre 10 et 71.08%, en contact direct et entre 61.42 et 71.08%, en contact indirects. Le test antagoniste par filtrat de culture du *Trichoderma* montre une zone d'efficacité variable pour les trois concentrations testées ; elle est variable entre 80.2 et 58.14% après 72h d'exposition. Contrairement à l'espèce *Trichoderma* sp4 qui a enregistré la valeur d'efficacité la plus faible avec environ 27.13%. Néanmoins, le traitement *in vivo* par les souches de *Trichoderma* spp a réduit significativement la gravité de la maladie, avec des taux variables entre 95.12% et 100%. Les traitements combinés ont significativement augmenté l'effet protecteur des plantes de blé dur contre le *F. graminearum*.

Mots-clés : *Fusarium graminearum*, *Trichoderma* spp, Traitements biologique, blé dur *Triticum durum* L.

Abstract

The main objective of this study is to test the efficacy of biological antagonists (*Trichoderma* spp.) against Fusarium head blight (FHB) in durum wheat (*Triticum durum* L.) caused by *F. graminearum*, both in vitro and in vivo. In vitro tests demonstrated variable antagonistic activity of *Trichoderma* species on the mycelial growth of *F. graminearum*, ranging from 10% to 71.08% in direct contact and from 61.42% to 71.08% in indirect contact. The antagonist test using *Trichoderma* culture filtrate showed that *Trichoderma* species 3 exhibited a variable zone of efficacy for the 3 concentrations tested, achieving 80.2% and 58.14% inhibition after 72 hours of exposure. In contrast, *Trichoderma* sp. 4 recorded the lowest efficacy value at approximately 27.13%. Nevertheless, in vivo treatment with *Trichoderma* spp. strains significantly reduced disease severity, with rates varying between 95.12% and 100%. *Trichoderma* spp treatments significantly increased the protective effect on durum wheat plants against *F. graminearum*.

Keywords: *Fusarium graminearum*, *Trichoderma* spp., Biological control, Durum wheat.

الملخص:

الهدف الرئيسي لهذه الدراسة هو اختبار فعالية المضادات الحيوية البيولوجية (*Trichoderma spp*) ضد مرض لفحة السنابل الفيوزاريومية في القمح الصلب (*Triticum durum L.*) التي يسببها فطر *F. graminearum* في المختبر وفي الحقل. أظهرت الاختبارات في المختبر نشاطاً مضاداً لأنواع *Trichoderma* على نمو الفطريات المسببة للمرض *F. graminearum* بنسب متفاوتة تتراوح بين 10% و 71.08% في الاتصال المباشر، وبين 61.42% و 71.08% في الاتصال غير المباشر. أظهر اختبار المضادات باستخدام مرشح مزرعة *Trichoderma* أن النوع 3 *Trichoderma* أظهر منطقة فعالية متغيرة للتركيزات الثلاثة المختبرة؛ حيث بلغت نسبة التثبيط 80.2% و 58.14% بعد 72 ساعة من التعرض، على التوالي. على النقيض من ذلك، سجل النوع 4 *Trichoderma sp4* أقل قيمة فعالية بحوالي 27.13%. ومع ذلك، أدى العلاج في الحقل بسلاطات *Trichoderma spp* إلى تقليل شدة المرض بشكل كبير، بمعدلات تتراوح بين 95.12% و 100%. أدت المعالجات إلى زيادة التأثير الوقائي لنباتات القمح الصلب ضد *F. graminearum* بشكل كبير.

الكلمات المفتاحية: *Fusarium graminearum* ، *Trichoderma spp*، المكافحة البيولوجية، القمح الصلب.

TABLE DES MATIERES

Remerciement

Dédicaces

Liste des abréviations

Liste des figures

1. Introduction 1

CHAPITRE I. MATERIEL ET METHODES

1. Matériels biologiques	3
1.1. Matériels végétale	3
1.2. Matériel fongique	3
1.2.1. L'agent pathogène	3
1.2.2. L'agent antagoniste	4
1.2.3. Description scientifique de Trichoderma	4
2. Méthodes du travail	
2.1. Evaluation de l'effet de Trichoderma sp contre le Foc in vitro	5
2.1.1. Test de confrontation directe (Technique de double culture	5
2.1.2. Test de confrontation indirecte	5
2.1.3. Effet des métabolites secondaires de Trichoderma spp. sur la croissance mycélienne du F. graminearum	5
2.1.3.1. Fermentation et extraction	5
2.1.3.2. Activité antifongique des métabolites secondaires	6
2.2. Evaluation de l'effet de Trichoderma in vivo	6
2.2.1. Préparation de l'inoculum du F. graminearum	8
2.2.2. Préparation de l'inoculum de Trichoderma sp et traitement des semences	8
2.3. Évaluation de Trichoderma spp. contre le F. graminearum en conditions réelles	8
2.4. Exploitation des résultats et analyses statistiques	9
2.4.1. Mesure de l'Incidence	9
2.4.2. Mesure de la sévérité d'attaque	10

2.4.3. Calcul de l'indice de Flétrissement (DII	10
2.5. Analyse statistique	12

CHAPITRE II. RESULTATS ET DISCUSSION.

1. Résultats	12
1.2. Résultats des tests directs	13
1.3.2. Résultats des confrontations indirects	14
1.3.4. Effet des Filtrats de culture sur la croissance mycélienne du <i>F. graminearum</i>	14
1.4. Effet des espèces fongiques in vivo	16
2. Discussion	17
Conclusion	18
Références bibliographiques	20

LISTE DES ABREVIATION

°C : degrés celsius

μL : microlitre

ANOVA : annalyse of variance

AUDPC : area under the curve progressing of the desease

Cm : centimètre

DI : incidence

DII : l'index de l'intensité de la maladie

g : gramme

I : indice d'hinibition

ISM : l'indice de sévérité moyenne

ITGC : institut technique des grandes cultures

Kg : kilogramme

MGI

mL : Millilitre

ml : millilitre

Mm : millimètre

PDA : potato dextrose agar

PDB : potato dextrose broth

Ppm : partie par million

SAS : Statistical Analysis System

GLM : General Liner Model.

LISTES DES FIGURES

- Figure 1. Modalités des tests antagonistes ; A- test direct B- test indirect..... 4**
- Figure 2. L'effet inhibiteur de différents espèces antagonistes Trichoderma sp sur F. graminearum en contact direct..... 06**
- Figure 3. Effet inhibiteur des espèces de Trichoderma sp sur F. graminearum en contact direct. Les valeurs représentent la moyenne de quatre répétitions \pm l'erreur standard. Les lettres a, b et...représentent le niveau de signification au seuil de 5%..... 13**
- Figure 04. Observations microscopiques de la zone de confrontation entre Trichoderma et F. graminearum. a) enroulement de mycélium de Trichoderma sur le F. graminearum, b) vacuolisation et c) lyse des hyphes de F. graminearum. 15**
- Figure 05. L'effet inhibiteur de différents espèces antagonistes Trichoderma sp sur F. graminearum en contact direct. 15**
- Figure 06. Effet inhibiteur des espèces de Trichoderma sp sur F. graminearum en contact direct. Les valeurs représentent la moyenne de quatre répétitions \pm l'erreur standard. Les lettres a, b et...représentent le niveau de signification au seuil de 5%..... 16**
- Figure 07. Effet inhibiteur des filtrats de culture de Trichoderma sp sur le Foc. Les valeurs représentent la moyenne de quatre répétitions \pm l'erreur standard. Les lettres a, b et...représentent le niveau de signification au seuil de 5%. 16**
- Figure 08. Effet des espèces de Trichoderma sur la sévérité de la fusariose de l'épi causé par F. graminearum dans les conditions in vivo. □ 18**
- Figure 09. Effet des espèces de Trichoderma sur la sévérité de la fusariose causé par le F. graminearum dans les conditions in vivo. Les valeurs représentent la moyenne de quatre répétitions \pm l'erreur standard. Les lettres a, b et...représentent le niveau de signification au seuil de 5%..... 19**

Introduction

Introduction

Les céréales cultivées depuis des milliers d'années, constituent la base de l'alimentation humaine et animale. Les céréales constituent environ 30% des sources énergétiques alimentaires dans les pays développés, contre plus de 50% dans les pays en voie de développement, atteignant parfois 90 % dans certains pays d'Afrique. Le blé dur (*Triticum Durum*) est une culture de base qui joue un rôle essentiel dans la sécurité alimentaire mondiale, fournissant environ 20 % de l'apport calorique et des protéines de milliards de personnes dans le monde (Erenstein et al., 2022). Le blé, l'une des céréales les plus cultivées, est cultivé sur plus de 215 millions d'hectares à l'échelle mondiale (FAO, 2023). Cependant, la production de blé est constamment Le blé est sujet à de nombreuses contraintes abiotiques (Quaratiello et al., 2024) et biotiques (Campos-Medina et al., 2019 ; Gongora-Canul et al., 2020).

Le blé peut être attaqué par de nombreuses maladies à différents stades de son développement. Ces attaques peuvent occasionner des pertes importantes lorsque les variétés sont sensibles et les conditions de l'environnement sont favorables à l'expansion des maladies (Ezzahiri, 2001).

La fusariose de l'épi (FHB) est causée par une vingtaine d'espèces de *Fusarium* appartenant au complexe d'espèces *Fusarium*, bien que l'espèce *Fusarium graminearum* étant décrite comme particulièrement la plus destructeur (Legrand et al., 2017, Cesarini et al., 2025, Pedrero-M'endez et al., 2025).

La fusariose de l'épi est une préoccupation majeure pour la production de blé dans le monde entier en raison de son impact sur le rendement et la qualité des grains (Cesarini et al., 2025, Pedrero-M'endez et al., 2025). De plus, ce pathogène entraîne la production des mycotoxines telles que le déoxynivalénol (DON), le nivalénol (NIV) et la zéaralénone (ZEA ; Legrand et al., 2017 ; Alisaac et Mahlein, 2023, Cesarini et al., 2025). Ces mycotoxines présentent des risques sanitaires importants pour les animaux et les humains, notamment une immunosuppression, des déséquilibres hormonaux et des cancers (McMullen et al., 2012). Ainsi, les pertes économiques attribuées par la fusariose de l'épi peuvent être considérables, englobant des baisses de rendement directes, une augmentation des coûts de gestion et des restrictions commerciales dues à la contamination par les mycotoxines (McMullen et al., 2012).

Les stratégies actuelles de lutte contre la fusariose de l'épi comprennent principalement les cultivars résistants, des pratiques culturales (rotation des cultures, travail du sol, gestion des résidus de culture, etc.) et l'application de fongicides chimiques. Malgré ces efforts, une lutte efficace contre la fusariose de l'épi demeure difficile en raison de l'absence de cultivars totalement résistants (Bai et al., 2018, Cesarini et al., 2025,

Introduction

Pedrero-Méndez et al., 2025), du cycle biologique complexe de l'agent pathogène (survie hivernale, dispersion prolongée des spores et production de mycotoxines, etc. ; Walter et al., 2010), des facteurs environnementaux influençant les épidémies (Xu, 2003) et du développement potentiel d'une résistance aux fongicides (Dweba et al., 2017).

Dans ce contexte, le développement de nouvelles approches durables pour lutter contre la fusariose de l'épi est nécessaire afin de garantir la sécurité alimentaire et la salubrité des aliments à l'échelle mondiale (Savary et al., 2012 ; Fahad, 2021, Cesarini et al., 2025, Pedrero-Méndez et al., 2025). Les agents de lutte biologique (ALB) sont reconnus comme une stratégie efficace pour lutter contre *Fusarium* spp. dans les céréales (Collinge et al., 2022 ; Risoli et al., 2024, Cesarini et al., 2025, Pedrero-Méndez et al., 2025). La littérature regorge d'exemples de champignons filamenteux (p. ex., *Clonostachys* spp. et *Trichoderma* spp.), de levures (p. ex., *Saccharomyces cerevisiae* et *Cryptococcus* spp.) et de bactéries (p. ex., *Bacillus* spp. et *Streptomyces* spp.) pouvant être utilisés comme ALB contre la fusariose de l'épi (Sarrocco et Vannacci, 2018, Pedrero-Méndez et al., 2025).

Les agents de lutte biologiques appartenant au genre *Trichoderma* sp sont actuellement considérés très efficaces contre les maladies causées par les phytopathogènes (Chet 1990 ; Herrera-Estrella et Chet 2003, Pedrero-Méndez et al., 2025). Ces espèces sont capables de persister dans le sol et de coloniser les racines des plantes (Vinale et al., 2008). Depuis plusieurs décennies, le genre *Trichoderma* sp a suscité l'intérêt des chercheurs et des industries. Approximativement 60 % des biofongicides homologués à base de champignons filamenteux ont été développés à partir de souches de *Trichoderma* sp (Verma et al., 2007).

La présente étude vise donc à accroître les effets de la lutte biologique par la mise en évidence de quelques espèces de *Trichoderma* sp indigènes et leur pouvoir fongicide contre *Fusarium graminearum* agent causal de la fusariose de l'épi.

: Problématique

La fusariose du blé dur causée par *Fusarium graminearum* engendre d'importants dégâts agricoles. Les limites des traitements chimiques poussent à on utiliser *Trichoderma* spp. -s alternatives biologiques. Ainsi, peutchercher de ? comme agent de lutte efficace contre ce pathogène

: Hypothèses

Trichoderma spp. possède un effet antagoniste significatif contre *Fusarium .graminearum*

Introduction

.sont plus efficaces que d'autres Certaines espèces de Trichoderma

.L'usage de Trichoderma pourrait réduire la dépendance aux fongicides chimiques

CHAPITRE I

MATERIEL ET

METHODES

1. Matériels biologiques

1.1. Matériels végétales

Le matériel végétal utilisé dans cette étude est constituée une variété de blé dure (*Triticum durum* L.), Cette variété nous ont été fournis par la coopérative des céréales et légumes secs (CCLS) de Bordj Bou Arreridj, où elles sont multipliées chaque saison.

1.2. Matériel fongique

1.2.1. L'agent pathogène

L'isolat de *F. graminearum* utilisé dans cette étude a été obtenu à partir des plants de blé présentant des symptômes de la fusariose de l'épi, originaire de la région de Bordj Bou Arreridj.

1.2.2. L'agent antagoniste

Quatre agents biologiques de *Trichoderma sp* ont été utilisés pour réaliser cette étude. Les agents de lutte biologique ont été isolés de la rhizosphère de céréales provenant de la région de Mascara. Les souches font partie d'une collection de 12 souches de *Trichoderma* ont été maintenu sur un milieu PDA par des repiquages réguliers.

1.2.3. : Description scientifique de *Trichoderma*

filamenteux saprophytes, Le genre *Trichoderma* regroupe des champignons .(largement répandus dans les sols et les rhizosphères des plantes (Benítez et al., 2004

Il est largement reconnu pour son pouvoir antagoniste contre de nombreux : champignons phytopathogènes, notamment grâce à plusieurs mécanismes
Compétition pour les nutriments et les sites de colonisation, ce qui empêche l'installation
.(des pathogènes dans la zone racinaire(Benítez et al., 2004

Mycoparasitisme, par la production d'enzymes hydrolytiques comme les ses, capables de dégrader la paroi cellulaire des chitinases, glucanases et protéas
.(champignons pathogènes(Harman et al., 2004 ; Benítez et al., 2004

Production de métabolites antifongiques secondaires (tels que gliotoxine, viridine, gents pathogènes(Vinale et al., 2008 ; peptaïbols) ayant un effet inhibiteur direct sur les a
.(Lorito et al., 2010

Stimulation des défenses naturelles des plantes (résistance systémique induite, ou ISR), ce qui renforce leur capacité à se défendre contre les infections futures.(Harman et
.(al., 2008 al., 2004 ; Vinale et

En plus de ses propriétés antifongiques, *Trichoderma* contribue à la croissance des plantes en améliorant l'absorption des nutriments, en sécrétant des hormones de

arman et croissance (auxines, cytokinines) et en stimulant le développement racinaire.(H .(al., 2004 ; Vinale et al., 2008

2. Méthodes du travail

2.1. Evaluation de l'effet de *Trichoderma sp* contre le Foc *in vitro*

2.1.1. Test de confrontation directe (Technique de double culture)

Les isolats de *Trichoderma spp* ont été estimés pour leur pouvoir antagoniste vis-à-vis le *F. graminearum* agent pathogène de blé dur. Le test a été accompli par la méthode de double culture décrite par **Morton et Stroube, (1955)**. Cette méthode consiste à mettre dans une boîte de Pétri de 9 cm de diamètre contenant le milieu PDA (annexe 1); deux pastilles comptant cinq millimètre de diamètre, l'une portant l'espèce antagoniste *Trichoderma* et l'autre *F. graminearum*. Les deux pastilles sont installées selon un axe diamétral à 4 cm et à équidistance au centre de la boîte. Le témoin est représenté par une plantation du *F. graminearum* seul dans la boîte de pétri qui contient un milieu de culture PDA. Bien que, l'incubation a été effectuée à $28\pm 3^{\circ}\text{C}$ pendant six jours. Quatre répétitions indépendantes ont été réalisées pour chaque souche de *Trichoderma*.

Des notations relatif à l'inhibition de la croissance mycélienne diamétrale des colonies du *F. graminearu* et leur envahissement par le mycélium du *Trichoderma sp* sont effectuées chaque jour jusqu'aux le sixième jour. Le pourcentage d'inhibition de la croissance mycélienne est estimé comme étant la méthode décrite par :

$$\text{ZI}(\%) = (1 - (C_n/C_0)) \times 100 \text{ où :}$$

C_n diamètre de la colonie de pathogène dans la présence de pathogène, C_0 : diamètre de la colonie de control.

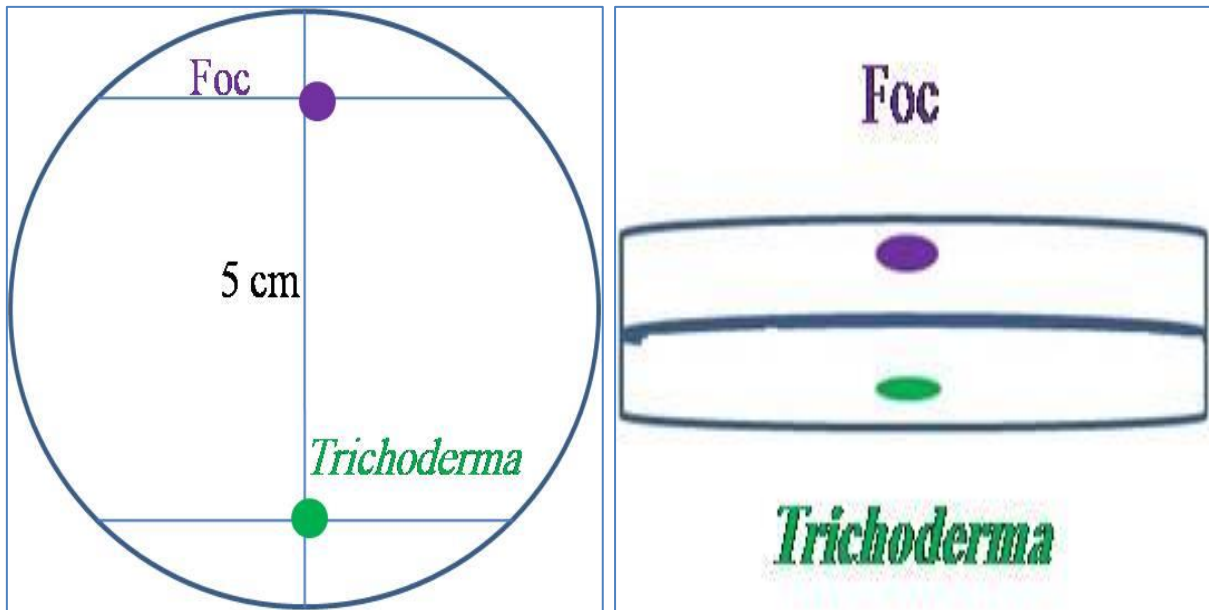


Figure 1. Modalités des tests antagonistes ; A- test direct B- test indirect.

2.1.2. Test de confrontation indirecte

In vitro, les quatre espèces de *Trichoderma sp* ont été estimées pour leur activité antagoniste par la méthode de confrontation indirecte, qui inhibe la croissance des phytopathogènes en produisant des substances volatiles suivant la méthode décrite par **Dennis et Webster (1971)**. Cette technique comprend un repiquage de l'espèce pathogène *F. graminearum* et les espèces antagonistes dans deux boîtes de pétri (mesurant 9 cm de diamètre) séparées. Un assemblage est réalisé par superposition des deux boîtes par la suite, à savoir *F. graminearum* en haut et l'espèce de *Trichoderma* en bas (Figure 01). Le rattachement entre les deux boîtes portant les deux protagonistes est exécuté par le Parafilm afin d'éviter toute évaporation des substances volatiles produites de l'antagoniste. Le témoin est représenté par superposition de deux boîtes, celle du haut contenant une pastille de *F. graminearum* alors que celle du bas ne contient que le milieu PDA. Bien que, l'incubation a été effectuée à $28\pm 3^{\circ}\text{C}$ pendant six jours.

Quatre répétitions indépendantes ont été réalisées pour chaque souche de *Trichoderma*. Des notations relatif à l'inhibition de la croissance mycélienne diamétrale des colonies du *F. graminearum* sont effectuées chaque jour jusqu'aux le sixième jour. Le pourcentage d'inhibition de la croissance mycélienne est estimé comme étant la méthode décrite précédemment.

2.1.3. Effet des métabolites secondaires de *Trichoderma* spp. sur la croissance mycélienne du *F. graminearum*

2.1.3.1. Fermentation et extraction

L'activité inhibitrice des filtrats de culture de quatre souches de *Trichoderma* spp. a été estimée contre *F. graminearum* selon la technique de **Dubey et al. (2007)**. Pour réaliser ce test, 20 explants mycéliens de 5 mm de diamètre ont été prélevés à partir des cultures de *Trichoderma* âgées de 7 jours et déposés dans des erlenmeyer de 2000 ml contenant 500 ml de milieu de culture PDB stérile (Annexe 2). Ces derniers ont été incubés à $28\pm 3^{\circ}\text{C}$ pendant 21 jours sous agitation. Le filtrat a été d'abord filtré à travers un papier filtre wattman N1 pour éliminer le mycélium et une seconde filtration avec des membranes Millipore de $0,20\ \mu\text{m}$ de diamètre pour éliminer les spores. Les métabolites récupérés ont été conservés à 4°C .

2.1.3.2. Activité antifongique des métabolites secondaires

Pour étudier l'effet inhibiteur des métabolites secondaires de culture de *Trichoderma* spp. sur la croissance mycélienne du *F. graminearum*, la technique de puits a été utilisée. Une suspension sporale avec une concentration de 10^6 spores/ml de *F. graminearum* a été préparée. La suspension fongique a étéensemencée uniformément avec des écouvillons stériles sur un milieu de culture PDA. En utilisant un emporte-pièce stérile, des puits de 5mm de diamètre ont été formés dans le milieu PDAensemencé par la suspension sporale. Ces derniers ont remplis par $20\ \mu\text{l}$ des extraits bruts ou des molécules pures des métabolites secondaires avec les concentrations de 5, 10 et 15 mg.

Les témoins sont représentés par des puits remplis par de l'eau distillée stérile (Nighat et al., 2016). Les boîtes ont été incubées à $28\pm 3^{\circ}\text{C}$ pendant sept jours, et 30°C pendant 72 heures pour les champignons. Les diamètres des zones d'inhibition formées autour des puits sont mesurés (Ananda et al., 2012). Quatre répétitions indépendantes ont été réalisées pour chaque souche de *Trichoderma* et pour chaque concentration. Le diamètre de la colonie du pathogène est mesuré après une période d'incubation de 6 jours à 25°C et le pourcentage d'inhibition de la croissance mycélienne est estimé comme étant la méthode décrite précédemment.

2.2. Evaluation de l'effet de *Trichoderma* *in vivo*

2.2.1. Préparation de l'inoculum du *F. graminearum*

Selon la technique de **Merkuz et al, (2012)** dans des sacs de 3kg en plastiques contenant du sable tamisé et ajouté à la farine de maïs humidifié par l'eau distillée, selon la

proportion de 9/1/2 respectivement. Le mélange est stérilisé trois fois à l'autoclave pendant 15 min à 105°C, puisensemencé par 20 explants de 5mm de diamètre prélevé à partir d'une culture de *F. graminearum* âgées de 7 jours, l'incubation est réalisée pendant 21 jours. Une agitation des sacs tous les jours est effectuée afin de permettre une colonisation homogène du milieu par le pathogène. L'inoculum ainsi obtenu est incorporé dans des pots contenant le substrat de culture stérilisé à raison de 100g d'inoculum pour 1kg de substrat, ce dernier est composé d'un mélange de sable, terre et terreau selon les proportions respectivement de 1/1/1. Le semis est réalisé 15 jours après l'incorporation de l'inoculum au substrat, afin de permettre une meilleure colonisation par le champignon.

2.2.2. Préparation de l'inoculum de *Trichoderma sp* et traitement des semences

Les isolats de *Trichoderma sp* ont été cultivés dans des erlenmeyers contenant chacune 200 ml de bouillon de pommes de terre dextrose (PDB) pendant une semaine à 25°C et bien mélangé avec le milieu en utilisant un agitateur magnétique. Après filtration, la suspension sporale a été ajustée à 5×10^8 spores / ml (Calvet et al., 1990).

L'enrobage des semences par les deux espèces de *Trichoderma* a été effectué selon la méthode proposée par Akladiou et al, (2012). Les semences du blé dur ont été désinfectées en surface par immersion dans une solution d'hypochlorite de sodium (5%) trois fois successives pendant 3 min, lavées trois fois avec de l'eau distillée stérile et séchées entre deux papiers filtres stériles.

Les graines de la variété testée ont été immergées dans 5 ml de la suspension sporale de *Trichoderma* pendant 30 min.

2.7. Évaluation de *Trichoderma spp.* contre le *F. graminearum* en conditions réelles

Des expériences en plein champ ont été menées pendant la saison 2024-2025 à la Station de recherche de la Faculté SNV. L'expérience a été réalisée selon un dispositif en blocs complets randomisés (RBD) avec trois répétitions de six traitements.

- Des blocs traités avec quatre espèces fongiques de *Trichoderma*.
- Des blocs traités avec un produit chimique.
- Des blocs non traités.

Les parcelles mesuraient 1 m de largeur (cinq rangs espacés de 60 cm) sur 1 m de longueur, avec un espacement entre les plantes de 5 cm. Le cultivar de blé dur (cv. Surya), une variété sensible au *F. graminearum*, a été utilisé pour l'expérience. Les souches de *Trichoderma spp.* BThr29, BTas25 et BTer43, dans leurs espèces respectives, se sont révélées

inhiber au maximum *F. graminearum* en conditions de laboratoire et ont été choisies pour l'évaluation en plein champ.

Des formulations à base de talc de *Trichoderma* spp. (*Trichoderma* sp1, *Trichoderma* sp2 et *Trichoderma* sp3 et *Trichoderma* sp4) ont été préparées à une concentration de 5×10^8 spore/ml par gramme et utilisées directement pour le traitement des semences (10 g/kg de semences). Les observations concernant l'incidence et la gravité du *F. graminearum* ont été réalisées sur 20 plants inoculés des rangs intermédiaires de chaque parcelle.

2.4. Exploitation des résultats et analyses statistiques

2.4.1. Mesure de l'Incidence

L'incidence est le pourcentage de plantes malades. Il nous donne une idée sur l'état de la population de pois chiche vis-à-vis de l'agent pathogène.

L'incidence est le moyen le plus rapide pour la mesure de la maladie ; il nécessite seulement le comptage du nombre d'unités malades qui peut être exprimé par un pourcentage du nombre total d'unités. L'incidence (*DI*) est évaluée selon la formule :

$$DI = \frac{NPM}{NTP} \times 100$$

2.4.2. Mesure de la sévérité d'attaque

La sévérité ou la gravité de la maladie est obtenue selon l'évaluation visuelle de la proportion des tissus de la plante atteinte par le flétrissement ou le jaunissement.

La sévérité (*S*) ou l'indice de sévérité moyenne (*ISM*) est calculée selon la formule :

$$S \text{ ou } (ISM) = \frac{\sum ni \times nj}{\sum nj}$$

Où

n_j : est le nombre de plantes caractérisées par l'indice

i_j : est l'indice de sévérité attribué aux plantes malades.

L'échelle de notation utilisée par **Trapero-Casas, (1983)** a été appliquée le long de nos expérimentations.

Cette échelle consiste à donner une note à la plante malade examinée en fonction de l'importance des symptômes observés :

0: pas de symptômes.

1 : jaunissement ou flétrissement du 1/3 de la plante.

2: mêmes symptômes mais affectant les 2/3 de la plante.

3: symptômes identiques affectant la plante entière.

4: plante morte.

2.4.3. Calcul de l'indice de Flétrissement (*DII*)

L'incidence *I* et la sévérité *S* sont utilisés pour le calcul, l'index de l'intensité de la maladie *DII*

Où :

$$DII = \frac{DI * ISM}{4}$$

2.5. Analyse statistique

Les expériences ont été analysées en utilisant une analyse standard de la variance (ANOVA) effectuée par le logiciel STATITICA 8. Pour tous les tests, le niveau de la signification a été évalué au seuil 5%. Le cas échéant, la comparaison des moyennes était faite moyennant le test de Tukey afin de distinguer des groupes selon les valeurs des moyennes des variables testées.

Les mesures des caractéristiques épidémiologiques (*I*, *S*, *DII*,) sont soumises à des analyses de la variance, chaque traitement étant représenté par trois répétitions pour un seul variable.

CHAPITRE II

RESULTATS ET

DISCUSSION

1. Résultats

1.2. Résultats des tests directs

L'ensemble des espèces de *Trichoderma* ont été testées afin de mettre en évidence leur activité antagoniste directe vis-à-vis *F. graminearum* (figure 2). L'étude et la comparaison de l'efficacité des isolats testés ont exposé une réduction significative de la croissance mycélienne du *F. graminearum* qui varie en fonction le temps d'exposition. A cet effet, l'ANOVA a montré que l'espèce ($F(32,99) = 15.56; P = 0.32$) n'a aucun effet significatif sur la zone d'inhibition de la croissance mycélienne du *F. graminearum*. Bien que, le temps a montré un effet hautement significatif sur la zone d'inhibition de la croissance mycélienne du *F. graminearum*. A cet effet, la zone d'inhibition augmente au fur et à mesure avec l'augmentation de temps d'exposition. Les résultats obtenus, indiquent une zone d'inhibition qui varie entre 10 et 71.08% (figure 3). A cet égard, la zone d'inhibition la plus élevée a été constatée chez l'espèce *Trichoderma* sp1.

Les résultats affichés sur la figure 3 montre l'augmentation de la zone d'inhibition avec l'augmentation de temps d'exposition elle est passée de 10% après 24h jusqu'à 71.08 après 72h d'exposition.

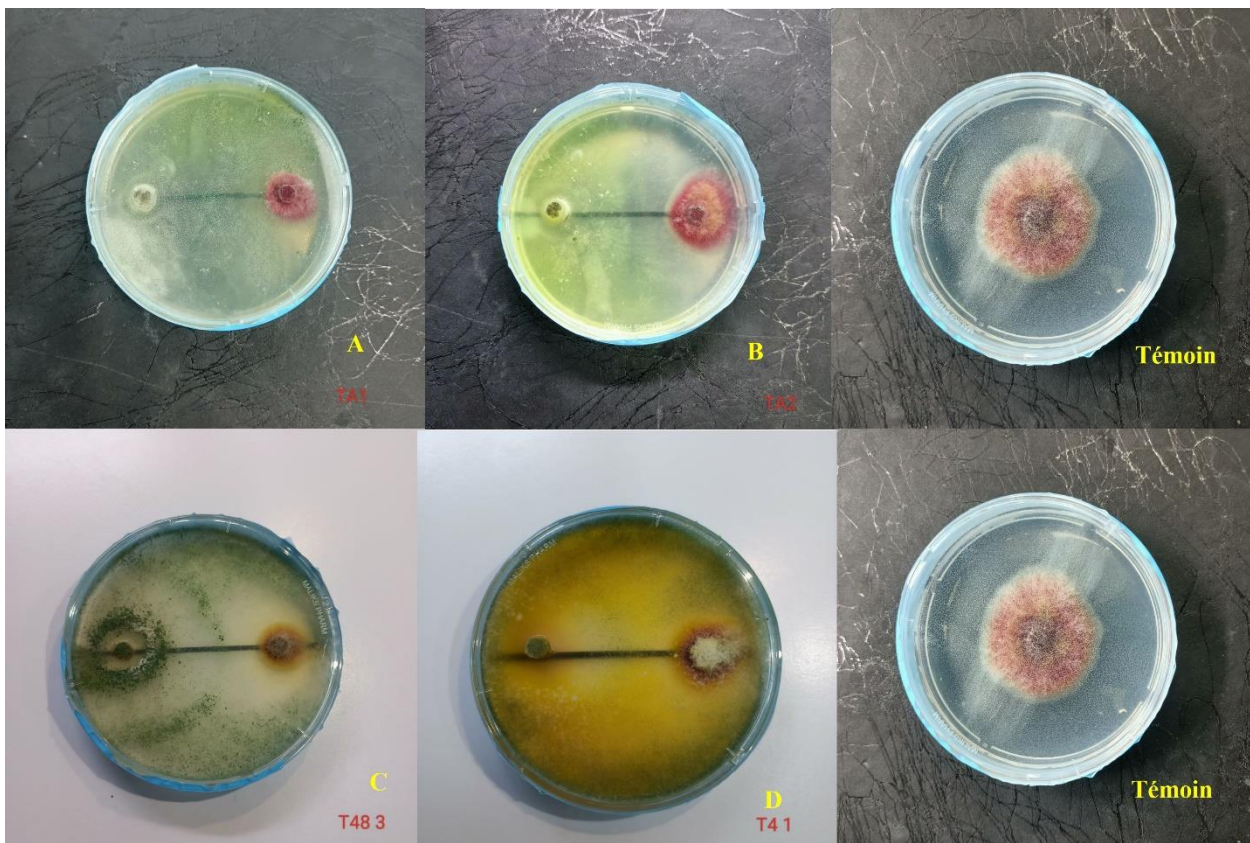


Figure 2. L'effet inhibiteur de différents espèces antagonistes *Trichoderma* sp sur *F. graminearum* en contact direct.

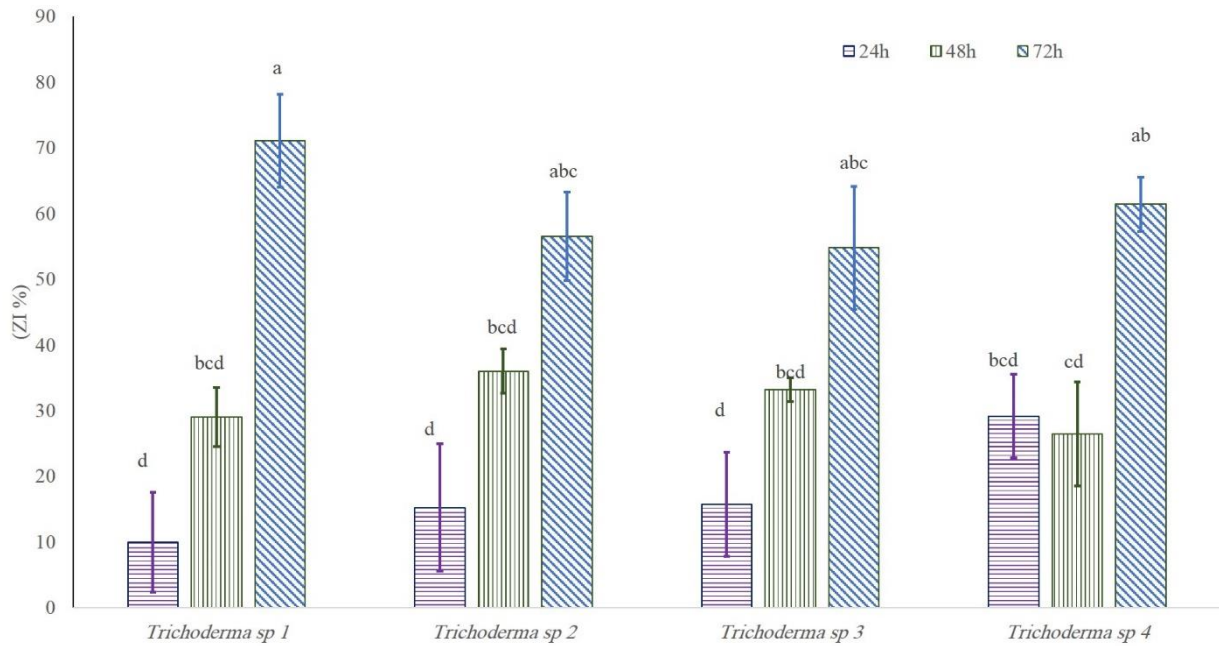


Figure 3. Effet inhibiteur des espèces de *Trichoderma sp* sur *F. graminearum* en contact direct. Les valeurs représentent la moyenne de quatre répétitions \pm l'erreur standard. Les lettres a, b et...représentent le niveau de signification au seuil de 5%.

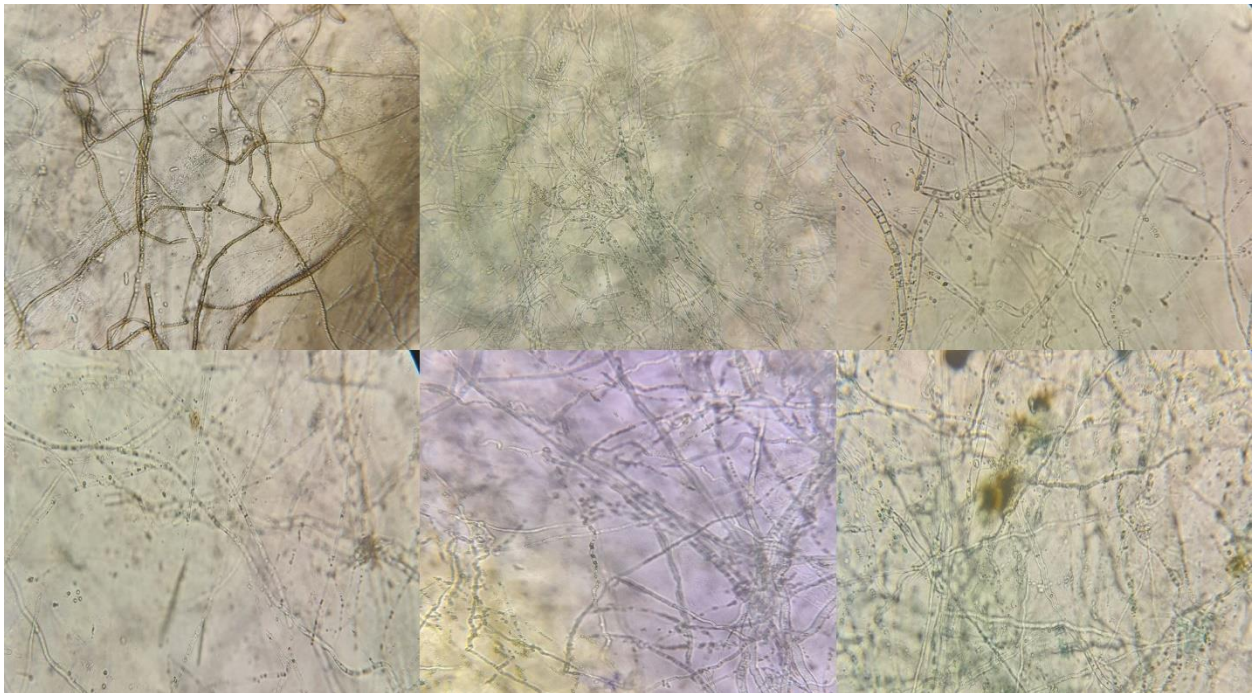


Figure 04. Observations microscopiques de la zone de confrontation entre *Trichoderma* et *F. graminearum*. a) enroulement de mycélium de *Trichoderma* sur le *F. graminearum*, b) vacuolisation et c) lyse des hyphes de *F. graminearum*.

Les observations microscopiques réalisées au niveau de la zone de contact entre les deux antagonistes exposent l'existence de modifications partielles ou totales au niveau du mycélium du pathogène (Figure 04). Ces modifications sont traduites par un arrêt de la croissance

mycélienne se marquant par une lyse total ou partiel, une transformation en cordons des filaments mycéliens et un enroulement du mycélium du *Trichoderma* sur celui du *F. graminearum*.

1.3.2. Résultats des confrontations indirects

L'effet antagoniste des *Trichoderma sp* a été examiné *in vitro* vis-à-vis *F. graminearum* par confrontation indirect. Cette technique nous a permis de mettre en évidence l'effet inhibiteur à distance de différentes souches de *Trichoderma* testées. Dans ce contexte, les analyses ANOVA montrent un effet significatif ($F(32,99)=52.23$; $P=0.0000$) de l'espèce fongique et hautement significatif de temps d'exposition ($F(32,99)=52.23$; $P=0.0000$) sur la zone d'inhibition du *F. graminearum* (figure 5).

La technique de confrontation indirecte nous a permis de mettre en évidence l'effet inhibiteur à distance des isolats fongique exercé sur le *F. graminearum*; cet effet est évalué par la mesure des diamètres des colonies de ce dernier cultivé en présence ou en absence de l'antagoniste. A cet égard, les deux espèces fongiques nommées *Trichoderma sp 1* et *Trichoderma sp2* sont les plus efficaces avec des taux d'inhibition de l'ordre de 61.42 et 71.08%, respectivement (figure 6).

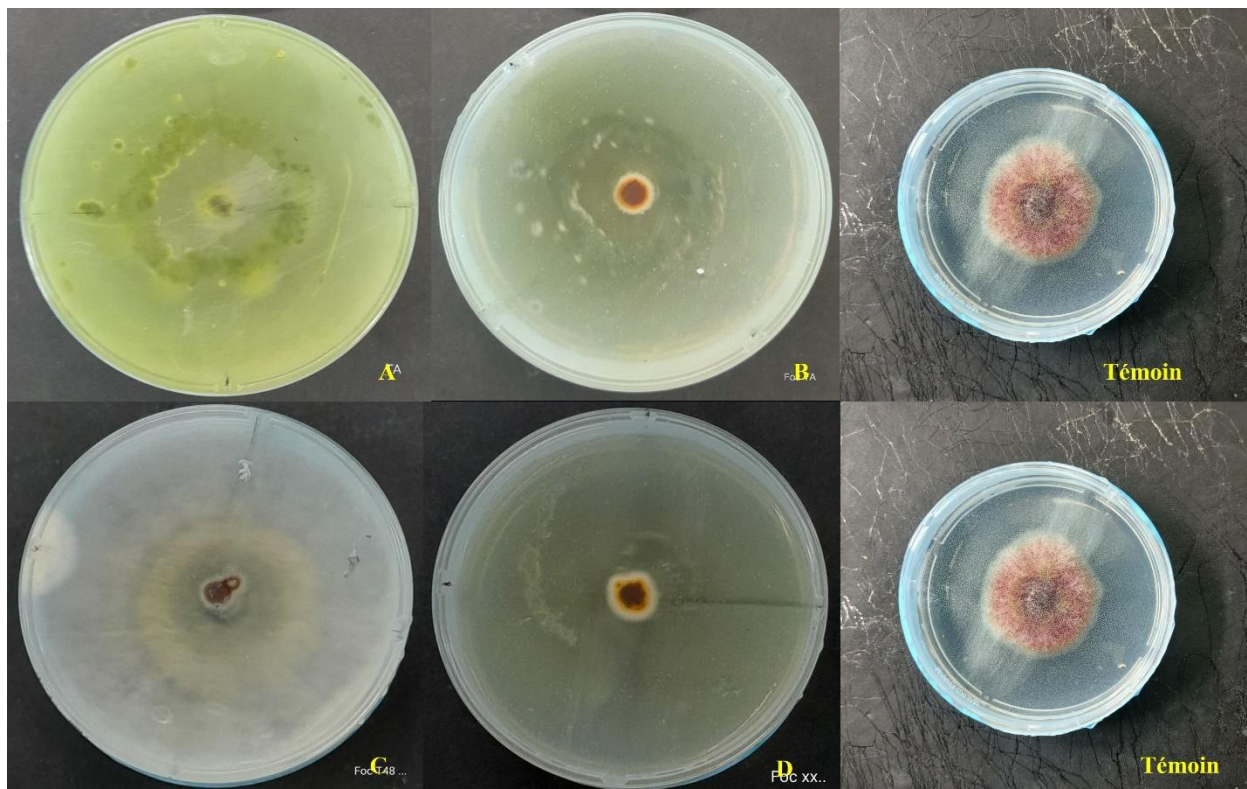


Figure 05. L'effet inhibiteur de différents espèces antagonistes *Trichoderma sp* sur *F. graminearum* en contact direct.

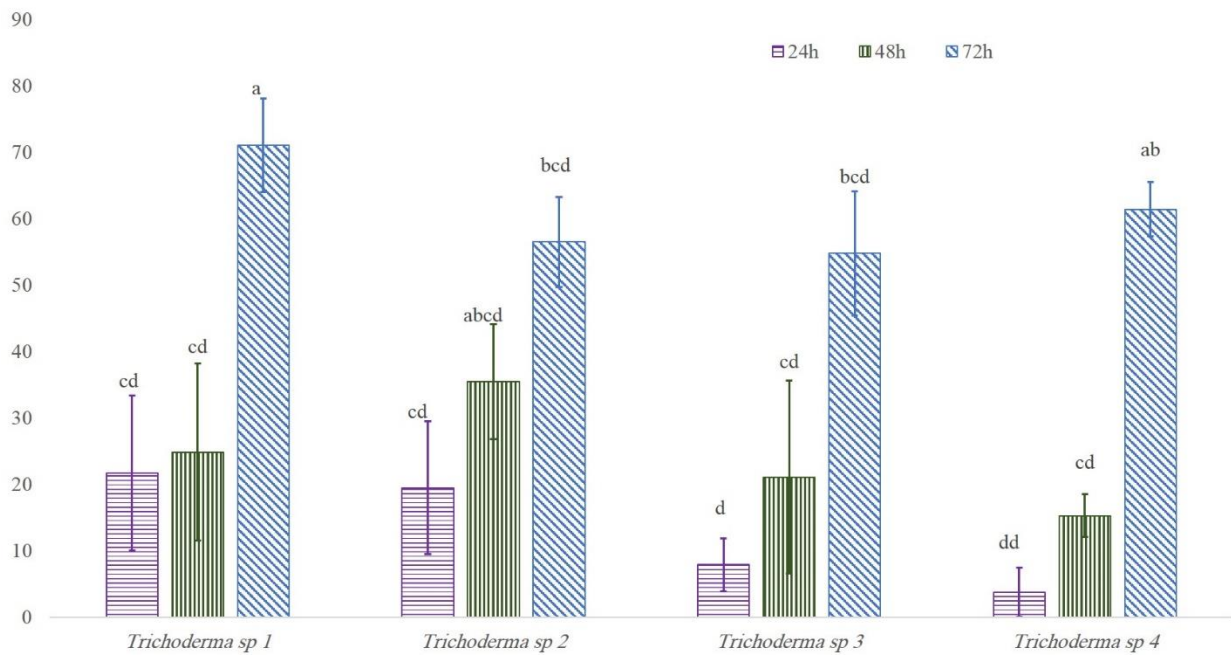


Figure 06. Effet inhibiteur des espèces de *Trichoderma sp* sur *F. graminearum* en contact direct. Les valeurs représentent la moyenne de quatre répétitions \pm l'erreur standard. Les lettres a, b et...représentent le niveau de signification au seuil de 5%.

Les résultats obtenus exposent une augmentation de la zone d'inhibition avec l'augmentation du temps d'exposition. A cet effet elle est passée de 21.66 jusqu'à 71.08% pour la souche *Trichoderma sp1*.

1.3.4. Effet des Filtrats de culture sur la croissance mycélienne du *F. graminearum*

L'analyse des données explique significativement l'effet positivement significatif des filtrats des *Trichoderma spp* sur la zone d'inhibition de la croissance mycélienne de *F. graminearum* (figure 12). L'analyse de la variance ANOVA a montré un effet très hautement significatif de l'espèce fongique ($F(5,16)=118.40$; $p<0.0000$) et la concentration de filtrats ($F(2,16)=527,12$; $p<0.0000$) et significatif du temps d'exposition ($F(2,16)=3.85$; $p<0.00000$) sur le zone d'inhibition du *F. graminearum*. Cet effet est traduit par un regroupement des souches fongiques en fonction de leur ressemblance vis-à-vis le taux de l'inhibition de la croissance mycélienne du *F. graminearum*.

La lecture de données affichées sur la figure 07 indique des zones d'inhibition très variables en fonction l'espèce fongique et le dose appliquée. A cet effet, les deux espèces *Trichoderma sp 1* et *Trichoderma sp2* ont exposé la zone d'efficacité la plus élevée pour les trois concentrations testées ; 80.2 et 58.14% d'inhibition après 72h d'exposition, respectivement. Contrairement à l'espèce *Trichoderma sp4* qui a enregistré la valeur d'efficacité la plus faible

avec environ 27.13%. Pour toutes les espèces, la zone d'inhibition est dose dépendante, elle augmente avec l'augmentation de la concentration.

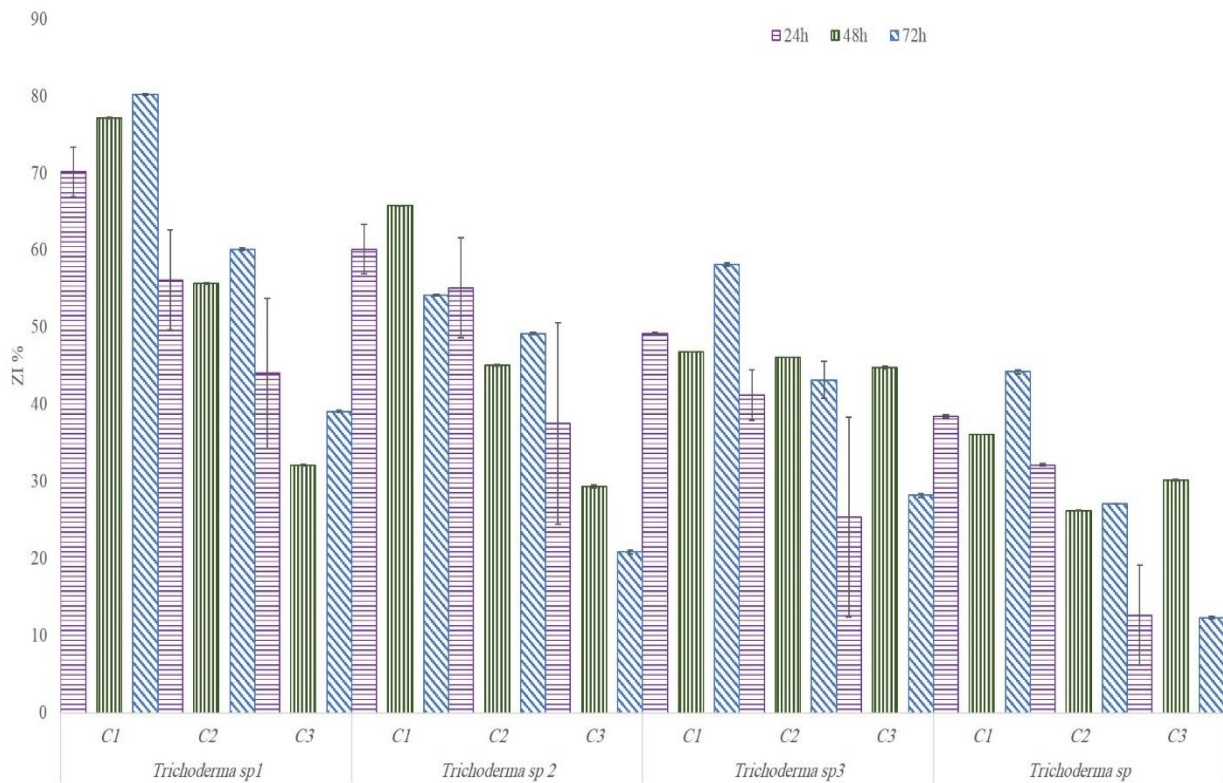


Figure 07. Effet inhibiteur des filtrats de culture de *Trichoderma sp* sur le Foc. Les valeurs représentent la moyenne de quatre répétitions \pm l'erreur standard. Les lettres a, b et...représentent le niveau de signification au seuil de 5%.

Le traitement de donnée indique un accroissement de l'efficacité des filtrats des *Trichoderma sp* en fonction le temps. A cet effet, l'efficacité la plus élevée a été notée après 72 h de traitement contrairement à l'efficacité après 24 h qui est la plus faible.

La lecture des données affichées sur la figure expose une efficacité totale de l'espèce *Trichoderma 01* pour toutes les concentrations même après 24 h seulement de traitement. Cependant, elle est de l'ordre de 75,31, 7,79 et 14,42% après 72h de traitement, respectivement.



Figure 08. Effet des espèces de *Trichoderma* sur la sévérité de la fusariose de l'épi causé par *F. graminearum* dans les conditions *in vivo*.

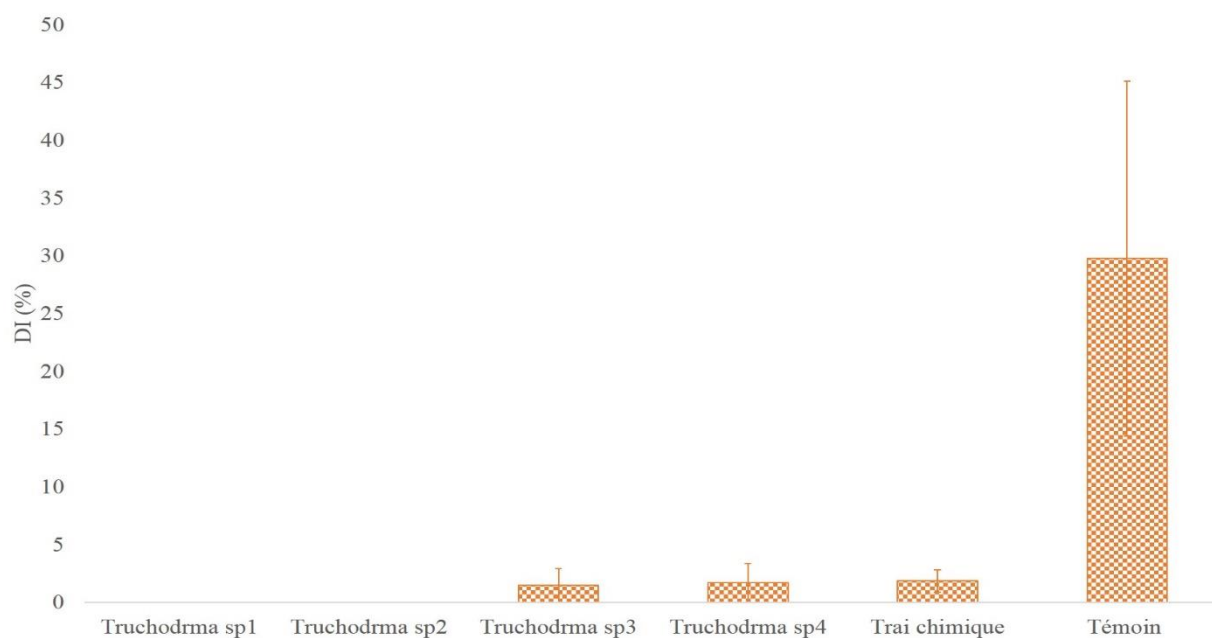


Figure 09. Effet des espèces de *Trichoderma* sur la sévérité de la fusariose causé par le *F. graminearum* dans les conditions *in vivo*. Les valeurs représentent la moyenne de quatre répétitions \pm l'erreur standard. Les lettres a, b et...représentent le niveau de signification au seuil de 5%.

1.4. Effet des espèces fongiques *in vivo*

Le traitement du sol par les différentes souches fongique a exposé effectivement une efficacité très intéressante contre la fusariose de l'épi dans les conditions *in vivo* (figure 8). Les analyses ANOVA effectués par GLM et moyennes comparées par test de Dunken montrent que, l'espèce de *Trichoderma sp* a un effet très hautement significatif ($F (12,29)= 21.19 ; P =0.00000$) sur la variation de la valeur de DI.

La lecture des résultats affichés sur la figure expose une diminution de la valeur de la fréquence de la maladie dans tous les traitements comparativement au témoin non traité. Les valeurs de la fréquence notées chez les plantules traitées sont variables entre 1.44 et 29.74 expliquent une réduction de la maladie variable entre 95.12% et 100 %. Dans ce cadre, *Trichoderma spp1* et *Trichoderma spp2* sont les plus efficace (figure 9).

2. Discussion

Aujourd'hui, la lutte contre les phytopathogènes des céréales est majoritairement accomplie par les pesticides chimiques, provoquant par conséquent des perturbations bioécologiques ; à savoir les effets néfastes sur la santé humaine et animale, aussi le développement de la résistance chez les souches phytopathogènes contre ces produits. En effet, un nouveau système agricole plus durable doit être développé pour augmenter la productivité en respectons la santé humaine et animale, ainsi que le maintien des ressources naturelles. Cela a incité la communauté scientifique pour progresser vers des méthodes contrôle alternatives, avec l'utilisation de agents antagonistes biologiques et en amont les espèces fongiques (Asghar et al. 2024, Moutassem et al., 2020, Moutassem et al., 2024).

En effet, les agents de lutte biologiques en particulier les *Trichoderma* spp. peuvent être un outil pour favoriser cette transition, car ils peuvent remplacer ou parachever les produits agrochimiques qui ne répondent pas aux critères normatifs (Díaz-Urbano et al., 2023). Ces espèces fongiques sont des micro-organismes telluriques colonisent, partiellement ou totalement les tissus internes de la plante, tels que les racines, les tiges, les graines, les feuilles et les fruits sans provoquer des maladies (Kumar et al., 2021 ; Díaz-Urbano et al., 2023). Ils se trouvent dans toutes les plantes de la planète et il en existe une grande diversité. Certains sont spécifiquement associés à certaines espèces, tandis que d'autres sont cosmopolites. Qu'ils soient utilisés individuellement, et/ou en association, se distinguent par leur potentiel antagonistes.

Les résultats obtenus sur l'effet antagoniste *in vitro* des *Trichoderma* sp ont démontré une activité inhibitrice très intéressante de la croissance mycélienne du *F. graminearum* avec des fréquences variables entre 10 et 80%, en fonction l'espèce fongique et le temps d'exposition. Les résultats de confrontation directe présentent une compétitivité potentielle des espèces de *Trichoderma*, accordé principalement au phénomène de l'hyperparasitisme, confirmé par l'observation microscopique de la zone de contact entre les deux antagonistes. Les observations microscopiques de la zone de contact exposent une altération du mycélium du *F. graminearum* suivant une activité lytique très prononcée, une transformation dans les cordons des filaments mycéliens et l'enroulement du mycélium des espèces de *Trichoderma* spp sur celle du *F. graminearum*.

La compétition est le processus qui se produit lorsqu'un organisme pathogène subit une déficience de nutriments et d'espace vital après un rapprochement avec une espèce fongique antagoniste. La faim provoquée par une insuffisance nutritive est la cause la plus redoutable pour le biocide fongique. Ces résultats sont confirmés par nos expériences où nous avons constaté un développement rapide des antagonistes en comparaison avec le pathogène *F. graminearum*. Ces

constats sont conformes aux résultats précédents apportés par Kthiri et al.2020 ; Younesi et al., 2021; Mukherjee et al., 2022 ; Asad 2022 ; Ren et al., 2023 ; Abdelmoteleb et al., 2023 ; Sirikamonsathien et al., 2023, révèlent une concurrence pour l'espace et les nutriments des espèces de *Trichoderma* avec *F. graminearum* inhibent par la suite la croissance mycélienne. En effet, la diminution des nutriments provoque couramment à une inhibition de la germination des conidies, ainsi qu'une croissance plus lente des germes de *F. graminearum*. Les résultats obtenus sont similaires à ceux obtenus par (Kthiri et al.2020 ; Asad, 2022).

En effet, les observations microscopiques effectuées sur la zone de contact entre les espèces de *Trichoderma* testées affirment un enroulement de mycélium de *Trichoderma sp* en forme spirale et attache à ceux du *F. graminearum* pendant la phase de croissance. Néanmoins, avec l'accroissement du temps d'exposition au phénomène antagoniste, le mycélium de *F. graminearum* s'amincit progressivement et cesse de croître. A ce titre, les conclusions obtenus par (Chet, 1990 ; Dubey et al., 2007 ; Mukherjee et al., 2022) confirment nos résultats et montrent que le processus d'hyperparasitisme, commence le plus souvent par la croissance mycélienne de l'antagoniste envers le pathogène, l'établissement de contact, enroulement et pénétration.

Nos résultats dévoilent aussi un effet lytique partiel et/ou total des mycéliums du *F. graminearum* après une confrontation directe. Ce constat est expliqué par les sécrétions enzymatiques issues des souches de fongiques antagonistes. En effet, selon (Mukherjee *et al.*, 2022) les espèces antagonistes exsudent des enzymes lytiques notamment, les chitinases, cellulases, xylanases, glucanases et protéinases, dégradant par conséquent les paroi cellulaires des pathogènes. Autrement, les métabolites secondaires dégagés par les espèces de *Trichoderma* exercent un effet inhibiteur sur les espèces pathogènes et dégradent d'une manière synergique la paroi cellulaire du pathogène (Xiong *et al.*, 2016). Ces constatation sont confirmés par nos résultats indiquent des activités inhibitrice de *F. graminearum* avec des taux variables en fonction l'espèce de *Trichoderma* ainsi que la concentration utilisée.

Toutefois, l'effet est dû à des substances de nature chimique libérées par les *Trichoderma* (phénomène d'antibiose) (Meslouhi, 1989). La capacité à produire de telles substances varie selon les isolats de la même espèce ou d'espèces différentes. L'antibiose est le mécanisme impliqué dans la lutte biologique, représenté par l'interférence des métabolites secondaires spécifiques ou non spécifiques d'origine fongique, par des substances volatiles et d'autres composés toxiques des pathogènes (Dennis et Websters, 1971a, Mukherjee et al., 2022 ; Asad 2022 ; Pandey et al. 2022 ; Ling et al., 2023 ; Rajab et al., 2023).

En analysant les résultats de la confrontation à distance, nous pouvons également conclure que les espèces de *Trichoderma* testées inhibent significativement la croissance

mycélienne du *F. graminearum* par la libération de substances volatiles. Nos résultats indiquent une fréquence d'inhibition qui varie entre 10 et 15%, avec des fréquences élevées chez les *Trichoderma* spp. D'une manière générale, l'effet des substances volatiles émises par les espèces de *Trichoderma* est sensiblement faible. L'espèce *Trichoderma viride* est la plus efficace avec des taux d'inhibition supérieur à 20%. D'après Dennis et Websters (1971), les *Trichoderma* émettent des substances biocide toxiques qui sont des dérivés de l'hydrazine présents sous formes des substances volatiles importantes. Nos résultats sont analogues a ceux obtenus par (Pandey et al. 2022) (Swapan et al, 2022) (Sirikamonsathien et al., 2023). Ces auteurs ont suggérés que les composés volatils produits par *Trichoderma* ont prouvé l'inhibition de la croissance mycélienne contre *Alternaria alternata*, *Pseudopezalotiopsis theae*, *Phytophthora infestans* et d'autres phytopathogènes. En effet, *T. harzianum* est également connu par sa production de certains composés volatils et non volatils (Markuz et al., 2012; Singh et al., 1997).

La réussite de *Trichoderma* spp en tant qu'agent de lutte biologique contre diverses phytopathogènes, est significativement liée à la production d'un nombre excessif de métabolites bioactifs, y compris les métabolites secondaires (Zeilinger et al., 2017; Li et al., 2018). Ces rapports scientifiques confirment nos résultats selon lesquels les métabolites secondaires extraits à partir des *Trichoderma* sp ont montré une réduction significative de la croissance mycélienne de *F. graminearum*. Cependant, la variation observée de l'activité fongicide pourrait être attribuée aux différents types de composés chimiques produits par les différentes espèces.

In vitro, les filtrats de culture de *Trichoderma* sp ont été analysés pour leur capacité antifongique contre le *F. graminearum*. Ce test a été effectué par la technique des puits sur un milieu de culture gélosé. Les résultats obtenus affichent une activité antifongique plus au moins importantes sur *F. graminearum*, qui varie en fonction l'espèce fongique et la concentration utilisée. La zone d'inhibition est variable entre 10 et 15% avec une efficacité remarquable chez les espèces de *Trichoderma*. Par ailleurs, cette efficacité augmente au fur et à mesure l'augmentation de la concentration.

Ces résultats sont en accord avec les rapports précédents apportés par Mathew et Gupta, 1998 ; Ezziyyani et al., 2009; Srideepthi et Krishna, 2015. Des résultats similaires obtenus par Inhibition similaire de la croissance des colonies de *F. graminarum*, *P. capsici* et *R. solani* par *T. asperellum* a été signalé plus tôt (El Komy et al., 2015; Jiang et al., 2016 ; Asad et al., 2014). Les filtrats de culture de *T. asperellum* a montré une inhibition significative sur trois phytopathogènes.

Nos résultats montrent l'effectivité de toutes les espèces de *Trichoderma* testées *in vivo*, par conséquent réduisent la sévérité de la fusariose du pois chiche dans les conditions contrôlées. Les

résultats obtenus indiquent la diminution de la sévérité de la maladie avec des pourcentages qui s'étalent entre 28.27 et 64.27 %. *In vivo*, l'efficacité des *Trichoderma* pourrait être attribuée à la réduction de la population du *F. graminearum* d'une part certifiant ainsi l'activité antifongique des espèces de *Trichoderma in vitro* et à l'induction de la résistance systémique chez la plante hôte d'autre part.

Les espèces de *Trichoderma* sont connues pour produire divers métabolites secondaires en réponse à différents agents pathogènes fongiques. En effet les travaux de Mironenka et al., 2021 ont décrit les effets des métabolites produits lors d'une culture de *Trichoderma harzianum* sur la croissance et le développement du pathogène populaire *Fusarium culmorum*. Une inhibition de la croissance du pathogène et de la production de métabolites secondaires, dont la zéaralénone, a été observée sur des boîtes de Petri.

In vivo, nos résultats montrent l'efficacité de toutes les espèces de *Trichoderma* testées, par conséquent diminuent la sévérité de la de la maladie dans les conditions non contrôlées. Les résultats obtenus montrent la réduction de la sévérité de la fusariose de l'épi avec des pourcentages qui s'étalent entre 28.27 et 64.27 %. L'efficience des *Trichoderma* dans les conditions non contrôlées pourrait être expliquée par la réduction de la population du *F. graminearum* du sol d'une part et à l'induction de la résistance systémique chez la plante hôte d'autre part. Ces résultats témoignent ainsi l'activité antifongique des espèces de *Trichoderma in vitro*

Les *Trichoderma* spp présentent une efficacité de lutte biologique prometteuse et ont fait l'objet d'études intensives dans le contrôle des maladies des plantes diverses cultures économiques (Zin et Badaluddin, 2020 ; Ferreira et Musumeci, 2021). Ils procèdent par divers mécanismes contre les agents phytopathogènes à la fois par les voies directes et indirectes, y compris l'hyperparasitisme, l'antibiose, l'expression génétique des plantes pour induire la résistance systémique des plantes (Kaewsalong et al., 2019 ; Sood et al., 2020). Ces agents sont caractérisés par une force adaptative très élevée dans les plantes hôtes et dans diverses conditions environnementales (Moutassem, 2020). Ces mécanismes sont utilisés séparés ou d'une manière combinée et agissent souvent en synergie pour prévenir et éradiquer les maladies des plantes (Adeleke et al., 2022). Par la suite, ces espèces antagonistes peuvent accroître la croissance des racines, détruisent les substances toxiques fabriquées par la microflore pathogène, contrôlent par conséquent directement les pathogènes telluriques. Les observations microscopiques effectuées par Shalini et al., (2007) sur des cultures traitées par les *Trichoderma* spp ont montré que ces espèces croît au fur et à mesure la croissance de pathogène, s'enroulent autour du *Rhizoctonia solani* et forment des crochets empêchant ainsi le développement de ce dernier.

Dennis et Webster (1971) ont montré l'effet des antibiotiques secrétés par les *Trichoderma*, solubles dans le chloroforme et extractibles à partir du milieu de culture. D'après Comporata (1985), cette interprétation favorise l'action des enzymes (β 1-3) gluconase- chitinase qui conduisent à la lyse du mycélium du parasite.

Nous pensons qu'en plus de l'action des antibiotiques, *Trichoderma* se développe plus rapidement par rapport à au FOC en colonisant le milieu nutritif et en ravissant les éléments nutritifs, c'est le phénomène de compétition (Dubot, 1985; Davet, 1996, Cesarini et al., 2025).

L'induction de la résistance chez les plantes par *Trichoderma* a été étudiée et comparée avec les réponses induites par les *Rhizobactéries*. *Trichoderma* est résistante aux cyanures et produit deux différentes enzymes qui sont capables de dégrader les cyanures dans la zone racinaire (Ezzi *et al.*, 2002). Par la suite, ce champignon peut augmenter la croissance racinaire, détruit les métabolites toxiques produits par la microflore et contrôle directement les pathogènes des racines. Des observations microscopiques sur des cultures de différents champignons ont montré que *Trichoderma* croit parallèlement avec *Rizoctonia Solani*.

Les travaux menés par Cesarini et al., 2025 sur la fusariose de l'épi montrent que les deux espèces *Trichoderma asperellum* ICC012 et *Trichoderma gamsii* managent efficacement la maladie *in vivo* par conséquent réduisent la sévérité de la maladie avec des taux supérieurs à 60%, ce qui est en accord avec nos résultats. Ces résultats sont justifiés expérimentalement par la réduction potentielle de population de l'agent pathogène et l'induction des mécanismes de résistance.

Pedrero-Méndez et al., 2025 ont rapportés que les traitements par des souches de *Trichoderma* activent les mécanismes de défense de blé contre *F. graminearum* par l'activation des voies de l'acide salicylique. À ce titre, les résultats obtenus exposent une réduction importante de l'indice de la fusariose de l'épi avec environ 60% suite à un traitement par *T. asperellum* T25. Ce qui témoigne nos résultats.

Dans le même ordre des idées Stummer et al., 2022 ont exposés l'effet biologique des *Trichoderma harzianum* et *T. gamsii* envers *Fusarium pseudograminearum* *in vitro* et *in vivo*. Les souches A5MH et Tr906 ont activement colonisé la rhizosphère du blé et supprimé l'abondance du pathogène *in planta*. Les souches fongiques ont améliorées la qualité microbiologique du sol via l'augmentation de la microflore bénéfique.

L'efficacité de *Trichoderma gamsii* T6085, contre *F.graminarum* a été prouvée par Risoli *et al*, (2025). Les tests *in vivo* montrent la réduction de la maladie avec des taux de 55 et 64%, respectivement. Les travaux de Kthiri et al.2020 indiquent la diminution de la maladie de collet causée par *F. colmurum* avec des fréquences variables entre 66 et 68%. De même,

Bouanaka et al., 2021 exhibent l'efficacité de 15 isolats de *Trichoderma* auprès *Fusarium culmorum* *in vitro* et *in vivo*, dont 50 à 63.63% de la sévérité de la maladie a été réduite.

Cet effet bénéfique est obtenu même en absence de tout agent pathogène. En effet, Windham *et al.*, (1986) ont montré que l'addition de *T. harzianum* et de *T. koningii* à un sol préalablement autoclavé a augmenté le pourcentage de germination des semences de tomate et du tabac en le comparant au témoin et que l'application de ces deux espèces de *Trichoderma* au substrat de culture a amélioré le poids sec des racines ainsi que de la partie aérienne de ces deux espèces qui représentait 213 % à 291 % de celui du témoin non traité.

Toutes les études antérieures portées sur les *Trichoderma* ont montré leur efficacité *in vivo* vis à vis une multitude des microorganismes phytopathogène et en particulier le Foc (Moutassem et al., 2020). Des études récentes sur le rôle de *Trichoderma* dans la biologie contrôle ont principalement utilisé des souches telles que *T. harzianum* (Ferrigoa, et al. 2020 ; Mei et al. 2019, Moutassem et al., 2020, Mironenka et al., 2021), *T. asperellum* 525, and *T. pseudokoningii* (Mei et al. 2019 ; Cheng et al. 2010 ; Bi 2016 ; Díaz-Gutiérrez et al.,), *T. longibrachiatum* (Bi 2016; Zhang et coll. 2016), *T. reesei* (Luo et al., 2016) et *T. atroviride* (Han et al. 2013).

En plus de son pouvoir de lutte biologique, *T. viride* est connu comme agent d'amélioration de croissance chez la plupart des plantes, les résultats de Verma *et al.*, (2007) qui ont travaillé sur la tomate et de Gravel et al. (Avis *et al.*, 2008) ont prouvé que *Trichoderma* est un améliorateur de croissance chez certains types de végétaux. D'après Yedida *et al.*, (2001), Généralement, *Trichoderma* inhibe ou dégrade la pectinase et d'autres enzymes qui sont essentiels pour les phytopathogènes. En plus de son effet inhibiteur, *Trichoderma* est aussi capable d'induire une résistance localisée et systématique. L'amélioration de la croissance des plantes par *Trichoderma* peut prendre lieu soit au niveau de la plante (Yedida *et al.*, 2001), soit au niveau du sol (Chang *et al.* 1986; Harman, 2001).

Conclusion

Conclusion et perspective

Conclusion et perspective:

L'objectif de notre travail est de tester l'effet antagoniste *in vitro* ainsi qu'*in vivo* de quelques souches de *Trichoderma* sp contre le *F. graminearum* agent de la fusariose de l'épi de Blé dur.

La zone d'inhibition augmente au fur et à mesure avec l'augmentation de temps d'exposition. Les résultats obtenus, indiquent une zone d'inhibition qui varie entre 10 et 71.08%. A cet égard, la zone d'inhibition la plus élevée a été constatée chez l'espèce *Trichoderma* spp1.

Les résultats obtenus montrent l'augmentation de la zone d'inhibition avec l'augmentation de temps d'exposition elle est passée de 10% après 24h jusqu'à 71.08 après 72h d'exposition. . Les examens microscopiques ont révélé des changements profonds au niveau de mycélium de *F. graminearum*, indiquées par une vacuolisation et une induction du vieillissement précoce par épaissement pariétal et une lyse des mycéliums de pathogène.

Les tests antagonistes à distance nous ont permis de dévoiler une grande potentialité inhibitrice de substances volatiles, dont les taux d'inhibition varient entre 61.42 et 71.08%, qui sont constatée faible chez l'espèce pour *Trichoderma* spp1

La lecture des données de l'effet des filtrats de culture de *Trichoderma* sp sur la croissance du *F. graminearum* expose une efficacité très importante de toutes les espèces de *Trichoderma* pour toutes les concentrations. Alors que les deux espèces *Trichoderma* sp 1 et *Trichoderma* sp2 ont exposé la zone d'efficacité la plus élevée pour les trois concentrations testées ; 80.2 et 58.14% d'inhibition après 72h d'exposition, respectivement.

Les souches de *Trichoderma* ont été avérés très efficaces *in vivo* avec des valeurs de DI variables .44 et 29.74 expliquent une réduction de la maladie variable entre 95.12% et 100 %.

Les résultats prometteurs de cette étude révèlent des perspectives séduisantes d'application étendues pour la lutte contre *Fusarium graminearum* préparations biologiques basées sur des souches efficaces de *Trichoderma* —*Trichoderma* spp1 et sp2 pourraient être développées comme alternatives durables —notamment spp1 et sp2 aux pesticides chimiques, leur stabilité et leur efficacité au champ étant améliorées

Conclusion et perspective

encapsulation ou des combinaisons synergiques avec -des techniques de nano via des composés organiques. Un investissement dans la recherche en ingénierie génétique est également recommandé pour renforcer la production de métabolites (enzymes lytiques de paroi fongique) dans les souches les plus performantes (tels que les champignons pathogènes).

Sur le plan des pratiques agricoles, il sera essentiel de concevoir des protocoles intégrés associant *Trichoderma* à la gestion des cultures (comme des calendriers de plantation optimisés et la rotation de cultivars résistants). Cette intégration pourrait élever l'efficacité du contrôle de la maladie à près de 100 %, comme démontré lors des essais *in vivo*. Cette synergie s'avérera cruciale pour contrer les défis climatiques futurs susceptibles d'exacerber la propagation des champignons pathogènes.

L'étude ouvre également la voie à des explorations avancées sur l'interaction de *Trichoderma* avec le microbiome du sol et son utilisation potentielle pour stimuler la croissance des plantes via des mécanismes d'expression génique. Il est aussi proposé d'élargir les essais à des souches mutées et résistantes de *Fusarium*, tout en surveillant l'impact à long terme de *Trichoderma* sur la qualité des sols et la productivité.

Ces orientations renforcent non seulement la sécurité alimentaire, mais traduisent aussi les résultats de laboratoire en solutions applicables dans une agriculture intelligente. Cette approche préserve les agriculteurs de lourdes pertes tributaires à des systèmes agricoles résilients et exempts de contaminants chimiques.

Références

Références :

1. Abdelrahman, M., Abdel-Motaal, F., El-Sayed, M., Jogaiah, S., Shigyo, M., Ito, S., & Tran, L.-S. P. (2016). Dissection of *Trichoderma longibrachiatum*-induced defense in onion against *Fusarium oxysporum* f. sp. *cepa*. *Plant Science*, 246, 128–138.
2. Akrami, M., Hadi, G., & Ahmadzadeh, M. (2012). Evaluation of *Trichoderma* combinations for controlling *Fusarium* rot of lentil. *African Journal of Biotechnology*, 10(14), 2653–2658.
3. Alwhibi, M.S., Hashem, A., Abd_Allah, E.F., Alqarawi, A.A., Soliman, D.W.K., Wirth, S., & Egamberdieva, D. (2017). *Trichoderma harzianum* enhances drought resistance via secondary metabolites. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(8), 1751–1757.
4. Ardestani, A., & Yazdanparast, R. (2007). Antioxidant potential of *Achillea santolina* extracts. *Food Chemistry*, 104(1), 21–29.
5. Ayoubi, N., Zafari, D., & Mirabolfathy, M. (2014). β -glucanase production in *Trichoderma* species. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 47(10), 1190–1200.
6. Bae, S.-J., Mohanta, T.K., Chung, J.Y., Ryu, M., Park, G., Shim, S., & Bae, H. (2016). *Trichoderma* metabolites against *Phytophthora*. *Biological Control*, 92, 128–138.
7. Bahous, M., Ouazzani Touhami, A., & Douira, A. (2008). Survival of rice fungal pathogens. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat*, 30, 13–18.
8. Bakker, P.A.H.M., Pieterse, C.M.J., & van Loon, L.C. (2007). Induced systemic resistance by *Pseudomonas* spp. *Phytopathology*, 97(2), 239–243.
9. Blumenthal, C.Z. (2004). Peptide metabolites in *Aspergillus* and *Trichoderma*. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 39(2), 214–228.

10. Boureghda, H., & Bouznad, Z. (2009). Biocontrol of chickpea wilt using *Trichoderma*. *Acta Phytopathologica et Entomologica Hungarica*, 44(1), 31–38.
11. Braun, H., Woitsch, L., Hetzer, B., Geisen, R., Zange, B., & Schmidt-Heydt, M. (2018). *Trichoderma harzianum* inhibits mycotoxin biosynthesis. *International Journal of Food Microbiology*, 280, 10–16.
12. Chet, I. (1987). Parasitism of *Sclerotium rolfsii* by *Trichoderma harzianum*. *Phytopathology*, 77(7), 1195–1200.
13. Chet, I., Benhamou, N., & Besselat, B. (1979). Interaction between *Trichoderma harzianum* and *Pythium ultimum*. *Applied and Environmental Microbiology*, 37(5), 961–964.
14. Chet, I., & Baker, R. (1981). Biocontrol potential of *Trichoderma hamatum*. *Phytopathology*, 71(2), 286–290.
15. Chet, I. (1993). *Biotechnology in plant disease control*. Wiley.
16. Chet, I., Benhamou, N., & Haran, S. (1998). Mycoparasitism and lytic enzymes. In *Trichoderma and Gliocladium* (Vol. 2, pp. 153–172). Taylor & Francis.
17. Chua, L.S., Latiff, N.A., Lee, S.Y., Lee, C.T., Sarmidi, M.R., & Aziz, R.A. (2011). Phenolics from *Labisia pumila*. *Food Chemistry*, 127(3), 1186–1192.
18. Clavet, C., Pera, B., & Bera, J.M. (1990). Interaction of *Trichoderma* with *Glomus mosseae*. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 29(1-4), 59–65.
19. Clerivet, A., Alami, I., Breton, F., Garcia, D., & Sanier, C. (1996). Phenolic compounds and plant resistance. *Acta Botanica Gallica*, 143(6), 531–538.
20. Daryaei, A., Jones, E.E., Alizadeh, H., Glare, T.R., & Falloon, R.E. (2016). Conidium fitness of *Trichoderma atroviride*. *Biocontrol Science and Technology*, 26(3), 414–427.
21. De Oliveira, V., Bellei, M., & Borges, A.C. (1984). Control of garlic white rot. *Canadian Journal of Microbiology*, 30(7), 884–889.

22. Dennis, C., & Webster, J. (1971). Non-volatile antibiotics from *Trichoderma*. *Transactions of the British Mycological Society*, 57(1), 25–39.
23. Dennis, C., & Webster, J. (1971). Hyphal interactions in *Trichoderma*. *Transactions of the British Mycological Society*, 57(3), 363–369.
24. Dickinson, J.M., Hanson, J.R., Hitchcock, P.B., & Claydon, N. (1989). Harzianopyridone from *Trichoderma harzianum*. *Journal of Chemical Society Perkin Transactions 1*, 1, 1885–1887.
25. Donnelly, D.M.X., & Sheridan, M.H. (1986). Anthraquinones from *Trichoderma polysporum*. *Phytochemistry*, 25(10), 2303–2304.
26. Dubey, M.K., Broberg, A., Sooriyaarachchi, S., Wah, M., & Jensen, D.F. (2013). Glyoxylate cycle in *Trichoderma atroviride*. *Fungal Genetics and Biology*, 58-59, 33–41.
27. Dubey, S.C., & Patel, B. (2001). Fungal antagonist against *Thanatephorus cucumeris*. *Indian Phytopathology*, 54(2), 206–209.
28. Dubey, S.C., & Singh, B. (2003). Chickpea genotypes against *Fusarium* wilt. *Indian Phytopathology*, 56(2), 233.
29. Dubey, S.C., Suresh, M., & Singh, B. (2007). *Trichoderma* against chickpea wilt. *Biological Control*, 40(1), 118–127.
30. Dubey, S.C., Tripathi, A., Dureja, P., & Grover, A. (2011). Secondary metabolites of *Trichoderma*. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 81(5), 455–461.
31. El-Debalky, S.A. (2017). *Aspergillus piperis* vs. *Trichoderma harzianum*. *Microbial Pathogenesis*, 113, 135–143.
32. Elmassi, F., Ghisalbertini, E.L., & Narbey, M.J. (1991). Antibiotics from *Trichoderma harzianum*. *Journal of Natural Products*, 54(2), 396–402.
33. El-Sharkawy, H.H.A., Rashad, Y.M., & Ibrahim, S.A. (2018). Biocontrol of wheat stem rust. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 103, 84–91.

34. Ferrigo, D., Mondin, M., Edith, L., Fabio, F., Causin, R., & Raiola, A. (2020). Seed biopriming with *Trichoderma* against ear rot. *Biological Control*, 146, 104286.
35. Francesca, B., Silvia, C., Franzetti, E., Congiu, T., Marinelli, F., Casartelli, M., & Tettamanti, G. (2016). *Trichoderma* chitinases affect Lepidoptera matrix. *Pest Management Science*, 72(5), 980–989.
36. Gajera, H.P., Savaliya, D.D., Patel, S.V., & Golakiya, B.A. (2015). Defense response in groundnut by *Trichoderma viride*. *Infection, Genetics and Evolution*, 34, 314–325.
37. Gava, C.A.T., & Pinto, J.M. (2016). Biocontrol of melon wilt by *Trichoderma*. *Biological Control*, 97, 13–20.
38. Ghisalberti, E., & Rowland, C.Y. (1993). Antifungal metabolites from *Trichoderma harzianum*. *Journal of Natural Products*, 56(10), 1799–1804.
39. Goulson, D. (2013). Environmental risks of neonicotinoids. *Journal of Applied Ecology*, 50(4), 977–987.
40. Halifu, S., Deng, X., Song, X., Song, R., & Liang, X. (2020). *Trichoderma virens* inhibits *Rhizoctonia solani*. *Plants*, 9(7), 912.
41. Harman, G.E. (2000). Myths of biocontrol. *Plant Disease*, 84(4), 377–393.
42. Harman, G.E., Howell, C.R., Viterbo, A., Chet, I., & Lorito, M. (2004). *Trichoderma* as plant symbionts. *Nature Reviews Microbiology*, 2(1), 43–56.
43. Harris, D.R. (1998). Neolithic agriculture spread. In *Origins of agriculture** (pp. 54–64). ICARDA.
44. Haware, M.P., Jimenez-Diaz, R.M., Amin, K.S., Phillips, J.C., & Halila, H. (1990). Management of chickpea wilt. In *Chickpea in the nineties** (pp. 129–133). ICRISAT.
45. Haware, M.P., Nene, Y.L., & Natarajan, M. (1996). Survival of *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris*. *Phytopathologia Mediterranea*, 35(1), 9–12.
46. Heguera, G., & Beauge, L. (1997). Phosphoryl group exchange by Hsp70. *Plant Physiology*, 114(4), 1397–1403.

47. Hibar, K., Mejda, D.R., Haifa, K., & Mohamed, E. (2005). *Trichoderma* against *Fusarium* in tomato. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 9(5), 163–171.
48. Huang, C., Yu, B., Teng, Y., Su, J., Su, Q., Cheng, Z., & Zeng, L. (2009). Fruit bagging effects on pears. *Scientia Horticulturae*, 121(2), 149–158.
49. Iida, A., Mihara, T., Fujita, T., & Takaishi, Y. (1999). Peptide immunosuppressants from *Trichoderma polysporum*. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 9(24), 3393–3396.
50. Irum, M. (2007). Control of *Fusarium* wilt in chickpea. *Mycopathology*, 5(2), 107–110.
51. Jain, A., Singh, S., Sarma, B.K., & Singh, H.B. (2012). Microbial consortium enhances pea defense. *Journal of Applied Microbiology*, 112(3), 537–550.
52. Jimenez-Diaz, R.M., Castillo, P., Jimenez-Gasco, M. del M., Landa, B.B., & Navas-Cortes, J.A. (2015). *Fusarium* wilt of chickpeas. *Crop Protection*, 73, 16–27.
53. Jin, P., Wang, S.Y., Gao, H., Chen, H., Zheng, Y., & Wang, C.Y. (2012). Antioxidant in raspberries. *Food Chemistry*, 132(1), 399–405.
54. Jukanti, A.K., Gaur, P.M., Gowda, C.L.L., & Chibbar, R.N. (2012). Nutritional benefits of chickpea. *British Journal of Nutrition*, 108(S1), S11–S26.
55. Keswani, C., Mishra, S., Sarma, B.K., Singh, S.P., & Singh, H.B. (2013). Applications of *Trichoderma* metabolites. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98(2), 533–544.
56. Keszler, A., Forgacs, E., Kotai, I., Vizcaino, J.A., & Garcia-Acha, I. (2000). Volatiles from *Trichoderma atroviride*. *Journal of Chromatographic Science*, 38(10), 421–424.
57. Li, Mei, Ma, G.-S., Lian, H., Su, X.-L., Tian, Y., Huang, W.-K., Mei, J., & Jiang, X.-L. (2019). *Trichoderma* against cucumber fusarium wilt. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(3), 607–617.
58. Li, R.X., Cai, F., Pang, G., Shen, Q.R., Li, R., & Chen, W. (2015). *Trichoderma harzianum* solubilizes phosphate. *PLOS ONE*, 10(6), e0130081.

59. Li, Y.T., Hwang, S.G., Huang, Y.M., & Huang, C.H. (2018). *Trichoderma asperellum* for tomato *Fusarium* wilt. *Crop Protection*, 110, 275–282.
60. Livak, K.J., & Schmittgen, T.D. (2001). Analysis of gene expression by real-time PCR. *Methods*, 25(4), 402–408.
61. Malofeeva, E.V., Domanitskaya, N., Gudima, M., & Hopper-Borge, E.A. (2012). Modulation of ABCC10 activities. *Cancer Research*, 72(24), 6457–6467.
62. Medeiros, H.A., Araújo Filho, J.V., Freitas, L.G., Castillo, P., Rubio, M.B., Hermosa, R., & Monte, E. (2017). Tomato resistance to nematodes by *Trichoderma*. *Scientific Reports*, 7, 40216.
63. Meena, M., Swapnil, P., Zehra, A., Dubey, M.K., & Upadhyay, R.S. (2017). Antagonistic *Trichoderma* compounds. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 50(13-14), 629–643.
64. Merkuç, A., & Getachew, A. (2012). Chickpea wilt management in Ethiopia. *International Journal of Current Research*, 4(4), 46–52.
65. Mohammad, A., Hadi, G., & Masoud, A. (2011). *Trichoderma* against lentil *Fusarium* rot. *African Journal of Biotechnology*, 10(14), 2653–2658.
66. Mona, S.A., Hashem, A., Abd_Allah, E.F., Alqarawi, A.A., Soliman, D.W.K., Wirth, S., & Egamberdieva, D. (2017). *Trichoderma* enhances drought resistance. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(8), 1751–1757.
67. Monfil, V.O., & Casas-Flores, S. (2014). Molecular mechanisms of *Trichoderma* biocontrol. In *Biotechnology and biology of Trichoderma* (pp. 429–453). Elsevier.
68. Mukherjee, M., Mukherjee, P.K., Horwitz, B.A., Zachow, C., Berg, G., & Zeilinger, S. (2012). *Trichoderma*-plant-pathogen interactions: Advances in genetics of biological control. *Indian Journal of Microbiology*, 52(4), 522–529.
69. Mukherjee, M., Horwitz, B.A., Sherkhane, P.D., Hadar, R., & Mukherjee, P.K. (2006). Secondary metabolite biosynthesis cluster in *Trichoderma virens*. *Current Genetics*, 50(3), 193–202.
70. Nassr, S., & Barakat, R. (2013). Conidium germination of *Botrytis cinerea* in vitro. *Mycopathologia*, 175(5-6), 423–429.

71. Nawaz, K., Shahid, A.A., Bengyella, L., Subhani, M.N., Ali, M., Anwar, W., Ifukhara, S., & Ali, S.W. (2018). Diversity of *Trichoderma* species against *Phytophthora capsici*. *Scientia Horticulturae*, 239, 242–252.
72. Nawrocka, J., & Małolepsza, U. (2013). Diversity in plant systemic resistance induced by *Trichoderma*. *Biological Control*, 67(2), 149–156.
73. Pascale, A., Vinale, F., Manganiello, G., Nigro, M., Lanzuise, S., Ruocco, M., & Lorito, M. (2017). *Trichoderma* and its secondary metabolites improve yield and quality of grapes. *Crop Protection*, 92, 176–181.
74. Reithner, B., Schuhmacher, R., Stoppacher, N., Pucher, M., Brunner, K., & Zeilinger, S. (2007). Signaling via the *Trichoderma atroviride* mitogen-activated protein kinase Tmk1. *Fungal Genetics and Biology*, 44(11), 1123–1133.
75. Saravanakumar, K., Dou, K., Lu, Z., Wang, X., Li, Y., & Chen, J. (2018). Enhanced biocontrol activity of cellulase from *Trichoderma harzianum* against *Fusarium graminearum*. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 103, 130–136.
76. Saravanakumar, K., Yu, C., Dou, K., Wang, M., Li, Y., & Chen, J. (2016). Synergistic effect of *Trichoderma*-derived antifungal metabolites and cell wall degrading enzymes. *Biological Control*, 94, 37–46.
77. Sarrocco, S., Mikkelsen, L., Vergara, M., Jensen, D.F., Beck, M.L., & Vannacci, G. (2006). Histopathological studies of sclerotia parasitized by *Trichoderma virens*. *Mycological Research*, 110(2), 179–187.
78. Schubert, M., Fink, S., & Schwarze, F.W.M.R. (2008). In vitro screening of an antagonistic *Trichoderma* strain against wood decay fungi. *Arboricultural Journal*, 31(3), 227–248.
79. Schwab, E.K., & Keller, N.P. (2008). Regulation of secondary metabolite production in filamentous ascomycetes. *Mycological Research*, 112(2), 225–230.
80. Sharma, M., Nagavardhini, A., Thudi, M., Ghosh, R., Pande, S., & Varshney, R.K. (2014). Development of DArT markers and assessment of diversity in *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris*. *BMC Genomics*, 15(1), 454.

15(1), 454.

81. Sharma, V., Salwan, R., & Sharma, P.N. (2017). Comparative mechanistic aspects of *Trichoderma* and probiotics. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 100, 84–96.

82. Singh, A., Jain, A., Sarma, B.K., Upadhyay, R.S., & Singh, H.B. (2013). Rhizosphere microbes facilitate redox homeostasis in *Cicer arietinum* against biotic stress. *Annals of Applied Biology*, 163(1), 33–46.

83. Singh, A., Sarma, B.K., Upadhyay, R.S., & Singh, H.B. (2013). Compatible rhizosphere microbes mediated alleviation of biotic stress in chickpea. *Microbiological Research*, 168(1), 33–40.

84. Sood, M., Kapoor, D., Kumar, V., Sheteiwiy, M.S., Ramakrishnan, M., Landi, M., Araniti, F., & Sharma, A. (2020). *Trichoderma*: The "Secrets" of a multitalented biocontrol agent. *Plants*, 9(6), 762.

85. Stockwell, V.O., Johnson, K.B., Sugar, D., & Loper, J.E. (2011). Mechanistically compatible mixtures of bacterial antagonists improve biological control of fire blight. *Phytopathology*, 101(1), 113–123.

86. Toghueo, R.M.K., Eke, P., Zabalgoceazcoa, I., de Aldana, B.R.V., Nana, L.W., & Boyom, F.F. (2016). Biocontrol and growth enhancement potential of endophytic *Trichoderma* spp. against bean root rot. *Biological Control*, 96, 8–20.

87. Trapero-Casas, A., & Jiménez-Díaz, R.M. (1985). Fungal wilt and root rot diseases of chickpea in southern Spain. *Phytopathology*, 75(10), 1146–1151.

88. Trivedi, S., Neetu, T., & Chaudhary, R.G. (2013). Efficacy of *Trichoderma* strains against *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris*. *Journal of Mycology and Plant Pathology*, 43(1), 72–76.

89. Verma, M., Brar, S.K., Tyagi, R.D., Surampalli, R.Y., & Valero, J.R. (2007). Antagonistic fungi, *Trichoderma* spp.: Panoply of biological control. *Biochemical Engineering Journal*, 37(1), 1–20.

90. Vinale, F., Ghisalberti, E.L., Sivasithamparam, K., Marra, R., Ritieni, A., Ferracane, R., & Lorito, M. (2009). Factors affecting the production of

Trichoderma harzianum secondary metabolites. *Letters in Applied Microbiology*, 48(6), 705–711.

91. Vinale, F., Nigro, M., Sivasithamparam, K., Flematti, G., Ghisalberti, E.L., Ruocco, M., & Lorito, M. (2013). Harzianic acid: A novel siderophore from **Trichoderma harzianum**. *FEMS Microbiology Letters*, 347(2), 123–129.

92. Vinale, F., Sivasithamparam, K., Ghisalberti, E.L., Marra, R., Barbetti, M.J., Li, H., Woo, S.L., & Lorito, M. (2008). A novel role for **Trichoderma** secondary metabolites in plant interactions. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 72(1-3), 80–86.

93. Whipps, J.M. (1997). Ecological considerations in commercial development of biological control agents. In **Modern soil microbiology** (pp. 525–546). Marcel Dekker.

94. Whipps, J.M., & Lumsden, R.D. (2001). Commercial use of fungi as plant disease biological control agents. In **Fungal biocontrol agents: Progress, problems and potential** (pp. 9–22). CABI Publishing.

95. Xiong, H., Xue, K., Qin, W., Chen, X., Wang, H.F., Shi, X.H., Ma, T., Sun, Z.H., Chen, W.G., Tian, X.Q., et al. (2018). Effects of **Trichoderma** conidial formulations on subterranean termites. *Journal of Economic Entomology*, 111(2), 808–816.

96. You, J., Zhang, J., Wu, M., Yang, L., Chen, W., & Li, G. (2016). Multiple criteria-based screening of **Trichoderma** isolates for biological control of **Botrytis cinerea** on tomato. *Biological Control*, 101, 31–38.

97. Zeilinger, S., Gruber, S., Bansal, R., & Mukherjee, P.K. (2016). Secondary metabolism in **Trichoderma** – Chemistry meets genomics. *Fungal Biology Reviews*, 30(2), 74–90.

98. Zhang, F., Chen, C., Zhang, F., Gao, L., Liu, G., Chen, L., Fan, X., Liu, C., Zhang, K., He, Y., Chen, C., & Ji, X. (2017). **Trichoderma harzianum** containing ACC deaminase and chitinase improves growth and diminishes adverse effect caused by **Fusarium oxysporum** in soybean. *Journal of Plant Physiology*, 210, 84–94.

99. Zhang, F., Ge, H., Zhang, F., Guo, N., Wang, Y., Chen, L., Ji, X., & Li, C. (2016). Biocontrol potential of *Trichoderma harzianum* isolate T-101 against *Sclerotinia sclerotiorum* in soybean. *Plant Physiology and Biochemistry*, 100, 64–74.
100. Zhu, J., Lee, B., Dellinger, M., Cui, X., Zhang, C., Wu, S., Nothnagel, E.A., & Zhu, J.-K. (2010). Role of cellulose synthase-like protein in osmotic stress tolerance. *The Plant Journal*, 63(1), 128–140.
101. Harman, G. E., Howell, C. R., Viterbo, A., Chet, I., & Lorito, M. Opportunistic, avirulent plant symbionts. — *Trichoderma* species. (2004). *Nature Reviews Microbiology*, 2(1), 43–56.
102. Lorito, M., Woo, S. L., Harman, G. E., & Monte, E. (2010). Transgenic expression of *Trichoderma* genes in crop plants to enhance disease resistance. *Biocontrol Science and Technology*, 20(1), 1–12.
103. Vinale, F., Sivasithamparan, K., Ghisalberti, E.L., Marra, R., Woo, S. L., & Lorito, M. (2008). *Trichoderma* spp. as biocontrol agents of plant pathogens. *Plant Physiology and Biochemistry*, 40(1), 1–10.
104. Benítez, T., Rincón, A. M., Limón, M. C., & Codón, A. C. (2004). Biocontrol mechanisms of *Trichoderma* strains. *International Journal of Microbiology*, 7(4), 249–260.