

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE EL HARRACH
Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Magister en sciences Agronomiques
– Département : Botanique
Spécialité : protection des végétaux
Option : Biologie et génétique de l'interaction plante hôte/pathogène en protection des cultures

Complexe fongique pourriture racinaire et fusariose de l'épi

étude pathologique et lutte biologique avec *Trichoderma atroviride* P. Karsten

M NEKACHE-ABDALLAH Nora

25/04/2013

Promotrice : Melle. BOUREGHDA H. Maitre de conférences à l'ENSA, El Harrach, Alger. Membres de jury Président : Mr. BOUZNAD Z. Professeur à l'ENSA, El Harrach, Alger. Examineurs : Mme. LOUANCHI M. Maitre de conférences à l'ENSA, El Harrach, Alger. Mr. KEDAD A. Chargé de cours à l'ENSA, El Harrach, Alger. Mr. GUEZLANE A. Maitre de conférences à l'ENSA, El Harrach, Alger

Table des matières

Dédicace . . .	5
Remerciements . . .	6
Liste des abréviations . . .	7
Résumé . . .	8
Abstract . . .	9
ص غ ل م ل ا . . .	10
INTRODUCTION GENERALE . . .	11
1-DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES . . .	15
I.1. Données sur la culture du blé . . .	15
I.1.1. Historique . . .	15
I.1.2. Botanique . . .	15
I.1.3. Culture . . .	15
I.1.4. Production . . .	17
I.1.5. Les principales contraintes de la culture du blé en Algérie . . .	18
I.2. Données sur la fusariose du blé . . .	20
I.2.1. Incidence économique . . .	20
I.2.2. Agents responsables . . .	20
I.2.3. Les symptômes de la pourriture racinaire et de la fusariose de l'épi . . .	22
I.2.4. Propagation et évolution des fusarioses . . .	23
I.2.5. La nuisibilité . . .	25
I.2.6. Les moyens de lutte . . .	26
I.3. Utilisation de <i>Trichoderma</i> dans la lutte biologique . . .	27
I.3.1. Historique . . .	27
I.3.2. Description . . .	27
I.3.3. Taxonomie . . .	27
I.3.4. Ecologie . . .	28
I.3.5. Mécanismes d'action . . .	29
II.MATERIEL ET METHODES . . .	33
II.1. Matériel . . .	33
II.1.1. Matériel végétal . . .	33
II.1.2. Matériel fongique . . .	33
II.2. Méthodes . . .	33
II.2.1. Isolement et identification morphologique des isolats fongiques associés à la fusariose de l'épi et la pourriture racinaire du blé . . .	33
II.2.2. Etude de l'effet de la température sur le taux de croissance mycélienne des isolats de <i>Fusarium</i> spp. et de <i>M. nivale</i> . . .	35
II.2.3. Etude pathologique des isolats de <i>Fusarium</i> spp. et de <i>M. nivale</i> . . .	35
II.2.4. Etude <i>in vitro</i> de l'activité antagoniste de <i>Trichoderma</i> spp. vis-à-vis des isolats de <i>Fusarium</i> spp. et de <i>M. nivale</i> . . .	43
III. RESULTATS ET DISCUSSION . . .	46
III.1. Identification des isolats et étude de l'effet de la température sur leur croissance mycélienne. . .	46

III.1.1. Description et identification morphologique des isolats . .	46
III.1.2. Effet de la température sur la croissance mycélienne des isolats de <i>Fusarium</i> spp. et de <i>M. nivale</i> . .	53
Discussion . .	56
III.2. Etude pathologique des isolats de <i>Fusarium</i> spp. et de <i>M. nivale</i> . .	58
III.2.1. Effet des isolats de <i>Fusarium</i> spp. et de <i>M. nivale</i> sur la croissance du coléoptile <i>in vitro</i> . .	58
III.2.2. Etude de l'agressivité des isolats de <i>Fusarium</i> spp. et de <i>Microdochium nivale</i> sur le collet . .	63
III.2.3. Etude de l'agressivité des isolats de <i>Fusarium</i> spp. et de <i>Microdochium nivale</i> sur les épis . .	68
Discussion . .	80
III.3. Effet des isolats de <i>Trichoderma</i> spp. sur la croissance des isolats de <i>Fusarium</i> spp. et de <i>M. nivale</i> . . .	84
III.3.1. Identification de l'isolat de <i>Trichoderma</i> . .	84
III.3.2. Confrontation entre les agents antagonistes et les agents pathogènes . .	84
Discussion . .	92
CONCLUSION GENERALE . .	95
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES . .	98
ANNEXES . .	109
Annexe 1 : Composition des milieux utilisés . .	109
Annexe 2 : Analyses statistiques pour la croissance mycélienne des isolats dans différentes températures. . .	109
Annexe 3 : Analyses statistiques pour l'effet des isolats sur la croissance du coléoptile <i>in vitro</i> . .	111
Annexe 4 : analyses statistiques pour l'effet des isolats sur l'expression de la maladie sur collet . .	115
Annexe 5 : analyses statistiques pour l'effet des isolats sur l'expression de la maladie sur épi . .	117
Annexe 6 : Analyses statistiques pour le poids de mille grains (PMG) . .	119
Annexe 7 : Corrélations entre la croissance mycélienne des isolats et leur effet sur la croissance du coléoptile <i>in vitro</i> , dans différentes températures (15, 20, 25 et 30°C). . .	120
Annexe 8 : Corrélations entre le pourcentage de retard de la croissance de coléoptile <i>in vitro</i> , l'indice de maladie sur collet et l'indice de maladie sur les épis . .	122
Annexe 9: Corrélations entre l'agressivité sur l'épi et le pourcentage de réduction du poids de mille graines par rapport au témoin non inoculé . .	123
Annexe 10: analyses statistiques pour la confrontation directe. . .	123
Annexe 11: analyses statistiques de la confrontation à distance . .	124

Dédicace

A mon très cher père que je ne pourrai jamais oublier et à mon cher frère Mohamed « que DIEU les accueille dans son vaste paradis » A ma chère mère qui a tant sacrifié pour nous, que DIEU la garde et la protège A mon mari Mourad, avec qui je partage ma vie, ses joies et ses peines et qui a été toujours à mes cotés pour la réalisation de ce travail A mon frère Rabah, qui m'a toujours soutenu, encouragé et aidé dans ma vie et dans mes études A mes frères Ali et Amar et mes sœurs Ouardia et Fathma A mes belles sœurs, mes nièces et mes neveux A ma belle famille A mon beau père et ma belle mère, que DIEU les accorde santé et longue vie A ma grande famille, mes cousins et mes cousine A mon amie Samia, qui a été toujours à mes cotés dans toutes les circonstances A toutes mes amies A tout mes collègues de la promotion A tout mes enseignants A tous ceux que je n'ai pas cités Je dédie ce modeste travail

Remerciements

Avant tout, je remercie DIEU de m'avoir donné la force, la patience et le courage pour accomplir ce travail.

Au terme de cette étude, je tiens à exprimer mes sincères remerciements à ma promotrice Melle. BOUREGHDA H. pour avoir accepté de m'encadrer pour la deuxième fois, pour sa patience, sa disponibilité et ces conseils judicieux m'ayant permis d'améliorer mon travail ; qu'elle trouve ici l'expression de mon profond respect et reconnaissance.

J'exprime mon grand respect et mes remerciements à :

- Mr. BOUZNAD Z. pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury.
- Mme. LOUANCHI M. pour m'avoir fait l'honneur d'examiner mon travail.
- Mr. KEDAD A. pour m'avoir fait l'honneur d'examiner mon travail.
- Mr. GHEZLANE A. pour m'avoir fait l'honneur d'examiner mon travail.

J'exprime mes grands remerciements aussi à :

- Tout le personnel du département de Botanique.
- Tous ceux qui ont contribué à ma formation.
- Tous mes enseignants.
- Mon mari et mes neveux qui m'ont aidé dans la réalisation de l'essai en plein champs.
- Toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Liste des abréviations

- **CLA**: Carnation Leaf agar
- **EF** : Facteur d'Elongation de la traduction des protéines
- **ENSA**: Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie
- **F**: *Fusarium*
- **FC**: *Fusarium culmorum*
- **FG**: *Fusarium graminearum*
- **FP**: *Fusarium poae*
- **FS**: *Fusarium solani*
- **FT**: *Fusarium torulosum*
- **FV**: *Fusarium verticillioides*
- **ITGC**: Institut Technique des Grandes Cultures
- **ITS**: Espaceurs Internes Transcrits (Internal Transcribed Spacer)
- **LSD**: Least Significant Difference
- **M**: *Microdochium*
- **MADR**: Ministère d'Agriculture et du Développement Durable
- **MN**: *Microdochium nivale*
- **NIV** : nivalénol
- **OMS** : Organisation Mondiale de la Santé
- **PCR** : Polymerase Chain Reaction
- **PDA**: Potato Dextrose Agar
- **PDB**: Potato Dextrose Broth
- **PMG**: Poids de Mille Grains
- **rpm**: rotation par minute
- **SAU** : Surface Agricole Utile
- **SNA** : Spezieller Nährstoffarmer Agar
- **T** : *Trichoderma*
- **Ta13** : *Trichoderma atroviride* 13
- **Tn3** : *Trichoderma atroviride*3
- **ZEA**: Zéaralénone
- **α pp**: α pentyl-pérone

Résumé

Les fusarioses sont parmi les maladies les plus importantes qui attaquent le blé, elles causent des fontes de semis, des pourritures racinaires ou du collet et la fusariose de l'épi (Fusarium head blight). Elles sont causées par plusieurs espèces du genre *Fusarium* et l'espèce *Microdochium nivale*. En plus de la perte du rendement, les qualités sanitaire et technologique des grains sont fortement dépréciées.

Les isollements effectués ont abouti à une collection de 26 isolats. L'identification morphologique a permis de différencier sept espèces : *F. culmorum*, *F. graminearum*, *F. solani*, *F. verticillioides*, *F. torulosum*, *F. poae* et *M. nivale*. L'étude de l'effet de la température a montré que l'optimum de croissance est de 25°C pour *F. culmorum* et *F. graminearum* et de 20°C pour *F. poae* et *M. nivale*, tandis que les isolats des espèces *F. solani*, *F. verticillioides* et *F. torulosum* ont une croissance plus élevée à 30°C. L'étude de l'effet des isolats sur la croissance du coléoptile *in vitro* montre que l'espèce la plus agressive est *F. graminearum*, alors que l'espèce la moins agressive est *F. solani*. La deuxième technique réalisée par l'inoculation du sol a montré que *F. graminearum* est l'espèce la plus agressive, suivie de *F. culmorum*, tandis que les autres espèces ont une agressivité très réduite. La troisième technique est l'inoculation sur les épis, l'espèce la plus agressive est *F. culmorum*. Des corrélations sont calculées pour ces trois techniques ainsi que pour l'effet de la température et la technique *in vitro*. Les deux isolats de *T. atroviride* ont inhibé efficacement la croissance mycélienne des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale in vitro*, à des degrés variables et par le biais de différents mécanismes. L'isolat Ta13 est plus efficace dans le cas de la confrontation directe, tandis que l'isolat Tn3 est plus efficace dans le cas de la confrontation à distance.

Ces résultats montrent que les espèces impliquées dans la fusariose du blé ont des degrés d'agressivité variables selon les isolats, les espèces et les organes attaqués. Il s'est avéré aussi que les deux isolats de *T. atroviride* sont efficaces contre les agents de la fusariose du blé *in vitro*.

Mots clés : blé, pourriture racinaire, fusariose de l'épi, *Fusarium*, *Microdochium nivale*, pathogénicité, lutte biologique, *Trichoderma atroviride*.

Abstract

The wheat can be attacked by several species of the genus *Fusarium* and the species *Microdochium nivale*. These pathogens can cause damping-off, crown rot and *Fusarium* head blight. These diseases cause yield losses and alter technological and sanitary qualities of grains.

A collection of 26 isolates was obtained from the isolation. The morphological identification permitted to differentiate seven species: *F. culmorum*, *F. graminearum*, *F. solani*, *F. verticillioides*, *F. torulosum*, *F. poae* and *M. nivale*. The study of the effect of temperature on the growth of these isolates showed that the optimum temperature for the growth of *F. culmorum* and *F. graminearum* was 25°C and of 20°C for *F. poae* and *M. nivale*, while *F. solani*, *F. verticillioides* and *F. torulosum* had a high growth rate at 30°C. The first pathogenicity test was carried out by examining the effect of these isolates on the *in vitro* coleoptiles growth rate of wheat seedlings. Thus, the most aggressive species was *F. graminearum*, while the least aggressive was *F. solani*. The second technique realized by inoculation of the soil showed that *F. graminearum* is the most aggressive, while the other species had a very low aggressiveness. The third technique carried out by inoculation of wheat heads showed that *F. culmorum* was the most aggressive. Correlations were calculated between these three techniques, and between the first technique and the growth rate of the isolates. The two isolates of *T. atroviride* have efficiently inhibited mycelial growth of the isolates of *Fusarium* spp. and *M. nivale in vitro*, at variable degrees and by different mechanisms. The isolate Ta13 is the most effective in direct confrontation, while Tn3 was the most effective in the indirect confrontation.

These results showed that the species involved in the crown rot and *Fusarium* head blight of wheat had variable degrees of aggressiveness according to isolates, species and the infected organ. It is proved that the two isolates of *T. atroviride* are effective against these pathogens *in vitro*.

Key words: wheat, crown rot, *Fusarium* head blight, *Fusarium* spp., *Microdochium nivale*, pathogenicity, biocontrol, *Trichoderma atroviride*.

صنخ ملأ

يعتبر مرض تعفن الجذور و جرب السنايل المتسببان عن الجنس فوزاريوم و النوع ميكروودوتسيوم نفال من أخطر أمراض القمح، إذ يسبب في خسائر كبيرة من ناحية الإنتاج و النوعية لصحية و التكنولوجيا للبيدور. من خلال عملية العزل، تم الحصول على 26 عزلة، التعريف المورفولوجي لهذه العزل سمح بتقسيمها إلى سبعة أنواع وهي: *F. culmorum*, *F. graminearum*, *F. solani*, *F. verticillioides*, *F. poae*, *M. nivale*, *F. torulosum*, *F. M.* الحرارة الملائمة لنمو *F. culmorum* و *F. graminearum* هي 25 م° و 20 م° بالنسبة ل *F. poae* و *M. nivale*، أما *F. solani* و *F. verticillioides* و *F. torulosum* فإنها تنمو بشكل أحسن في 30 م° إن دراسة تأثير هذه العزل على نمو الغمد الأولي بين أن النوع الأكثر ضراوة هو *F. graminearum*، بينما النوع الأقل ضراوة هو *F. solani*. التغذية الثانية تتمثل في الإعداء الإصطناعي للتربة، النتائج المحصل عليها أظهرت أن النوع الأكثر ضراوة هو *F. graminearum* يليه *F. culmorum*، في حين أن الأنواع الأخرى أظهرت ضراوة متدنية جدا. التغذية الثالثة هي الإعداء الإصطناعي للسنايل، النوع الأكثر ضراوة هو *F. culmorum* بالإضافة، قمنا بحساب العلاقات بين هذه التقنيات الثلاثة، و بين تجربة درجات الحرارة و التقنية الأولى. إن كل من عزلتي *T. atroviride* منعت بفعالية نمو عزل فوزاريوم و ميكروودوتسيوم نفال، بدرجات متفاوتة وباستعمال عدة وسائل. إذ أن العزلة Ta13 هي الأكثر فاعلية في حالة المواجهة المباشرة، في حين أن العزلة Tn3 هي الأكثر فعالية في حالة المواجهة عن بعد.

أظهرت هذه النتائج أن الأنواع المتدخلّة في مرضي تعفن الجذور و جرب السنايل في القمح لها درجات متفاوتة من الضراوة وذلك حسب العزل و الأنواع و العضو النباتي المصاب. أظهرت النتائج أيضا أن عزلتي *T. atroviride* فعالتان ضد مسببات هذا المرض في المخبر.

كلمات المفتاح: القمح، تعفن الجذور، جرب السنايل، فوزاريوم، ميكروودوتسيوم نفال، الضراوة، المكافحة الحيوية، *Trichoderma atroviride*.

INTRODUCTION GENERALE

« En Algérie, les produits céréaliers occupent une place stratégique dans le système alimentaire et dans l'économie nationale. La production des céréales, jachère comprise, occupe environ 80% de la superficie agricole utile (SAU) du pays. La superficie emblavée annuellement en céréales se situe entre 3 et 3,5 million d'ha. Les superficies annuellement récoltées représentent 63% des emblavures. Elle apparaît donc comme une spéculation dominante » (Djermoum, 2009).

« En effet, les céréales et leurs dérivés constituent l'épine dorsale du système alimentaire algérien. Elles fournissent plus de 60% de l'apport calorifique et 75 à 80% de l'apport protéique de la ration alimentaire » (Djermoum, 2009). « La consommation des produits céréaliers se situe à un niveau d'environ 205 kg /hab/an » (Chehat, 2007). Habituellement, le citoyen bénéficie dans sa ration alimentaire journalière de 2 800 calories, comparativement à la ration des pays développés dépassant les 3 500 calories. Ces calories sont fournies à 60% par cette denrée énergétique, qui enrichie aussi la valeur nutritive en apports protéiques de 75% ; tandis que les calories d'origine animales apportent 18% seulement. Ces raisons confèrent aux céréales le statut de cultures stratégiques en Algérie (Smadhi et al., 2009).

Parmi toutes les céréales, le blé est le plus cultivé et le plus consommé en Algérie et à travers le monde. Il représente avec le riz et le maïs 85,4 % de la production céréalière mondiale. Il existe plusieurs espèces de blé, dont deux ont une grande importance économique, le blé dur *Triticum turgidum* subsp. *durum* (Desf.) Husn. est très riche en gluten, et utilisé pour produire les semoules et les pâtes alimentaires. Le blé tendre (*Triticum aestivum* subsp. *aestivum*) est cultivé pour produire la farine utilisée pour la fabrication du pain (Gustafson et al., 2009).

Vue la place très importante qu'occupe le blé dans le régime alimentaire des algériens, l'état déploie beaucoup d'efforts pour améliorer cette culture. Cependant, la production nationale reste encore faible et elle ne couvre que 20 à 25 % des besoins d'une population sans cesse croissante, le reste étant importé (Kellou, 2008).

Selon Hamadache et al. (2002), la cause principale de la faiblesse de la production est le faible niveau de productivité (rendement) obtenu. Cette faible productivité est elle-même due à des contraintes abiotiques (sécheresse surtout), humaines (itinéraires techniques appliqués, vulgarisation, etc...) et des facteurs biotiques (adventices, ravageurs et maladies).

Plusieurs maladies peuvent attaquer le blé. Les fusarioses sont les maladies les plus compliquées. Elles attaquent tous les organes de la plante, depuis les racines jusqu'aux épis. En plus, plusieurs agents pathogènes se concurrencent pour parvenir à cette situation (Caron, 1993). Ces agents appartiennent principalement à deux genres *Fusarium* et *Microdochium*. Ces derniers peuvent causer des fontes de semis, des pourritures racinaires ou du collet et la fusariose de l'épi (*Fusarium head blight*).

L'importance économique de la fusariose est attribuée aux pertes de rendements considérables (avortement des fleurs, diminution du nombre et du poids des grains) et à l'altération de la qualité des grains par les mycotoxines (Lori et al., 2009). Or, la qualité

sanitaire des grains récoltés dépend étroitement de la présence de ces champignons et de leurs mycotoxines. Ces contaminants biologiques constituent actuellement un problème majeur de sécurité sanitaire des aliments et l'OMS estime que 25 à 50% des produits céréaliers en sont contaminés (Kammoun-Gargouri, 2010).

Différentes fusariotoxines peuvent être produites sur les grains issus d'épis contaminés. Il s'agit essentiellement des trichothécènes, zéaralénone et fumonisine. Les trichothécènes sont constitués de deoxynivalenol (DON) et nivalenol (NIV) dont la toxicité n'est pas identique. Les NIV sont considérés comme plus toxiques à l'homme et aux animaux alors que les DON peuvent être en plus phytotoxiques (Bottalico, 1998). Au champ, de nombreux facteurs sont susceptibles d'influencer les niveaux de contamination des grains en fusariotoxines, notamment les facteurs climatiques, les pratiques culturales, le potentiel toxigène des souches, l'abondance et la dispersion de l'inoculum et la sensibilité variétale (Kammoun-Gargouri, 2010).

Afin de lutter contre cette maladie, différents moyens ont été envisagés sans toutefois avoir le succès escompté. Les interventions chimiques ont pris une grande importance dans le contrôle de ces maladies. Mais, malgré les améliorations apportées aux différents produits chimiques, à leurs formulations et aux méthodes d'application, les problèmes inhérents à l'utilisation des pesticides n'ont pas diminué. La majorité des problèmes sont dus aux faits que les pesticides et leurs dérivés sont persistants et ont des effets cumulatifs, que leur effet n'est pas sélectif, que la fréquence de mauvaise utilisation est extrêmement élevée, en plus du phénomène de la résistance.

Considérant les problèmes écologiques, économiques, biologiques et autres, qui sont causés par notre dépendance quasi-totale aux pesticides, il semble clair que la lutte contre les organismes pathogènes nécessitera d'autres méthodes afin de protéger les cultures et la qualité de l'environnement. Il semble évident qu'un changement d'approche s'impose. L'approche adoptée actuellement est celle de la lutte intégrée, qui se définit comme étant la prise en considération de toutes les méthodes de protection des plantes disponibles et, par conséquent, l'intégration des mesures de contrôles qui découragent le développement des populations d'organismes nuisibles et qui maintiennent le recours aux produits phytopharmaceutiques et à d'autres types d'interventions à des niveaux justifiés des points de vue économiques et environnementales.

Il serait important donc d'examiner des méthodes de lutte qui peuvent être utilisées dans une stratégie de lutte intégrée. Ce sont des méthodes qui font appel à des êtres vivants pour réduire ou supprimer les dégâts causés par des espèces nuisibles. Elles se basent sur l'utilisation des antagonistes naturels et les exploitent par des manipulations choisies qui favorisent les antagonistes et diminuent les pathogènes. Ce sont les méthodes de lutte biologique.

Plusieurs microorganismes sont utilisés contre les agents de la fusariose du blé, les genres *Bacillus*, *Lysobacter* et *Pseudomonas* sont les agents bactériens les plus étudiés (Yuen et al., 2007). Des levures des genres *Rhodotorula*, *Sporobolomyces* et *Cryptococcus* et des champignons du genre *Trichoderma* peuvent réduire l'inoculum de nombreuses espèces de *Fusarium* (Palazzini et al., 2007 ; Matarese et al. 2012). Les champignons du genre *Trichoderma* ont été utilisés comme agents de lutte biologique contre un large spectre d'agents phytopathogènes aussi bien telluriques que foliaires.

L'étude de la pathogénie et de l'agressivité des isolats impliqués dans la fusariose du blé aide à mieux comprendre l'épidémiologie du complexe fongique associé à cette maladie afin d'entreprendre des stratégies de lutte appropriées. Plusieurs études ont été conduites

sur la pathogénie et l'agressivité des espèces de *Fusarium* sur blé par Brennan et al. (2003), Mishra et al. (2003), Smily et al. (2005), Wu et al. (2005), Akinsanmi et al. (2006), Qu et al., (2008),...etc. Plusieurs autres études ont mis en évidence l'efficacité des isolats de *Trichoderma* à l'égard des agents de la fusariose du blé (Matarese et al. 2012)

Des travaux antérieurs réalisés au sein du laboratoire de mycologie du département de botanique (Sidhoumi, 2001 ; Bouabcha, 2002 ; Hamel, 2003 ; Mahmoudi, 2004 ; Renane, 2008, Bouroubi et Djermoum, 2009 ; Abdallah, 2010 ; Djelailia, 2011, Dane, 2012 a, b et Djelailia, 2012) ont étudié l'agressivité des isolats de *Fusarium* et de *Microdochium nivale*(Fr.) Samuels et Hallett agents causaux de la fusariose du blé. Ils ont également réalisé dans leurs travaux des essais de lutte biologique contre ces agents pathogènes en utilisant des isolats de *Trichoderma* spp., des bactéries ou des biofongicides.

En effet des isolats de *Trichoderma* appartenant aux trois espèces (*T. atroviride*, *T. harzianum* et *T. longibrachiatum*) testés se sont montrés efficaces *in vitro* et *in vivo*. Parmi les trois espèces testées, l'isolat Ta.13 de l'espèce *T. atroviride* s'est montré le plus efficace. Un pourcentage de réduction de l'indice de maladie de 70,44% contre *F. culmorum* avait été obtenu par Dane (2012). Renane (2008), avait obtenu un pourcentage de réduction de l'indice de maladie de 65,12% contre *F. avenaceum*.

La souche SGK2 de la bactérie *Paenibacillus polymyxa* a induit des taux de réduction de l'indice de maladie de 85,46% chez *F. graminearum*, 82, 83% chez *F. culmorum* 84,40% chez *F. verticilliodes* et 76,92% chez *M. nivale* (Bouroubi et Djeghmoum, 2009).

Deux biofongicides ont été testés contre les agents de la fusariose du blé par traitement de la semence. Le Fongibater a induit des taux de réduction de 61,66% chez *F. culmorum* et 79,66% chez *F. lateritium* (Djellialia, 2011). Dane (2012) avait utilisé le Bioten contre *F. culmorum* et un taux de réduction de la maladie de 56,84 % avait été obtenu.

La fusariose du blé est une maladie causée par un complexe fongique constitué de différentes espèces, en plus elle présente différents types de symptômes (pourriture racinaire et du collet et la fusariose de l'épi « gale de l'épi »). Les deux types de symptômes ont été rapportés en Algérie dans les travaux antérieurs séparément ou associés sur les mêmes plants selon les conditions climatiques.

Ce présent travail a pour but de faire une étude pathologique plus complète, en évaluant l'agressivité des isolats obtenus à partir de différents organes attaqués des plants du blé (l'épi, le collet et les racines) par différentes techniques. En plus de l'étude pathologique, une partie est consacrée à la lutte biologique contre les espèces pathogènes isolées en utilisant deux isolats de *Trichoderma atroviride* P. Karstendont l'un (Ta.13) a déjà été utilisé dans les travaux précédents et l'autre est isolé lors de cette présente étude. Pour cela, trois objectifs ont été tracés :

Objectif 1 :

- Isolement des agents fongiques à partir des plants de blé présentant les symptômes typiques de la fusariose de l'épi ou de la pourriture racinaire et leur identification.
- Etude de l'effet de la température sur la croissance mycélienne des isolats obtenus afin d'évaluer leur taux ainsi que leur optimum de croissance.

Objectif 2 :

Etude pathologique des isolats obtenus. Pour cela, trois techniques sont utilisées dont deux sont réalisées *in vivo* et une technique est réalisée *in vitro* .

- *In vitro* : évaluation de l'effet de ces isolats sur la croissance du coléoptile des grains de blé.
- *In vivo* : évaluation de la pathogénicité de ces isolats par inoculation sur épi.

Objectif 3 :

- Evaluation de l'efficacité *in vitro* de deux isolats de *Trichoderma atroviride* dont l'un est l'isolat Ta13 qui s'est avéré le plus efficace parmi une collection de *Trichoderma* testée dans plusieurs travaux antérieurs à l'égard des agents de la fusariose du blé, tandis que l'autre isolat est obtenu au cours de cette étude. Cette évaluation est réalisée selon deux techniques :
- Confrontation directe de l'agent antagoniste et de l'agent pathogène dans la même boîte de Pétri. Cette technique est réalisée pour mettre en évidence les mécanismes déployés par l'agent antagoniste tels que l'inhibition de la croissance, la production de substances antifongiques non volatiles, le mycoparasitisme, la lyse.
- Confrontation indirecte (confrontation à distance) de l'agent antagoniste et de l'agent pathogène. Cette technique est réalisée d'une part pour la mise en évidence des substances antifongiques volatiles chez l'agent antagoniste et d'autre part pour l'étude de l'efficacité de ces substances à l'égard des agents de la fusariose du blé.

1-DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES

I.1. Données sur la culture du blé

I.1.1. Historique

Les céréales sont des espèces généralement cultivées pour leur grain, dont l'albumen amylicé, réduit en farine, est consommable par l'homme ou par les animaux domestiques.

La culture des céréales est très ancienne, des restes de blé, de seigle, d'avoine, d'orge à 6 rangs datant du Néolithique. Le riz, le millet, le sorgho, le blé étaient cultivés 2 700 ans avant notre ère en Chine. Les Égyptiens de l'ancienne Égypte connaissaient le blé et le sorgho. Les céréales ont d'autre part joué un rôle capital dans le développement de l'humanité. La plupart des civilisations se sont développées autour d'une céréale : les civilisations asiatiques, autour de la culture du riz; les civilisations précolombiennes autour du maïs et les civilisations babyloniennes et égyptiennes autour du blé (Moule, 1971).

I.1.2. Botanique

Parmi toutes les céréales, le blé est le plus cultivé et le plus consommé à travers le monde. Le blé appartient à la famille des *Poaceae* (*Gramineae*), sous-famille des *Pooideae*, genre *Triticum* (Moule, 1971). Il existe plusieurs espèces de blé, dont deux ont une grande importance économique, le blé dur *Triticum turgidum* subsp. *durum* (Desf.) Husn. est très riche en gluten, et utilisé pour produire les semoules et les pâtes alimentaires. Le blé tendre (*Triticum aestivum* subsp. *aestivum*) est cultivé pour produire la farine utilisée pour la fabrication du pain (Gustafson et al., 2009).

Le blé comme toutes les céréales dispose de deux systèmes racinaires successifs : le système racinaire primaire ou séminale, fonctionnel dès la germination et le système racinaire secondaire ou racines adventives de type fasciculé, qui apparaît au tallage et se substitue progressivement au précédent. Le blé possède une tige principale appelée le maître brin et des tiges secondaires appelées talles. La feuille se compose de 4 parties : la gaine, les stipules ou oreillettes, la ligule et le limbe. L'inflorescence est un épi constitué d'un ensemble d'unités appelées épillets. Chaque épillet est une petite grappe d'une à cinq fleurs, le nombre de fleurs fertiles par épillet varie selon les espèces ; le grain est un caryopse, ovoïde, nu, constitué des téguments du germe et de l'albumen (Boulal et al., 2007).

I.1.3. Culture

« Le blé est une plante herbacée qui se développe dans des terres argileuses. Le choix des semis à planter ainsi que la date à laquelle ils doivent être mis en terre revêtent une grande importance. Les recherches scientifiques sur le génome du blé ont permis la mise au point de variétés adaptées au besoin du marché, en fonction de leur utilisation future et leur résistances à certaines maladies.

Pour un bon développement du blé, quelques exigences sont importantes:

- La température : Elle doit être comprise entre - 6°C et +20°C, l'idéal étant un temps chaud avant la croissance et des conditions d'ensoleillement au cours des étapes ultimes.

- L'humidité : Les précipitations peuvent varier entre 300 et 1000 millimètres par an, répartis de manière à fournir beaucoup d'eau à la plante durant sa période de croissance et de fines pluies vers la fin de manière à faire gonfler les grains » (Zeitoun, 2011).

I.1.3.1.Cycle de développement du blé

Le cycle du blé se déroule en 2 grandes phases qui sont constituées de différents stades (Fig.1) :

- Période végétative

« La semence du blé est sèche ; le grain commence par s'humidifier dans la terre. Au cours de la germination, le germe contenu dans les graines développe une première partie s'ancrant dans le sol pour former les racines (coléorhize) et une autre pointant vers la surface (coléoptile). La température minimale de germination des grains se situe entre 3 et 4°C. Contrairement à d'autres plantes, les racines des céréales ne pénètrent pas profondément dans le sol, elles sont disposées horizontalement. Les premières pousses sont visibles après 10 jours du semis, c'est la « levée ». La plante commence réellement sa croissance durant les mois d'hiver pour donner de petites pousses en fin de saison. A un même niveau de la tige et à la base de la plante se constitue une touffe herbacée, cette étape est appelée « tallage » qui est suivie par la période dite de « montaison », phase pendant laquelle la plante pousse rapidement si le temps et l'humidité le permettent et au cours de laquelle elle met de nouvelles feuilles » (Zeitoun, 2011).

- Période reproductrice

« L'épi se forme, c'est « l'épiaison ». La « floraison » ne débutera que lorsque la température dépassera les 14°C. La période de « maturation » des grains qui requiert de la chaleur et du temps sec, se fera en plusieurs étapes : la maturité laiteuse (le grain contient encore 50% d'humidité et le stockage des protéines touche à sa fin), la maturité jaune (le grain a perdu en humidité et l'amidon a été constitué), et la maturité complète (la teneur en humidité atteint 20%). La période des « moissons » commence lorsque le grain est mûr et prêt à être récolté » (Zeitoun, 2011).

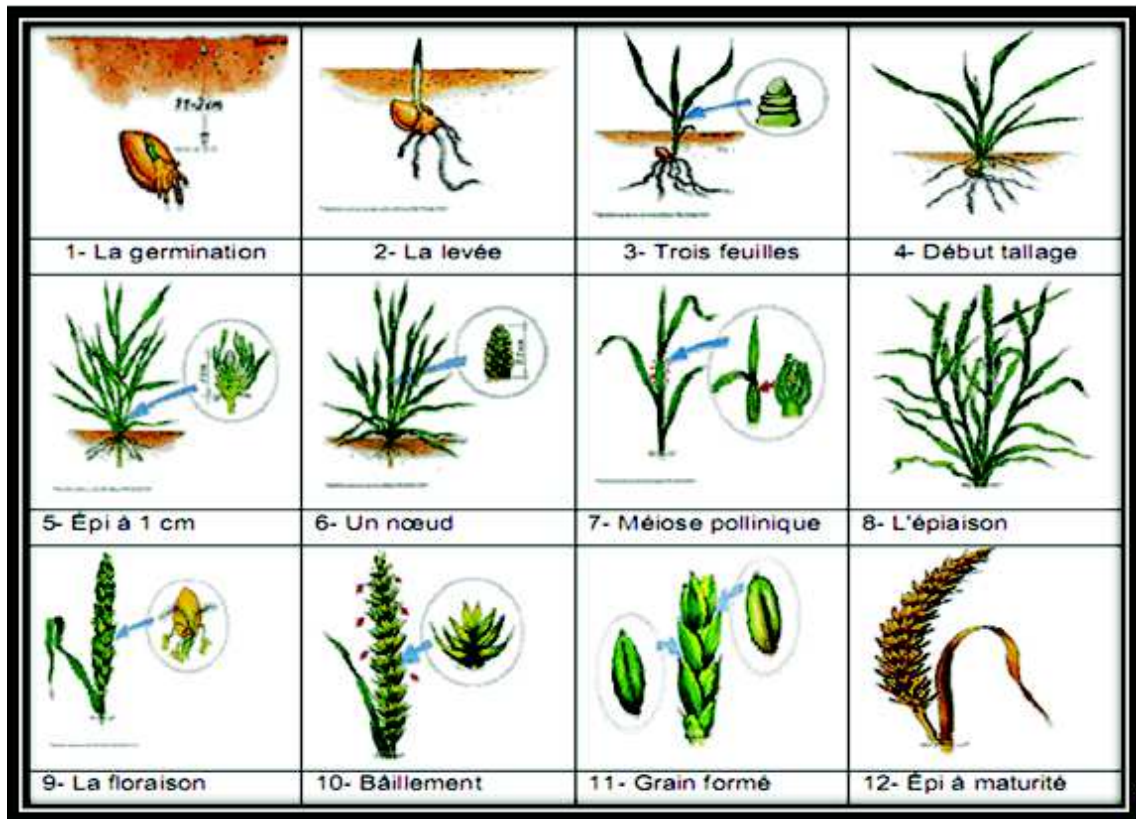


Figure 1. Les différents stades de développement du blé (Anonyme, 2011)

I.1.4.Production

« Le blé est l'une des productions agricoles les plus importantes à l'échelle mondiale avec celle du riz et du maïs. Actuellement, plus de 600 millions de tonnes de blé sont produites chaque année dans le monde, c'est-à-dire près de 100 kg par habitant pour l'ensemble de la population mondiale. A la différence, du riz et du maïs dont l'essentiel de la production est assurée dans une seule région du monde (la Chine pour le riz et les Etats-Unis pour le maïs). La culture du blé est présente dans toutes les régions de la planète, ce qui en fait un symbole d'universalité. Les principaux pays producteurs sont la Chine, l'Inde, les Etats-Unis et ceux de l'Union Européenne » (Zeitoun, 2011).

Cas de l'Algérie

Le blé est cultivé à travers l'ensemble des zones agro-écologiques de l'Algérie, mais il est essentiellement localisé dans les régions semi-arides et même arides et donc, soumis aux aléas climatiques qui pénalisent fortement les niveaux de productivité et par la même occasion la production (Boulal et al., 2007). La superficie occupée par le blé dur en 2010 avoisine 1,1 millions d'hectare et le rendement moyen est de 15,3 qx/ ha, tandis que le blé tendre occupe une superficie réduite qui avoisine 0,5 million d'hectare et le rendement moyen est de 13,9 qx/ ha (Tableau 1).

Année	Culture	Superficie (ha)	Production (qx)	Rendement (qx/ha)
2009	Blé dur	1 262 842	20 010 378	15,8
	Blé tendre	585 733	9 520 791	16,3
2010	Blé dur	1 181 774	18 089 739	15,3
	Blé tendre	573 954	7 962 041	13,9
Taux d'accroissement 2009/2010	Blé dur	-6	-10	-3
	Blé tendre	-2	-16	-15

Tableau 1. Les superficies, la production et le rendement du blé dur et du blé tendre en Algérie dans les années 2009 et 2010 (MADR, 2010).

I.1.5. Les principales contraintes de la culture du blé en Algérie

I.1.5.1. Les contraintes abiotiques

La céréaliculture en Algérie est confrontée à des aléas climatiques importants :

Insuffisance et irrégularité des précipitations durant le cycle végétatif de la culture.

- Gelées tardives et siroccos précoces affectant la culture aux stades critiques de son développement (floraison et formation du grain). Notant aussi d'autres contraintes contribuant à la baisse des rendements:
- Perturbation dans la réalisation des itinéraires techniques.
- Le bas niveau de technicité des exploitants agricoles.
- Semis mal effectués.
- Façons culturales non appropriées (Feliachi, 2000).

I.1.5.2. Les contraintes biotiques

Une estimation faite par Feliachi (2002) sur les pertes causées par les ennemis du blé que ce soit lors de la récolte ou lors du stockage est voisine de 30 %. Cette dépréciation est le résultat de l'existence de plusieurs agents tels que les champignons, les virus, les bactéries, les nématodes et les adventices.

Maladie / Organes attaqués	Nom de la maladie	Agents causaux	Transmission par semence	Sources	
Fontes de semis	Fonte de semis (<i>damping-off</i>)	<i>Stagonospora nodorum</i> (Berk.) E. Castell. & Germano,	Oui	(Aouali et Douici-Khalfi, 2009)	
		<i>Fusarium</i> spp.	Oui	(Zilinsky, 1983) (Weise, 1987)	
		<i>Microdochium nivale</i> (Fr.) Samuels & I.C. Hallett	Oui	(Simon et al., 1989)	
Le pied du blé	Piétin verse (<i>eyespot</i>)	<i>Oculimacula yalundae</i> (Wallwork & Spooner) Crous & W. Gams,	-	(Zilinsky, 1983) (Weise, 1987)	
	Piétin échaudage (<i>take-All</i>)	<i>Gasumannomyces graminis</i> (Sacc) Arx & Oliver var. <i>tritici</i> Walker	-	(Simon et al., 1989)	
	Fusariose du pied (<i>common foot rot</i>)	<i>Fusarium</i> spp. <i>Cochliobolus sativus</i> (S.Ito & Kurb.) Drechsler ex Dastur <i>Microdochium nivale</i>	Oui Oui Oui	(Aouali et Douici-Khalfi, 2009) (Smiley et al., 2009)	
les feuilles et l'épi	Rouille brune (<i>leaf rust</i>)	<i>Puccinia recondita</i> Dietel & Holw.,	Non	(Aouali et Douici-Khalfi, 2009) (Kolmer et al., 2009)	
	Rouille noire (<i>stem rust</i>)	<i>Puccinia graminis</i> subsp. <i>graminis</i> Pers.	Non		
	Rouille jaune (<i>stripe rust</i>)	<i>Puccinia striiformis</i> Westend. f. sp. <i>tritici</i> Erikss.	Non		
	Septorioses	<i>Stagonospora nodorum</i> (Berk.) E. Castell. & Germano,	Oui	(Weise, 1987) (Aouali et Douici-Khalfi, 2009)	
	Tache des glumes (<i>glume blotch</i>)	<i>Septoria tritici</i> Berk. & M.A. Curtis,	Non		
	Tache septorienne de blé (<i>septoria leaf blotch</i>)				
	Tache helmintosponienne (<i>tan spot</i>)	<i>Pyrenophora tritici-repentis</i> (Died.) Drechsler	Faible	(Weise, 1987) (Aouali et Douici-Khalfi, 2009)	
Charbon foliaire (<i>flag smut</i>)	<i>Urocystis agropyri</i> (Preuss) A.A. Fisch. Waldh.,	Oui	(Aouali et Douici-Khalfi, 2009)		
Oidium (<i>Powdery mildew</i>)	<i>Blumeria graminis</i> (DC.) Speer f. sp. <i>tritici</i> É.J. Marchal.	Néant			
Cané commune (<i>Common Bunt</i>)		<i>Tilletia caries</i> (DC.) Tul. et C. Tul.	Oui	(Weise, 1987) (Simon et al., 1989)	
		<i>Tilletia laevis</i> J.K. Kühn.	Oui		
L'épi	Charbon nu (<i>loose smut</i>)	<i>Ustilago tritici</i> (Pers.) Rostr.	Oui	(Aouali et Douici-Khalfi, 2009)	
	Gale de l'épi (<i>head blight, head scab</i>)	<i>Fusarium</i> spp. <i>Microdochium nivale</i>	Oui Oui	(Marshall, 2009)	

Tableau 2. Les principales maladies fongiques du blé en Algérie

Tableau 3. Les principaux ravageurs, adventices et maladies du blé en Algérie

Bio agresseur	Noms scientifiques	Sources
Les bactéries	<i>Rathayibacter tritici</i> (Carlson and Vidaver 1982) Zgurskaya et al. 1993 <i>Erwinia rhapontici</i> (Millard 1924) Burkholder 1948 emend. Hauben et al. 1998 <i>Xanthomonas campestris</i> pv. <i>translucens</i> (Jones et al. 1917) Dye 1978 <i>Pseudomonas viridiflava</i> <i>Pseudomonas fuscovaginae</i> (ex Taniiet et al.) Miyajima et al. 1993 <i>Pseudomonas syringae</i> pv. <i>Atrofaciens</i> (McCulloch 1920) Young et al. 1978	(Boukhris, 1992) (Djebari, 2005)
Les virus	BYDV (Barley Yellow Dwarf Virus) WSMV (Wheat Streak Mosaic Virus) WSSMV (Wheat Spindle Streak Mosaic Virus) BSMV (Barley Stripe Mosaic Virus)	(Sayoud, 1987), (Boubetra et Mohamedi, 1998) Benmokhtar et Kafi, 1999)
Les nématodes	<i>Heterodera avenae</i> Wollenweber	(Harrouche, 1998)
Les adventices	<i>Avena sterilis</i> L. (Folle avoine) <i>Phalaris paradoxa</i> L. (L'alpiste) <i>Sinapis arvensis</i> L. (Moutarde des champs) <i>Medicago polymorpha</i> L. (Luzerne)	(Hammadache, 1995 ; Tanji, 2000 et Tanji, 2002)
Les ravageurs	Les insectes (la punaise des céréales) Les oiseaux (les moineaux, la tourterelle) Les rongeurs (les rats des champs et les souris)	(Taghliit, 1986)

I.2. Données sur la fusariose du blé

I.2.1. Incidence économique

Les fusarioses sont parmi les maladies les plus dangereuses sur blé, elles font baisser le rendement par diminution de la faculté germinative des semences, du nombre de grains par épi et du poids de mille grains. La présence des diverses espèces de *Fusarium* spp. sur les grains peut réduire leurs qualités boulangères (Cahagnier, 2001; Gutzwiller et al., 2005).

Les deux maladies les plus communes provoquées par les *Fusaria* sur les céréales à paille sont la gale de l'épi (fusariose de l'épi) et la pourriture racinaire (Zillinsky, 1983). Ces deux maladies sont répandues dans tout le Maghreb. En Algérie, les dégâts n'ont jamais été évalués (Sayoud et al., 1999).

I.2.2. Agents responsables

I.2.2.1. Les principaux agents responsables de la fusariose de l'épi

Les agents les plus importants de la fusariose de l'épi du blé dans le monde sont *Fusarium graminearum* Schwabe dont le téléomorphe est *Gibberella zeae* (Schwein.) Pettch, *Fusarium culmorum* (W.G. Smith) Sacc., *Fusarium poae* (Peck) Wollenw., *Fusarium avenaceum* (Fr.) Sacc. Dont le téléomorphe est *G. avenacea* R.G. Cook et *Microdochium nivale* (Fr.) Samuels et I.C. Hallett dont le téléomorphe est *Monographella nivalis* (Schaffnit) E. Müll. var. *nivalis* (Parry et al. 1995 ; Miedaner et al. 1997 ; Tekauz et al. 2000; Simpson

et al. 2004 ; Kriel, 2006 ; Wagacha et al., 2012). *Fusarium tricinctum* (Corda) Sacc. Dont le téléomorphe est *Gibberella tricincta* El-Gholl, McRitchie, Schoult. et Ridings est connue surtout dans les régions tempérées (Leslie et Summerell 2006). *Fusarium sporotrichioides* Sherb., *Fusarium langsethiae* Torp et Nirenberg et *Fusarium sibiricum* Gagkaeva et al. sont fréquemment isolées dans les pays nordiques (Yli-Mattila et al. 2004; Yli-Mattila et al., 2010).

I.2.2.2. Les principaux agents responsables de la pourriture racinaire

Les agents responsables de cette maladie incluent l'espèce *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoemaker dont le téléomorphe est *Cochliobolus sativus* (S. Ito Et Kurib.) Drechsler ex Dastur, et plusieurs espèces de *Fusarium* spp. (Wiese, 1987 ; Gargouri, 2001). La dominance de chaque espèce fongique responsable est influencée par les conditions climatiques (Parry et al., 1995).

I.2.2.3. Taxonomie

Les formes sexuées (téléomorphes) de plusieurs espèces du genre *Fusarium* Link appartiennent au genre *Gibberella* et un certain nombre au genre *Nectria* (*Hypocreaceae*, *Hypocreales*, *Hypocreomycetidae*, *Sordariomycetes*, *Pezizomycotina*, *Ascomycota*, *Fungi*) (Keith et Seifert, 2001 ; Leslie et Summerell, 2006). Le genre *Fusarium* est classé dans les Deutéromycètes, il appartient à la famille des tuberculariacées, l'ordre des moniliales, la classe des hyphomycètes. Ce genre se rapporte aux hypocreales (*Ascomycota*)

L'espèce *Fusarium nivale* a été exclue du genre *Fusarium* et placée dans le genre *Microdochium* et renommée *Microdochium nivale*, car elle ne possède pas de phialides mais plutôt des cellules conidiogènes annellidiques (Keith et Seifert, 2001). Ce champignon est classé dans: *Xylariales*, *Xylariomycetidae*, *Sordariomycetes*, *Ascomycota*, *Fungi*.

I.2.2.4. Identification des espèces de *Fusarium* responsables de la fusariose du blé

L'identification des espèces fongiques responsables de la fusariose du blé constitue une des premières étapes pour entreprendre toute méthode de lutte contre cette maladie. Cette identification a pendant longtemps été exclusivement basée sur l'observation des caractères culturels et morphologiques des espèces.

I.2.2.4.1. Identification morphologique

L'identification morphologique permet de déterminer le genre, mais la séparation des espèces est difficile et se base sur plusieurs critères primaires et secondaires (Wagacha et Muthomi, 2007). Les caractéristiques primaires comportent la forme des macroconidies, la présence ou l'absence des microconidies et leurs formes, la formation ou non des microconidies en chaînes. Les caractéristiques secondaires se basent sur la présence ou l'absence des chlamydospores, leur configuration et leur position et la présence ou l'absence des sclérotés ou des sporodochies (Wagacha et Muthomi, 2007)

Une étude réalisée par Burgess et al. (1994) sur les espèces de *Fusarium* a montré que la morphologie de la colonie et sa couleur ne peuvent être utiles qu'en travaillant dans des conditions standards. L'identification morphologique des espèces du genre *Fusarium* nécessite la culture des isolats sur différents milieux de cultures, les plus utilisés sont les milieux PDA, CLA, et SNA (Kammoun-Gargouri, 2010).

1.2.2.4.2. Identification moléculaire

Compte tenu de la difficulté de l'identification morphologique, l'identification moléculaire est de plus en plus utilisée. Elle est généralement basée sur l'amplification, par PCR (Polymerase Chain Reaction), de régions spécifiques (Hsu *et al.*, 2003). Cette technique se caractérise par sa simplicité, sa rapidité et son extrême sensibilité avec le potentiel théorique de détecter une seule molécule cible (Edwards *et al.*, 2002). Plusieurs amorces spécifiques sont disponibles pour l'identification exacte des espèces de *Fusarium* et *Microdochium* impliquées dans la fusariose de l'épi. Ainsi une ou plusieurs couples d'amorces spécifiques ont été synthétisées pour les espèces *F. graminearum*, *F. pseudograminearum*, *F. culmorum*, *F. avenaceum*, *M. nivale*, et d'autres espèces de *Fusarium* (Kammoun-Gargouri, 2010).

Par ailleurs, des bases de données sont disponibles pour l'identification du genre *Fusarium*. Ainsi des bases de données fondées sur les séquences des gènes (beta-tubulin, calmodulin et histone H3) codant pour diverses protéines ont été utilisées (Reicher, 2004). Plus récemment, une base de données construite en se basant sur les séquences du gène du facteur d'élongation TEF1- α est de plus en plus utilisée pour l'identification des espèces de *Fusarium*. Le principe de cette technique consiste à amplifier et séquencer le gène TEF1- α , ensuite à comparer à des séquences partielles du gène TEF1- α de 463 espèces du genre *Fusarium* disponibles dans la base de données FUSARIUM-ID v.1.0 (Geiser *et al.*, 2004 ; O'Donnell *et al.*, 1998, 2000 a,b ; Kammoun-Gargouri, 2010).

1.2.3. Les symptômes de la pourriture racinaire et de la fusariose de l'épi

Les fusarioses sont des maladies qui peuvent attaquer le blé du semis à la récolte, des racines aux épis:

1.2.3.1. La maladie du pied (la pourriture racinaire)

Les racines: Les symptômes sur les racines sont peu souvent remarqués car ils ne manifestent rien de particulier sur le feuillage ou alors, très précocement des manques à la levée ou des fontes de semis. Ces symptômes racinaires se présentent sous forme de plages brunes en pourriture humide de quelques millimètres à quelques centimètres de longueur. On peut véritablement les observer qu'en lavant les racines (Caron, 1993).

Les gaines: au tallage, les gaines présentent rapidement une pourriture humide généralisée, le reste de la feuille se nécrose alors entièrement. De la montaison à la maturité, les gaines présentent ce même brunissement diffus généralisé, mais sous une forme sèche.

A partir du gonflement, sur les gaines et les feuilles desséchées de la base apparaissent des ponctuations noires violacées ; ce sont les périthèces (Caron, 1993).

Les tiges : l'initiation de la maladie sur les tiges se fait très souvent à partir des gaines atteintes qui l'entourent. A partir de ces points de contamination, la maladie s'étend le long des nervures sous forme de traits bruns verticaux ; la nécrose se généralise ensuite autour de la tige (Caron, 1993). Si la maladie progresse rapidement, les tiges peuvent être gravement atteintes ; parfois même les jeunes talles sont tuées avant que la tige ne monte ; par contre si la maladie s'installe tardivement, ou si elle progresse lentement comme cela se passe très souvent, les attaques de tiges ne sont que superficielles malgré des gaines entièrement détruites (Caron, 1993).

Les nœuds : ordinairement, la maladie dépasse facilement la hauteur du premier nœud, des fragments d'anneaux brun violacés entourent plus au moins complètement ce dernier. Les nœuds supérieurs peuvent aussi être atteints de la même façon, bien que cela soit moins fréquent (Caron, 1993).

Les feuilles : ces symptômes sont assez rares, on les trouve plus spécifiquement sur les blés durs plus sensibles à *M. nivale* (Caron, 1993 ; Mascher et al., 2008).

1.2.3.2. La maladie des épis (la fusariose de l'épi)

Les symptômes de cette maladie sont aussi diversifiés et, en fonction de la localisation de point de pénétration du parasite, la maladie sera plus ou moins importante.

Si la contamination a lieu au dos de la glume, on pourra y observer un dessèchement clair avec un liseré brun.

- Si le rachillet est atteint, un grain entier ou un épillet sera échaudé.
- Si le rachis est atteint, la partie de l'épi supérieure à l'attaque sera échaudée.
- Si enfin l'attaque a lieu au niveau du col de l'épi, l'échaudage atteindra tout l'épi

. Cette attaque se fait souvent par le filet des anthères pendant la floraison, qui est le stade le plus sensible. Si cette attaque est suffisamment précoce, un avortement direct des grains peut avoir lieu (Caron, 1993).

Il n'est pas rare d'observer sur les parties attaquées des colorations roses sur les glumes qui sont des amas de spores. Des différences de symptômes peuvent être observées en fonction des parasites, mais ce n'est pas une règle absolue, les conditions climatiques ayant aussi leur influence. En règle générale, *F. culmorum* provoque plutôt des échaudages massifs de l'épi, et *F. graminearum* des taches cernées de brun au dos des glumes. *M. nivale* provoque assez facilement l'un ou l'autre. Les grains atteints présentent une coloration blanche ou rose, ils sont très légers et flottent facilement sur l'eau. Si l'attaque est précoce, les grains sont maigres mais si l'attaque est tardive, ils ont un volume normal. Les grains non atteints directement peuvent présenter un aspect plus ou moins échaudé (Caron, 1993 ; Clavel, 2006).

1.2.4. Propagation et évolution des fusarioses

Selon Agrios (2005), la fusariose de l'épi est soit accompagnée ou précédée par la pourriture racinaire. Simon et al. (1989) rapportent qu'il est difficile de relier les attaques sur pied avec ce qui se passera ultérieurement sur épi. Selon Caron (1993), la fusariose du pied et la fusariose des épis peuvent être considérées comme des maladies différentes, pratiquement indépendantes, elles ont seulement en commun de provenir du même champignon parasite. Le niveau et la forme de l'inoculum disponible, aux stades sensibles qui leur correspondent est fonction des conditions climatiques. Il peut y avoir maladie du pied sans maladie des épis et l'inverse est aussi possible.

1.2.4.1. Implantation de la maladie à l'automne

Par le mycélium dans les semences : lors de la réhydratation, pendant la germination, le mycélium reprend son activité. Une course de vitesse s'engage entre la plantule et le parasite. Selon le degré de pénétration initial du bourgeon terminal par le mycélium et la quantité de cet inoculum, la germination est impossible ou ralentie. On assiste alors à des

manques à la levée ou des fontes de semis et les plantes qui restent en vie portent la maladie (Caron, 1993).

Par le mycélium ou les chlamydo-spores dans le sol : les premiers centimètres du sol, suffisamment aérés sont une zone d'importance pour les *Fusaria*. Ils peuvent y vivre en saprophytes en colonisant les débris végétaux qui s'y trouvent et s'y conserver plusieurs années sous forme d'hyphes mycéliens ou de conidies. Certains *Fusarium* sont mieux adaptés que d'autres à cette vie tellurique. Les attaques à partir du sol sont moins rapides qu'à partir des semences et se sont essentiellement le collet et la partie supérieure des racines qui sont atteintes (Caron, 1993).

La germination des macroconidies et des chlamydo-spores des espèces de *Fusarium* est stimulée par les exsudats racinaires. Au contact de l'hôte, ces propagules provoquent l'infection primaire au niveau des racines, du coleoptile ou du sous collet et gagnent ensuite les autres parties de la plante, une fois que les conditions environnantes sont favorables (Djerbi, 1969).

Par les conidies sur les résidus de culture en surface : les pluies et les vents disséminent les spores qui se forment à la surface du sol et sur les résidus de culture. Si l'automne est chaud, ce mode de contamination peut encore avoir de l'importance pour les espèces du genre *Fusarium*, sinon seule *M. nivale* pourra se disperser de cette façon (Caron, 1993). Le précédent cultural et les résidus de cultures sont considérés comme les facteurs majeurs dans la constitution de l'inoculum local (Dill Macky et al., 2000).

1.2.4.2. Evolution de la maladie pendant l'automne et l'hiver

Les fusarioses progressent lentement pendant l'hiver en conditions normales. Si les conditions sont trop sèches, la maladie va s'arrêter pour reprendre à la première pluie d'autant plus violemment que la sécheresse sera longue et profonde. Les conditions climatiques favorisantes sont donc des alternances de sécheresses avec quelques pluies (Osborne et al., 2007 ; Caron, 1993). Le développement de la maladie entre les plantes est assuré par le contact racinaire et se fait plus rapidement entre les plantes ayant le moins de talles (Sayoud et al., 1999).

1.2.4.3. L'évolution de la maladie du pied au printemps

La progression de cette maladie dépend des conditions climatiques et de densité des plantes. Dans le cas général, après l'infection par le parasite, la maladie va passer successivement des gaines extérieures vers les gaines intérieures jusqu'à atteindre la tige. Le plus souvent, la tige n'est atteinte que superficiellement, mais si la fusariose pénètre profondément, on assiste à un échaudage généralisé de la plante. Les nœuds et les entre nœuds supérieurs sont plus rarement atteints, l'origine de l'infection des nœuds les plus hauts n'est pas encore déterminée (Caron, 1993).

1.2.4.4. La maladie sur les épis à la fin du printemps et au début de l'été

Le stock d'inoculum sur les débris végétaux au niveau du sol ou à la base des plantes est produit à partir du mycélium qui y vit en saprophyte. Les conditions climatiques, les alternances de sécheresse et de pluies vont conduire à la production de macroconidies ou d'ascospores. Les macroconidies se forment à la surface des débris végétaux sous forme de plages sporodochiales roses et les ascospores sont produites dans les périthèces sur les feuilles et les gaines desséchées de la base. Ces deux types de spores seront disséminées par les pluies et les courants d'air vers les épis pour y initier la maladie (Caron, 1993),

elles sont abondantes dans l'air pour des périodes prolongées (plusieurs jours), qui peuvent varier en fonction de la vitesse du vent et de sa direction (Osborne et *al.*, 2007). Les conidies peuvent être disponibles pendant tout le cycle de la céréale alors que les ascospores ont une période de maturation assez longue qui exclue toute contamination en dehors de la période de l'épiaison (Caron, 1993).

Le plus grand risque d'infection se situe pendant la période reproductrice, soit au moment de l'épiaison ou de la floraison. Un niveau d'humidité élevé est indispensable pour le développement des spores au moment de l'épiaison. Une seconde période, déterminante pour l'infection, se situe pendant la floraison. A cette période, les anthères (étamines) sortent des fleurs. A ce moment, si les niveaux d'humidité sont assez élevés, les spores présentes sur l'épi peuvent germer. Le champignon pénètre dans la fleur en colonisant d'abord les anthères. Il se propage par la suite aux fleurs et aux épillets voisins. Les infections qui surviennent pendant cette période causent les dommages les plus graves tels que la stérilité florale, la réduction du nombre et de la grosseur des grains (Yves et *al.*, 2007).

En plus des effets sur la production (avortement des grains touchés), l'effet sur la qualité peut encore être désastreux (les mycotoxines et les qualités boulangères). Dans tous les cas, les semences seront infectées et seront initiatrices de la maladie lors de la campagne suivante (Caron, 1993).

I.2.5. La nuisibilité

La fusariose du pied : si cette maladie est suffisamment précoce, elle peut au passage de la montée de l'épi, atteindre le bourgeon terminal et tuer la talle correspondante. Les talles suivantes remplacent ces dernières et gommant l'effet nuisible de la maladie. Dans certaines circonstances, le parasite est capable de pénétrer profondément dans la tige ou les racines. Il s'ensuit un échaudage pénalisant le remplissage des grains. On peut citer jusqu'à 20% des pertes (Caron, 1993 ; Clavel, 2006).

La fusariose de l'épi : Les dégâts sont fortement liés au climat au moment de la floraison (Agrios, 2005). Les pertes de rendement sont directement liées à la proportion des grains fusariés ; des pertes de 10 à 30 % sont courantes ; elles peuvent atteindre 50 % pour les attaques les plus graves (Clavel, 2006). Le PMG (Poids de Mille Grains) est réduit et les grains les plus petits sont éliminés au battage. Le PS (Poids Sec) est fortement réduit, la qualité de semence est fortement réduite (Clavel, 2006). Les graines sont susceptibles de contenir des mycotoxines dangereuses pour la santé des êtres humains et des animaux domestiques (Zillinsky, 1983 ; Parry et *al.*, 1995 ; Agrios, 2005).

Les mycotoxines : A ces inconvénients vient s'ajouter le risque de toxicité engendré par une forte contamination des grains. Plusieurs travaux (Burlakoti et *al.*, 2007 ; Boutigni et *al.*, 2008 ; Lysøe et *al.*, 2008 ; Xu et *al.*, 2008 ; Vogelgsang et *al.*, 2008 ; Isebaert et *al.*, 2009) ont mis en évidence la production de plusieurs types de mycotoxines par les espèces du genre *Fusarium* responsables de la fusariose de l'épi chez le blé. Ces mêmes auteurs citent *M. nivale* comme une espèce non productrice de mycotoxines.

On distingue deux groupes de mycotoxines produites par les *Fusarium* spp. : Le groupe représenté par la zéaralénone (ZEA) et le groupe des trichothécènes (comme le DON). En plus de leurs effets sur la santé, les mycotoxines altèrent les qualités physique et technologique des produits résultant de grains fusariés (Duc et Bezet, 2003).

I.2.6. Les moyens de lutte

I.2.6.1. La lutte culturale

Cette lutte vise à limiter l'accroissement du taux de l'inoculum dans le sol et consiste à :

- L'utilisation des semences saines (Caron, 2003).
- Utilisation de la fumure azotée de façon rationnelle (Mauler et al., 1997).
- L'élimination des résidus de culture contaminés par incinération ou enfouissement profond (Dill Macky et al., 2000).
- La réalisation des rotations d'au moins deux ans en dehors des céréales (alterner avec des légumineuses), cela réduit la densité de l'inoculum (Gilbert et Tekauz, 2000).
- L'utilisation de la solarisation, qui peut réduire les populations pathogènes et l'incidence de la maladie (Pandy et al., 1996).

I.2.6.2. La lutte génétique

Jusqu'à présent, aucun génotype de blé présentant une résistance absolue à la fusariose sur épi n'a encore été trouvé (Mascher et al., 2005). Ce qui rend la situation plus difficile, c'est que la sélection variétale doit tenir compte aussi des caractères agronomiques et la résistance à d'autres maladies (Yuen et Schoneweis, 2007). Cependant, plusieurs travaux de sélections sont réalisés en utilisant soit des variétés de blé sauvages comme *T. turgidum* ssp. *diccocoides* (Kumar et al., 2007) ou en utilisant le cultivar chinois Sumai 3 qui semble être le plus utilisé comme une source de résistance contre la gale de l'épi (Yu et al., 2008).

I.2.6.3. La lutte chimique

Le traitement chimique est l'une des méthodes utilisées pour lutter contre cette maladie. Le tebuconazole est l'un des fongicides utilisés, mais son efficacité est insuffisante vis-à-vis de la contamination par le DON (Jones, 2000). Récemment, un nouveau fongicide Prosaro (une combinaison entre le prothicanazole et le tebuconazole) s'est montré à être le plus efficace. Cependant, pour l'ensemble des fongicides, une application homogénéisée, dans le temps approprié est indispensable pour la réussite du traitement (Yuen, 2007).

I.2.6.4. La lutte biologique

Plusieurs microorganismes ont montré leur efficacité dans la protection du blé contre la fusariose. Les genres *Bacillus*, *Lysobacter* et *Pseudomonas* sont les agents bactériens les plus étudiés (Yuen et al., 2007). Des champignons des genres *Rhodotorula*, *Sporobolomyces*, *Cryptococcus* et *Trichoderma* peuvent réduire l'inoculum de nombreuses espèces du genre *Fusarium* notamment *F. graminearum* (Palazzini et al., 2007).

Actuellement, plusieurs chercheurs utilisent les anthères du blé pour extraire des microorganismes pour la lutte biologique contre cette maladie (Schisler et al., 2006 ; Palazzini et al., 2007). Schisler et al. (2006) rapportent que les tissus floraux du blé contiennent la choline et la betaine, deux composés qui stimulent la croissance mycélienne de *Gibberella zeae* (téléomorphe de *F. graminearum*), le principal agent de la gale de l'épi. Ils ajoutent que chaque souche pouvant dégrader la choline peut être utilisée pour lutter contre cette maladie.

D'autres chercheurs, Bonanomi et al. (2010) ont mené des expériences sur différents types d'amendements organiques dans le but d'identifier les caractéristiques

d'un amendement pouvant réduire le taux d'inoculum dans le sol, les communautés microbiennes sont parmi ces caractéristiques recherchées.

Matarese et *al.* (2012) ont travaillé sur la lutte biologique contre la fusariose des épis du blé, ces derniers proposent d'utiliser des souches de *Trichoderma* pour diminuer le taux d'inoculum des *Fusaria* dans les résidus de culture, les résultats obtenus étaient intéressants.

I.2.6.5. La lutte intégrée

Une lutte efficace contre la fusariose du blé doit combiner différentes méthodes, culturales, l'utilisation des variétés résistantes, les traitements chimiques et l'utilisation d'éventuels agents de la lutte biologique.

I.3. Utilisation de *Trichoderma* dans la lutte biologique

I.3.1. Historique

Les propriétés antagonistes du *Trichoderma* ont été mentionnées pour la première fois par Vuillemin en 1887 (Lamy Krafft et Roquebert, 1981). Ce n'est toutefois qu'en 1971 que Dennis et Webster ont pu élucider les différents mécanismes d'action de ce champignon antagoniste qui incluent principalement le mycoparasitisme, l'antibiose et la compétition pour les nutriments et l'espace (Dennis et Webster 1971a, b, c). Depuis, les recherches portant sur ce champignon se sont multipliées (Lamy Krafft et Roquebert, 1981). Ainsi, les champignons du genre *Trichoderma* ont été utilisés comme agents de lutte biologique contre un large spectre d'agents phytopathogènes aussi bien telluriques que foliaires.

I.3.2. Description

Le genre *Trichoderma* Pers. est caractérisé par une vitesse de croissance rapide et une sporulation abondante sur milieu de culture (Gams et Bisset, 1998). Il est facilement reconnaissable en culture grâce à la couleur généralement verte de ses spores (Dubos, 1986). Ce genre est caractérisé par des conidiophores fortement ramifiés selon une structure pyramidale et se terminant par une ou plusieurs phialides. Ces phialides peuvent être cylindriques ou subglobuleuses, regroupés en masse ou solitaires. Les conidies sont hyalines, ellipsoïdes et lisses chez la plupart des espèces, les conidies globuleuses sont rares. Certaines espèces peuvent produire des chlamydospores globuleuses, qui sont intercalaires ou terminales (Samuels et *al.*, 2006).

I.3.3. Taxonomie

La forme parfaite des espèces de *Trichoderma* appartient à l'ordre des Hypocreales, au genre *Hypocrea* (Hypocreaceae, Hypocreales, Hypocreomycetidae, Sordariomycetes, Pezizomycotina, Ascomycota, Fungi), mais certaines espèces de *Trichoderma* ont été rattachées au genre *Podostroma* P. Karst. et *Sarawakus* Lloyd. *Trichoderma* Pers. est un genre qui appartient au Deutéromycètes (hyphomycètes, moniliales, moniliaceae). Depuis

1860 plusieurs espèces du genre *Hypocrea* ont été cultivées et leur anamorphe *Trichoderma* sont décrits (Samuels, 1996).

Au départ, la taxonomie de ce genre a été basée essentiellement sur les caractères morphologiques et les résultats les plus importants dans ce domaine ont été publiés par Rifai (1969) et Bisset (1984 ; 1991a ; 1991b ; 1991c). Il est extrêmement difficile d'identifier les nombreuses espèces de *Trichoderma* selon des critères morphologiques (Fig.2) et seuls quelques spécialistes utilisent encore la clé proposée par Rifaï (Alabouvette et Cordier, 2012).

Aujourd'hui, fort heureusement, les marqueurs moléculaires permettent une identification beaucoup plus sûre de ces différentes espèces. Cette identification fait appel au séquençage de certains gènes ribosomiques (ITS, 18S) et d'autres gènes comme celui codant pour les facteurs d'élongation EF-1 α . Une base de données Tricho Key recense ainsi toutes les séquences et permet par comparaison d'identifier une souche nouvellement isolée. L'utilisation de cet outil moléculaire a montré que de nombreuses souches avaient été mal identifiées, et c'est ainsi que plusieurs souches de *T. harzianum* sont aujourd'hui placées parmi les *T. atroviride* (Alabouvette et Cordier, 2012 ; Gajera et Vakharia , 2010).

I.3.4. Ecologie

Les *Trichoderma* spp. sont des champignons saprophytes extrêmement fréquents dans l'environnement, en particulier dans les sols où ils vivent aux dépens de la matière organique. Ils sont abondants dans la rhizosphère des plantes et facile à isoler des racines et d'autres organes souterrains. Ils sont également présents sur les parties aériennes des plantes, où ils peuvent coloniser les blessures comme les plaies de taille. *In vitro*, sur milieu gélosé, ils se développent rapidement, sont très compétitifs et par conséquent, inhibent le développement des autres microorganismes (Brotman et *al.*, 2010 ; Alabouvette et Cordier, 2012).

Il n'existe pas à proprement parler de *Trichoderma* pathogènes des plantes bien que certaines souches soient capables de coloniser des tissus végétaux, mais sans induire des symptômes. On parle de souches endophytes. En revanche, certaines souches appartenant à l'espèce *T. aggressivum* Samuels et W. Gams attaquent le champignon de couche et provoquent des dégâts dans les champignonnières (Samuels et *al.*, 2002 ; Alabouvette et Cordier, 2012).

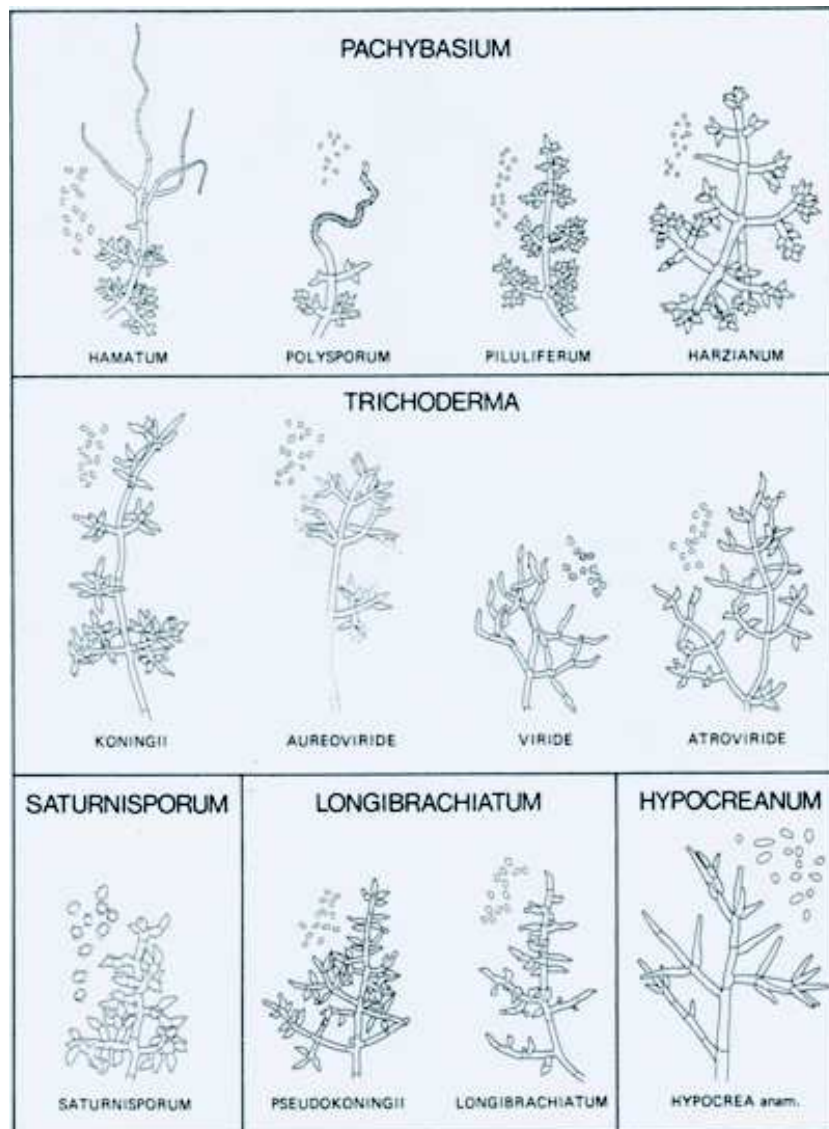


Figure 2. Illustration des cinq sections reconnues par Bissett (1991a)

I.3.5. Mécanismes d'action

Le mode d'action des *Trichoderma* spp. est complexe, il fait appel à tous les mécanismes connus de l'antagonisme microbien : antagonisme direct (hyperparasitisme, compétition trophique, antibiose) et antagonisme indirect via la plante c'est-à-dire induction de résistance chez la plante.

I.3.5.1. Antagonisme direct

I.3.5.1.1. L'hyperparasitisme

Le parasitisme est une interaction dans laquelle un organisme se développe au dépens d'un autre organisme vivant après avoir lui-même pénétré ou émis des structures particulières (sugoires) qui pénètre dans l'organisme cible. Quand un organisme parasite une cible elle-

même parasite (de plante par exemple), on parle d'hyper-parasitisme (Alabouvette et Cordier, 2012).

Dans le cas du parasitisme de *Trichoderma* vis-à-vis de *Rhizoctonia solani* Kühn, les hyphes de *Trichoderma* grâce à un mécanisme de reconnaissance faisant appel à des lectines, s'enroulent autour des hyphes de *Rhizoctonia*. Ensuite, grâce à une action enzymatique, les filaments de *Trichoderma* vont perforer la paroi des hyphes de *Rhizoctonia* et émettre des suçoirs qui vont pénétrer dans les hyphes de l'hôte au dépens duquel *Trichoderma* va pouvoir s'alimenter. Il en résulte un affaiblissement de l'agent pathogène donc une diminution de sa capacité infectieuse (Anees et al., 2010 ; Alabouvette et Cordier, 2012).

Durant ce processus, *Trichoderma* secrète des enzymes qui dégradent la paroi cellulaire du champignon hôte, libérant par la suite des oligomères de la paroi cellulaire du pathogène (Vinale et al., 2008). Il existe en effet plus de 20 gènes séparés qui peuvent être impliqués dans le mycoparasitisme. *Trichoderma* produit dix chitinases différentes et plusieurs β -1,3-glucanases et des protéases (Vidhyasekaran, 2004).

1.3.5.1.2. La compétition

La compétition pour le carbone, l'azote et autres facteurs de croissance en même temps que la compétition pour l'espace et les sites spécifiques d'infection peuvent être utilisées par les agents de lutte biologique contre les agents phytopathogènes (Vinale, et al., 2008). La compétition trophique s'exerce entre deux organismes qui partagent la même niche écologique et les mêmes ressources trophiques. Le plus compétitif séquestre alors à son profit les ressources disponibles, ce qui contribue à affaiblir l'autre organisme. Dans le sol et la rhizosphère, la compétition trophique s'exerce principalement au niveau du carbone organique indispensable au développement saprophytique, mais aussi aux dépens d'autres éléments comme des acides aminés présents dans les exsudats racinaires ou des éléments comme le fer et le manganèse (Alabouvette et Cordier, 2012). La compétition pour les éléments nutritifs entre *Trichoderma* et *Pythium ultimum* Trow a été suggérée par l'observation d'une colonisation rapide par l'agent antagoniste corrélée avec la diminution des symptômes (Jijakli, 2003).

La compétition trophique, mais aussi la compétition pour l'espace (par exemple pour la colonisation du rhizoplan), ont souvent été invoquées pour expliquer l'antagonisme de *Trichoderma* vis-à-vis de certains agents pathogènes. Certaines souches de *Trichoderma* possèdent en effet la capacité de coloniser activement les plaies de taille, ou la surface de la racine. Elles s'opposent ainsi à la colonisation de la surface des organes végétaux par les agents pathogènes et protègent les « sites » d'infection, c'est-à-dire les tissus qui constituent les portes d'entrée privilégiées pour les agents pathogènes (Alabouvette et Cordier, 2012).

1.3.5.1.3. L'antibiose

L'antibiose est le mécanisme par lequel une souche antagoniste inhibe le développement d'une souche cible grâce à la production de métabolites secondaires toxiques. A la différence de la compétition trophique qui s'exerce en un même site, les substances toxiques sont susceptibles de diffuser dans le milieu. Il en résulte que l'effet d'un microorganisme agissant par antibiose ne nécessite pas la juxtaposition des deux microorganismes. L'antibiose est facile à mettre en évidence *in vitro*, dans des expériences de confrontation de microorganismes. Elle se manifeste alors par l'apparition d'une zone d'inhibition de la croissance (Alabouvette et Cordier, 2012).

Trichoderma est bien connu pour produire de nombreux métabolites secondaires solubles ou volatils, capables d'inhiber la croissance d'autres champignons. Parmi ces métabolites, on peut citer la famille de molécules connues sous le nom de peptaibols qui sont des polypeptides linéaires amphipathic comprenant de l'acide amino-isobutyrique et un amino alcool qui possèdent une activité antibiotique (Alabouvette et Cordier, 2012).

Selon son profil antibiotique, *T. virens* comprend deux groupes P et Q. Les souches de groupe P produisent la gliovirine qui est active contre *Pythium ultimum* Trow et n'est pas active contre *Rhizoctonia solani* Kün. par contre, les souches de groupe Q produisent la gliotoxine qui est très active contre *R. solani*, mais moins active contre *P. ultimum* (Howell, 2006).

I.3.5.2. Antagonisme indirect

I.3.5.2.1. L'élicitaion

Outre ces mécanismes d'antagonisme direct, les *Trichoderma* spp. sont capables, comme d'autres organismes d'induire les réactions de défense de la plante à l'origine de la résistance induite.

L'antagonisme indirect par stimulation des réactions de la plante hôte fait appel à des mécanismes extrêmement complexes qui impliquent la production par *Trichoderma* de molécules signal (MAP, Mitogen-Activated Protein) reconnues par la plante, laquelle déclenche alors toute une cascade de signaux aboutissant à la production de molécules de défense qui renforcent la résistance de la plante aux bioagresseurs. Ces mécanismes d'interaction entre les microorganismes protecteurs, les agents pathogènes et la plante sont de mieux en mieux connus. On sait désormais que certains gènes peuvent intervenir dans la régulation de différentes voies de signalisation (voie de l'acide salicylique, de l'acide jasmonique, de l'éthylène) présentées, il n'y a pas si longtemps, comme indépendantes les unes des autres voire antagonistes (Alabouvette et Cordier, 2012, Druzhinina et al., 2011 ; Fontenelle et al., 2011).

Il s'est avéré que l'élicitation des mécanismes de défense, c'est-à-dire la production par la plante de molécules de défense type PR protéines, en réponse à la perception par la plante d'un stress d'origine biotique ou abiotique, ne conduit pas nécessairement à une résistance accrue de la plante vis-à-vis des agents pathogènes (Alabouvette et Cordier, 2012 ; Kumar et al., 2010).

I.3.5.2.2. La potentialisation

L'attention est actuellement portée sur la potentialisation des réactions de défense, phénomène par lequel la plante se met en état de répondre plus rapidement et/ ou plus intensément à une agression parasitaire lorsqu'elle a préalablement perçu un signal émis par un élément potentialisateur : agent de lutte biologique, substance naturelle de défense, etc. Pour l'instant, même au laboratoire, la potentialisation ne peut être révélée qu'après application de l'agent pathogène (Alabouvette et Cordier, 2012).

Plusieurs études montrent que les *Trichoderma* sont capables d'éliciter et/ ou de potentialiser les réactions de défense chez de nombreuses espèces végétales. Cependant les molécules signal émises, les processus de reconnaissance et les voies de signalisation adoptées varient d'une souche de *Trichoderma* à une autre, d'un agent pathogène à un autre, d'une espèce végétale à une autre. Il n'est malheureusement pas possible de généraliser les connaissances acquises avec une souche donnée sur un modèle donné

à d'autres souches ou à d'autres modèles. Cette complexité des mécanismes justifie tous les efforts de sélection de nouvelles souches de *Trichoderma* spp. puisqu'il est illusoire d'espérer qu'une même souche sera adaptée à tous les usages (Alabouvette et Cordier, 2012).

I.3.5.2.3. La stimulation de la croissance des plantes

Certains métabolites secondaires produits par les *Trichoderma* spp. sont des substances de type hormonal capables de stimuler la croissance des plantes. Cela se traduit par une augmentation de la biomasse racinaire ou aérienne, du nombre ou de la taille des fleurs, etc. Par opposition à cette « vraie » stimulation de croissance, les *Trichoderma* spp. peuvent aussi stimuler la vitalité des plantes de manière indirecte en contrôlant les activités de la microflore pathogène présente dans la rhizosphère. Il est évident que la diminution du nombre de nécroses racinaires provoquées par des champignons pathogènes va se traduire par une meilleure vitalité de la plante (Chen et *al.*, 2011 ; Fontenelle et *al.*, 2011 ; Martinez-Medina et *al.*, 2011 ; Rojan et *al.*, 2010 ; Alabouvette et Cordier, 2012).

Enfin, les molécules signal (MAP) qui déclenchent une cascade de signaux moléculaires pouvant conduire à la résistance des plantes aux maladies peuvent également stimuler certains processus physiologiques contribuant à une meilleure vitalité de la plante. Sur le plan scientifique, il n'est donc pas possible de dresser de frontière stricte entre les mécanismes responsables de la bio-protection, de la bio-fertilisation ou de la bio-stimulation, d'autant plus que ces différents modes d'action ne sont pas exclusifs l'un de l'autre, mais peuvent s'exprimer simultanément (Alabouvette et Cordier, 2012).

II.MATERIEL ET METHODES

II.1. Matériel

II.1.1. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé dans cette étude est la variété vitron (blé dur). Cette dernière est connue localement sous l'appellation Hoggar, originaire du Mexique, et introduite en Algérie à partir de l'Espagne en 1986. Ce matériel provient de l'ITGC.

II.1.2. Matériel fongique

- Agent pathogène

Le matériel fongique utilisé est constitué d'une collection d'isolats isolés à partir des épis, du collet et des racines du blé présentant les symptômes typiques de la fusariose de l'épi ou de la pourriture racinaire (Tableau 4).

- Agent antagoniste

Pour la lutte biologique, deux isolats appartenant au genre *Trichoderma* sont utilisés, le premier appartient à l'espèce *T. atroviride* : Ta13 (Fig. 3). Ce dernier est choisi à partir d'une collection de *Trichoderma* (Bouregghda, 2009) déjà testée contre les agents de la fusariose du blé (Renane, 2008 ; Abdallah, 2010 ; Dane, 2012b ; Djelailia, 2012). Le deuxième isolat a été isolé et identifié lors de cette présente étude.

II.2. Méthodes

II.2.1. Isolement et identification morphologique des isolats fongiques associés à la fusariose de l'épi et la pourriture racinaire du blé

II.2.1.1. Prélèvement d'échantillons

L'échantillonnage a été réalisé en Avril et Mai de l'année 2011, dans les zones suivantes : les serres de l'ENSA, les champs de la station ITGC de Oued Smar (Alger), les champs des Issers (Boumerdes), les fermes Ben Alia et Ben Abdelkader d'El Afroune (Blida), et dans la région de Sétif. Les plants de blé récoltés étaient ceux qui présentaient des symptômes typiques de la pourriture racinaire (pourriture des racines et brunissement du collet), ou de la fusariose de l'épi (échaudage de quelques épillets accompagné parfois d'amas de spores roses)

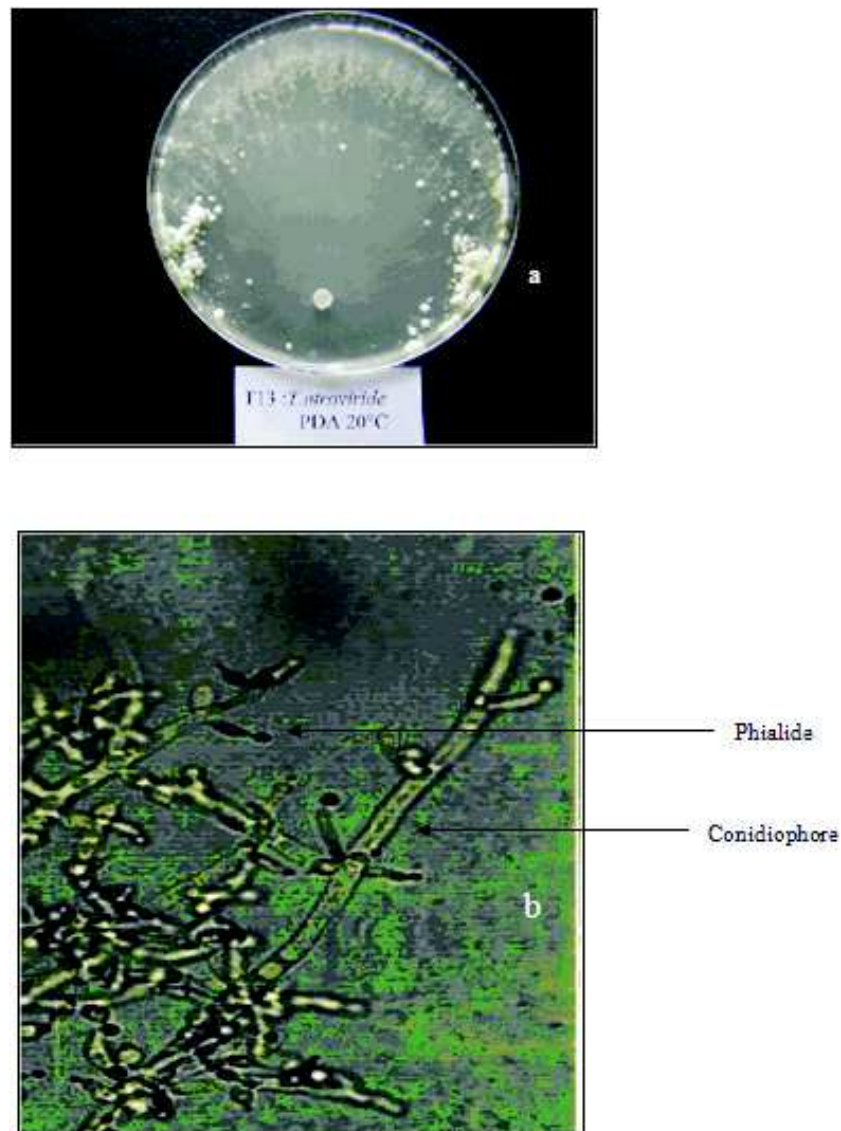


Figure 3. Aspect macroscopique (a) et microscopique (b) de *T. atroviride* (Ta. 13).

II.2.1.2. Isolement

Pour l'isolement et l'identification des agents fongiques, les échantillons sont pris au laboratoire, les parties présentant les symptômes de la maladie (collet, racines, et épis) sont découpées en fragments d'environ 5 mm. Ces derniers sont désinfectés dans de l'hypochlorite de sodium dilué à 2% pendant 5 mn puis rincés dans 3 bains successifs d'eau distillée stérile pendant 5 min chacun, ensuite séchés entre deux feuilles de papier Joseph stérile. Les fragments ainsi désinfectés sont déposés (à raison de 9 fragments par boîte) sur des boîtes de Pétri contenant le milieu PDA. Ces dernières sont mises à incuber à la température ambiante du laboratoire (22°C) et sous lumière continue. A partir du troisième jour, on surveille l'apparition des colonies fongiques. Ces dernières sont repiquées dans des nouvelles boîtes de Pétri contenant le milieu PDA pour être identifier.

II.2.1.3. Purification des isolats par la culture monospore

A partir des cultures âgées de 7 jours du champignon, une suspension de spores est préparée dans des tubes contenant de l'eau distillée stérile, ensuite une goutte de chaque suspension est prélevée et étalée de manière uniforme sur des boîtes de Petri contenant le milieu PDA. Les boîtes sont ensuite incubées à la température ambiante du laboratoire. Après 48h, un prélèvement de spores en germination est effectué sous une loupe binoculaire, et repiqué dans des boîtes contenant le milieu PDA. Les boîtes sont mises à incuber pendant 7 jours à la température ambiante du laboratoire (22°C) sous lumière continue.

II.2.1.4. Identification morphologique des isolats

L'identification des espèces de *Fusarium* spp. est basée sur les critères établis par Tousson et Nelson (1976) et les descriptions des espèces du genre *Fusarium* établies par Booth (1971), Zillinsky (1983), Leslie et Summerell (2006). Les principaux critères sont :

- La forme et la taille des macroconidies.
- La présence ou l'absence des microconidies.
- La présence ou l'absence de chlamydospores
- L'aspect et la coloration du mycélium sur milieu PDA.

II.2.1.5. Conservation des isolats

Après purification, les isolats sont conservés au froid à 4°C dans des tubes contenant le milieu PDA.

II.2.2. Etude de l'effet de la température sur le taux de croissance mycélienne des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale*

Cette étude est réalisée dans le but de déterminer le taux de croissance ainsi que la température optimale de croissance selon le protocole établi par Brenan et *al.* (2003) sur milieu PDA. L'effet de la température est évalué à 15, 20, 25 et 30°C à l'obscurité. Cette étude est réalisée pour tous les isolats identifiés précédemment (26 isolats). Ainsi, des explants de 4 mm de diamètre sont prélevés à partir de cultures âgées de 7 jours. Ces explants sont déposés au centre des boîtes de Pétri de 85 mm de diamètre contenant le milieu PDA. Des mesures de la croissance mycélienne sont effectuées après 24, 48, 72, et 96 h d'incubation. Trois répétitions pour chaque isolat et pour chaque température sont réalisées.

II.2.3. Etude pathologique des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale*

Le matériel fongique utilisé dans cette étude pathologique est la collection isolée précédemment, elle est constituée de 26 isolats dont 25 appartiennent au genre *Fusarium* et une espèce de *Microdochium nivale* (Tableau 4).

La pathogénicité de ces isolats est évaluée *in vitro* et *in vivo* selon trois méthodes :

- Effet des isolats sur la croissance du coléoptile du blé *in vitro* à différentes températures (15, 20, 25 et 30°C) par inoculation des graines du blé.
- Effet des isolats sur la partie basale des plants du blé (collet et racine) par inoculation du sol (*in vivo*).

Effet des isolats sur l'épi par inoculation des épis des plants du blé au stade floraison (*in vivo*).

Isolats n°	Origines	blé	Variétés de blé	Organes de l'isolement	Espèces
1	Assafia (Laghouat)	Blé dur	-	Collet	<i>F. cubmorum</i>
2	Ferme Ben Alia , Afroune (Blida)	Blé dur	-	Collet	<i>F. cubmorum</i>
3	Ferme Ben Alia , Afroune (Blida)	Blé tendre	Anza	Racine	<i>F. cubmorum</i>
4	Ferme Ben Alia , Afroune (Blida)	Blé tendre	Anza	collet	<i>F. cubmorum</i>
5	Ferme Ben Alia , Afroune (Blida)	Blé tendre	Anza	collet	<i>F. cubmorum</i>
6	Ferme Ben abdelkader, Afroune (Blida)	Blé dur	Waha	collet	<i>F. cubmorum</i>
7	ITGC Oued smar (Alger)	Blé dur	Vitron	collet	<i>F. cubmorum</i>
8	ITGC Oued smar (Alger)	Blé dur	Vitron	collet	<i>F. cubmorum</i>
9	ITGC Oued smar (Alger)	Blé dur	-	Epi	<i>F. cubmorum</i>
10	ITGC Oued smar (Alger)	Blé dur	-	Epi	<i>F. cubmorum</i>
11	Issers (Boumerdes)	Blé dur	-	racine	<i>M. nivale</i>
12	Issers (Boumerdes)	Blé dur	-	racine	<i>F. cubmorum</i>
13	Issers (Boumerdes)	Blé dur	-	racine	<i>F. cubmorum</i>
14	Issers (Boumerdes)	Blé dur	-	racine	<i>F. cubmorum</i>
15	Issers (Boumerdes)	Blé dur	-	racine	<i>F. cubmorum</i>
16	Issers (Boumerdes)	Blé dur	-	Racine	<i>F. cubmorum</i>
17	Issers (Boumerdes)	Blé dur	-	Racine	<i>F. solani</i>
18	Setif	Blé dur	-	Racine	<i>F. verticillioides</i>
19	Sétif	Blé dur	-	Racine	<i>F. cubmorum</i>
20	Serres de l'ENSA (Alger)	Blé dur	Vitron	Racine	<i>F. solani</i>
21	Serres de l'ENSA (Alger)	Blé dur	Vitron	Racine	<i>F. cubmorum</i>
22	Serres de l'ENSA (Alger)	Blé dur	-	Racine	<i>F. torulosum</i>
23	-	Blé dur	-	Collet	<i>F. graminearum</i>
24	-	Blé dur	-	Collet	<i>F. graminearum</i>
25	Issers (Boumerdes)	Blé dur	-	Epi	<i>F. graminearum</i>
26	Issers (Boumerdes)	Blé dur	-	Epi	<i>F. poas</i>

Tableau 4. Origines des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale*

II.2.3.1. Effet des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* sur la croissance du coléoptile *in vitro*

La technique adoptée est celle décrite par Mesterhazy (1983).

Des flacons contenant 50 ml de bouillon de pomme de terre PDB -Potato Dextrose Broth- (Annexe 1) sont inoculés avec 4 explants mycéliens de 6 mm de diamètre pour chaque isolat de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* prélevés sur des cultures âgées de 7 jours. Les flacons sont incubés à 20°C sous agitation continue (250 rpm) pendant 7 jours. Au bout du 7^{ème} jour d'incubation, les cultures des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* sont centrifugées à 5000 tours/min pendant 10 min. Ainsi le mycélium est récupéré ensuite dilué à 13,3 mg/ml dans du Tween 20 à 0,2%.

Dans des boîtes de Pétri (85 mm) de diamètre contenant le milieu PDA, des rondelles de papier filtre stérilisé (85 mm de diamètre) sont placées sur le milieu, ensuite 8 ml de mycélium dilué dans le Tween 20 à 0,2 % sont déposés et couverts avec un 2^{ème} papier filtre stérile. Un nombre de 25 graines de blé préalablement désinfectées (à l'aide de l'hypochlorite du sodium) sont déposées dans chaque boîte. Les boîtes contenant les graines sont incubées à l'obscurité à 15, 20, 25 et 30°C à raison de trois répétitions pour chaque isolat et pour chaque température. Des boîtes témoin sont réalisées et incubées dans les mêmes conditions. Pour ces dernières, le mycélium dilué est remplacé par l'humidification du papier par de l'eau distillée stérile.

Les mesures de la croissance du coléoptile sont effectuées au bout du 2, 3 et 4^{ème} jours d'incubation. Les résultats sont exprimés par le pourcentage du retard de la croissance du coléoptile par rapport au témoin.

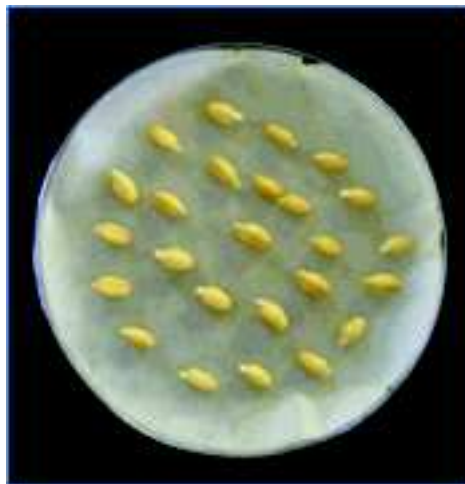


Figure 4.Boîte de Pétri contenant les graines de blé (25 graines) inoculées par le mycélium.

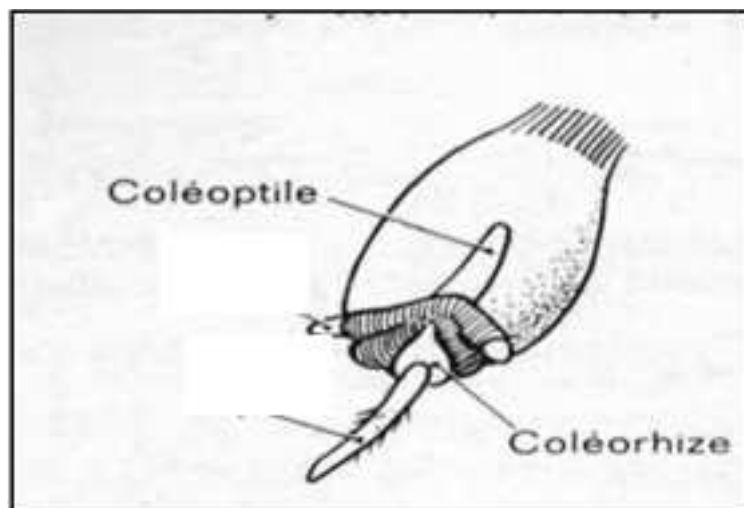


Figure 5. Grain de blé en germination montrant le coléoptile et le coléorhize (Moule, 1971)

II.2.3.2. Etude de la pathogénicité des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* sur la partie basale des plants du blé.

La technique utilisée est celle décrite par Khalifa (2006). L'inoculum est préparé sur un substrat à base d'orge, ce dernier est réparti dans des Erlen de 250 ml à raison de 54 g d'orge et 22 ml d'eau distillée. Ensuite les erlens sont autoclavés pendant 20 min à 120°C. Après autoclavage, chaque Erlen est inoculé avec 5 explants de 6 mm de diamètre de l'agent pathogène à partir de culture âgée de 7 jours. Les erlens sont ensuite incubés à 25°C sous lumière continue pendant 15 jours et agités une fois tous les 3 à 4 jours. Une fois l'inoculum est prêt, on procède à l'inoculation. Pour cela, les graines du blé sont désinfectées à l'aide de l'hypochlorite du sodium (2%), puis rincées trois fois dans de l'eau distillée stérile et séchées entre deux papiers Joseph stériles. Les graines sont semées dans des pots, à raison de 5 graines par pot. Pour chaque isolat, 3 répétitions sont réalisées, et chaque répétition consiste en 2 pots. (Fig. 6).

Le sol utilisé provient des champs de l'ENSA, ce dernier est stérilisé à 120°C pendant 8 heures. Les graines de blé semées à raison de 5 graines par pot et sont couvertes avec une couche de l'inoculum de 2.5g à une distance de 2cm au-dessus des graines, ensuite sont recouvertes par du sol (Fig. 7).

Les plants sont observés régulièrement pour suivre l'évolution et l'apparition des symptômes. La première notation est réalisée au moment de la germination et la deuxième après un mois et demi. L'évaluation de la sévérité des symptômes est exprimée selon une échelle de notation à 4 degrés allant de 0 à 3.

0 : absence de symptômes.

1 : noircissement ou brunissement de 1 à 25 % de la surface du collet.

2 : noircissement ou brunissement de 26 à 50 % de la surface du collet.

3 : noircissement ou brunissement de plus de 50 % de la surface du collet.

La réaction moyenne est estimée par le rapport suivant :

$$IM = (0 \times F_0 + 1 \times F_1 + 2 \times F_2 + 3 \times F_3) / N$$

Où : IM : indice de maladie

F : nombre de plants pour chaque degré dans l'échelle de notation de 0 à 3.

N : nombre total de plants utilisés

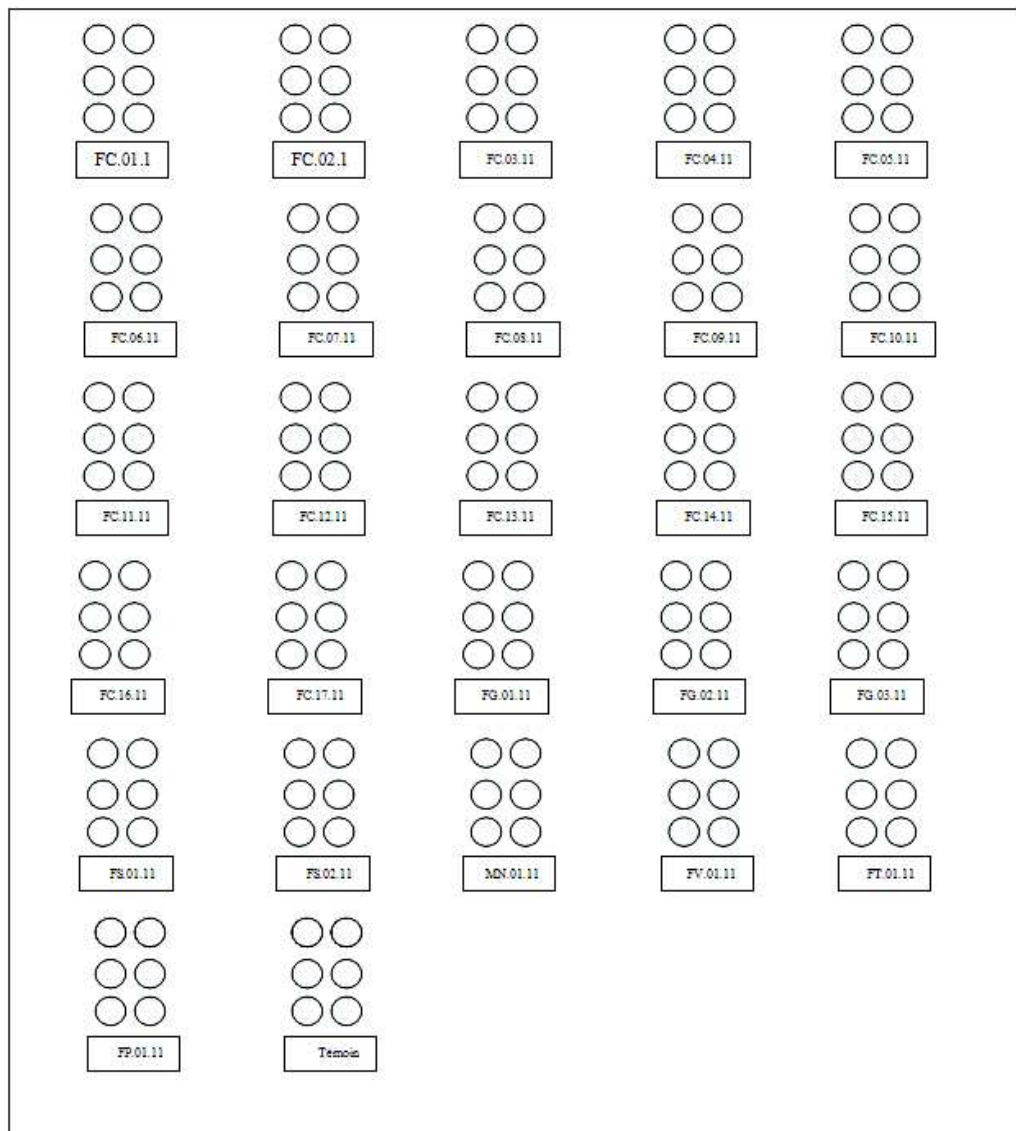


Figure 6. Schéma du dispositif expérimental du test de pathogénicité sur le collet

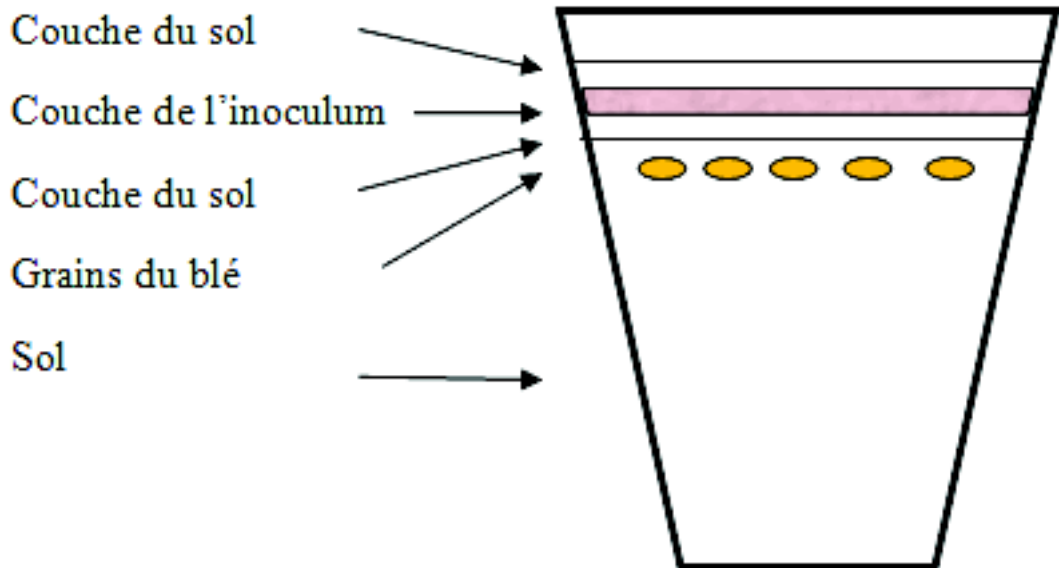


Figure 7. Schéma du Pot contenant les différentes couches expliquant la technique d'inoculation sur le collet

II.2.3.3. Etude de la pathogénicité des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivales* sur les épis du blé.

Cette étude a été réalisée dans un champs de l'ENSA. Après la préparation de lit de semence, des microparcelles de 1m^2 ont été délimitées. Pour chaque isolat trois microparcelles ont été réservées, la distance entre les microparcelles est de 2 m.

Pour chaque microparcelle, le semis est réalisé dans cinq lignes distantes de 25 cm. Le semis avait été réalisé le 09-12-2011, la variété de blé utilisée est la variété Vitron (Figs. 8 et 9).



Figure 8. Dispositif expérimental (a), microparcelle stade tallage (b).

L'essai a été suivi quotidiennement, et un programme de fertilisation a été réalisé, ce dernier est détaillé dans le tableau 5.

Date de l'apport	Fertilisant utilisé	Dose d'utilisation	Mode d'apport	Stade de la culture
Décembre	NPK	300Kg/ha	fumure de fond	après le semis
Janvier	Agriphos	2,53l/ ha	engrais foliaire	trois feuilles
Janvier	Urée	100 Kg/ ha	fumure de fond	trois feuilles
Février	Agriphos	2,53 l/ha	engrais foliaire	plein tallage
Février	Phosamco 6sp	2,53 Kg/ha	engrais foliaire	plein tallage
Février	Urée	100Kg /ha	fumure de fond	plein tallage
Mars	Agriphos	2,53l/ha	engrais foliaire	montaison
Mars	Safe N	2,53l/ha	engrais foliaire	montaison

Tableau 5. Les différents fertilisants utilisés pour la culture du blé pendant l'essai

L'inoculation des épis est réalisée au stade floraison, ce dernier est atteint quand 50 % des étamines sont sorties. L'inoculum est préparé à partir des cultures âgées de 7 jours. Ainsi une suspension de spores d'une concentration de 5×10^5 spores/ ml est préparée à partir de culture âgée de 7 jours pour chaque isolat. Après humidification des épis, l'inoculation est réalisée à l'aide d'un pulvérisateur. Des observations quotidiennes sont réalisées pour suivre l'expression des symptômes sur les épis. La sévérité de la maladie est évaluée selon une échelle de notation globale allant de 1 à 9, sachant que 9 correspond à une sensibilité maximale et 1 à l'absence totale des symptômes (Tableau 6).

Après la moisson, le poids de mille grains (PMG) est mesuré. Une analyse phytosanitaire des grains issus des épis fusariés est aussi réalisée.

Note	Part de l'épi infectée	Description des symptômes
1	0%	Sans symptômes
2	2,5%	Traces de symptômes, un épillet sur 10 épis montre des symptômes
3	10%	10% des épillets de chaque épi sont infectés
4	25%	Un quart des épillets d'un épi sont infectés
5	50%	La moitié des épillets d'un épi sont infectés
6	75%	Trois quarts des épillets d'un épi sont infectés
7	90%	10% des épillets d'un épi ne sont pas infectés
8	97,5%	Peu d'épillets d'un épi ne sont pas infectés
9	100%	Tous les épis sont morts

Tableau 6. Echelle de notation utilisée pour l'estimation de la sévérité de la fusariose du blé (Michel, 2001).

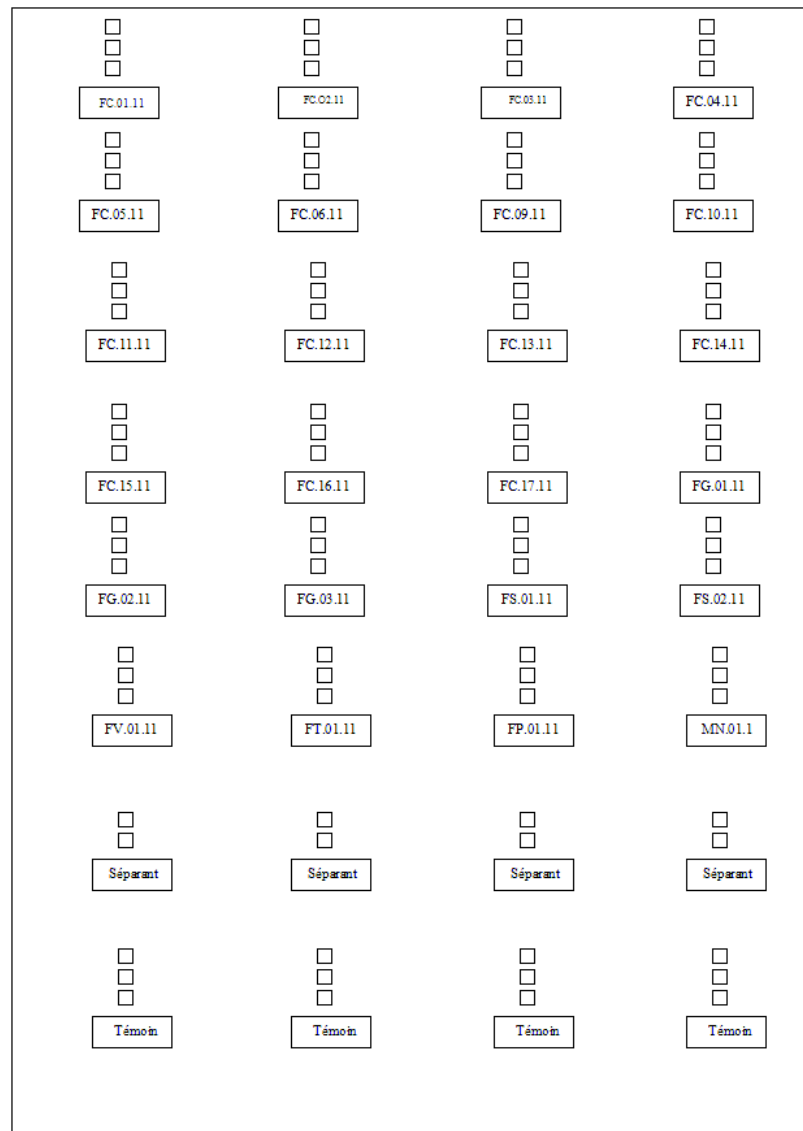


Figure 9. Schéma du dispositif expérimental du test de l'inoculation sur épi.

II.2.4. Etude *in vitro* de l'activité antagoniste de *Trichoderma* spp. vis-à-vis des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale*.

Le matériel fongique utilisé dans cette étude se compose d'agents pathogènes et d'agents antagonistes : Les isolats pathogènes utilisés dans cet essai ont été choisis de la collection précédente en se basant sur les résultats relatifs au test de pathogénicité sur épi. Ainsi 7 isolats ont été retenus (l'isolat le plus agressif de chaque espèce) : FC.13.11 (*F. culmorum*), FG.01.11 (*F. graminearum*), FS.02.11 (*F. solani*), FV.01.11 (*F. verticillioides*), FT.01.11 (*F. torulosum*), FP.01.11 (*F. poae*), MN.01.11 (*M. nivale*).

Les deux agents antagonistes utilisés sont deux isolats appartenant au genre *Trichoderma*. Le premier isolat appartient à l'espèce *T. atroviride*, le deuxième a été isolé à partir des racines de blé provenant de la région de Sétif.

II. 2.4.1. Isolement et identification de l'agent antagoniste

Des racines de blé présentant un aspect sain ont été découpées en fragments de 50 mm environ, ces derniers sont désinfectés et séchés puis déposés sur des boîtes de Petri contenant le milieu PDA. Les boîtes sont ensuite incubées à la température ambiante de laboratoire (22°C) sous lumière continue. Les colonies de *Trichoderma* sont reconnues par leur aspect cotonneux et la production de conidies verdâtres. Ces dernières sont repiquées dans des nouvelles boîtes du PDA. L'identification est réalisée sur la base de la morphologie du conidiophore, de ses ramifications, et des phialides avec leur mode de groupement.

II.2.4.2. Effet des isolats de *Trichoderma* spp. sur la croissance des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale*.

L'effet des isolats de *Trichoderma* sur la croissance mycélienne est étudié selon deux méthodes : la confrontation directe et la confrontation à distance.

II.2.4.2.1. Confrontation directe

La technique utilisée est celle décrite par Benhamou et Chet (1996). Cette technique consiste à placer dans la même boîte de Pétri (85 mm de diamètre) contenant le milieu PDA, deux explants (6 mm de diamètre prélevés d'une culture âgée de 7 jours) de l'agent antagoniste (*Trichoderma* spp.) et de *Fusarium* spp. Les deux explants sont placés suivant un axe diamétral de 5 cm et à équidistance du centre de la boîte (Fig. 10). L'incubation est réalisée à 25°C à l'obscurité pendant 7 jours. Des boîtes témoins ne contenant que l'agent pathogène sont incubées dans les mêmes conditions.

Des notations concernant l'inhibition de la croissance diamétrale des colonies de *Fusarium* spp. et *M. nivale* et leur envahissement par l'agent antagoniste sont effectuées tous les deux jours.

II.2.4.2.2. Confrontation à distance

Des explants de 6 mm de diamètre de l'agent antagoniste et de l'agent pathogène sont déposés dans deux boîtes séparées contenant le milieu PDA; par la suite, un assemblage est réalisé par superposition des deux boîtes, l'antagoniste en bas et le pathogène en haut. La jonction entre les deux boîtes est assurée par du parafilm afin d'éviter toute perte des substances volatiles (Fig. 10). Les boîtes sont incubées à l'obscurité à 25°C pendant 4 jours. Le témoin est formé par superposition de deux boîtes, celle du haut contenant un explant de *Fusarium*, alors que celle du bas ne contenant que le milieu PDA (Daami-Remadi et El Mahjoub, 2001).

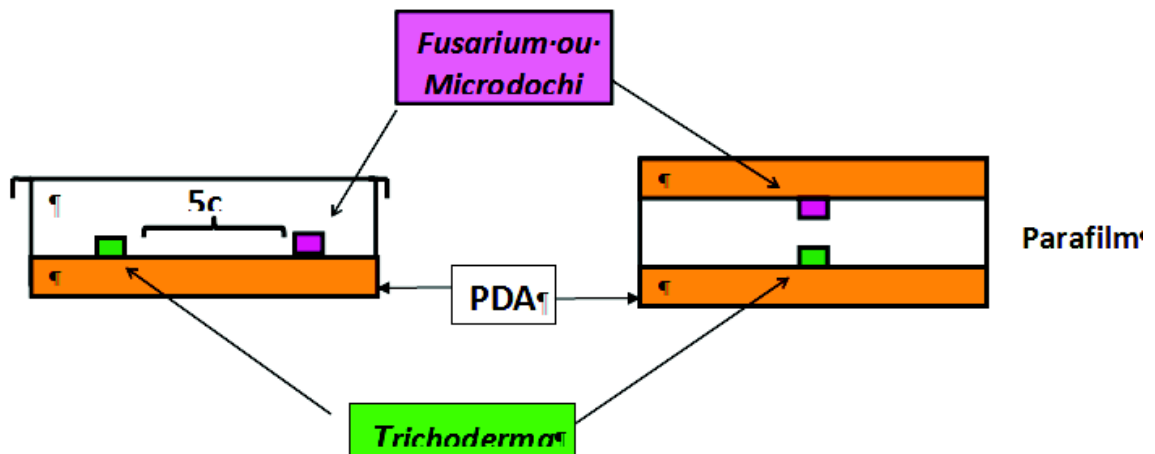


Figure 10. Schémamontrant laconfrontation directe (à gauche) et à la confrontation à distance (à droite).

Analyse statistique

Les résultats obtenus dans cette présente étude sont interprétés après une analyse de la variance par l'utilisation du logiciel STATISTICA version 6. Les différences entre les isolats pour les paramètres étudiés sont comparées par le biais du test LSD de Fisher au seuil de 5% (LSD : Least Significant Différence).

Les corrélations entre les différents paramètres étudiés sont déterminées par le calcul du coefficient de corrélation de Pearson par l'utilisation du même logiciel.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

III.1. Identification des isolats et étude de l'effet de la température sur leur croissance mycélienne.

III.1.1. Description et identification morphologique des isolats

Les isollements effectués à partir des épis, du collet, et des racines des plants de blé présentant les symptômes typiques de la fusariose de l'épi ainsi que de la pourriture racinaire ont abouti à l'obtention d'isolats qui appartiennent au genre *Fusarium* et à l'espèce *Microdochium nivale*.

Les isolats N° 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 19, 21 : sur milieu PDA donnent des colonies de couleur qui vire du blanc vers le rose. Le mycélium est aérien abondant, un pigment rouge se forme au contact de l'agar (Figs. 11a, b). Les macroconidies sont épaisses et faiblement arquées, la cellule apicale est arrondie et la cellule basale est échancrée et pas nettement pédicellée. Les conidies comportent en général 3 à 5 cloisons et mesurent 30-60 x 4-7 µm. La présence de chlamydozoospores portées par les macroconidies est également observée, les microconidies sont absentes (Figs. 11c, d, e). Cette description correspond à l'espèce *Fusarium culmorum* selon la description de Toussoun et Nelson (1976), Zillinsky (1983) et Leslie et Summerell (2006).

Les isolats N° 23, 24, 25 : sur milieu PDA, le mycélium est dense de couleur qui varie du blanc, rose, orange au marron et devient rouge au contact de l'agar avec des reflets plus au moins jaunes dans sa partie aérienne (Figs. 12a, b). Les macroconidies sont droites ou légèrement arquées, la cellule apicale est faiblement allongée et fortement courbée près du bout, la cellule basale est nettement pédicellée. Elles mesurent 5-50 x 2,5-5 µm. Elles présentent 5 à 6 cloisons. Les microconidies sont absentes, les chlamydozoospores sont rares. Cette description correspond à l'espèce *Fusarium graminearum* Schwabeselon Toussoun et Nelson (1976), Zillinsky (1983) et Leslie et Summerell (2006).

Les isolats N° 17 et 20 : cultivés sur milieu PDA, ces deux isolats donnent des colonies claires de couleur blanche à crème. Le mycélium est aérien et clairsemé (Figs. 13 a, b), les macroconidies sont légèrement arquées, présentant de 5 à 7 cloisons, la cellule basale pédicellée et la cellule apicale est arrondie. Elles mesurent de 27-46 x 3-4,5 µm (Fig. 13c). Les microconidies sont ovales ou fusiformes présentant de 0 à 1 cloison (Fig. 13d), le conidiophore qui donne naissance aux microconidies est relativement long, et les

chlamydozoospores sont abondantes. Cette description correspond à l'espèce *Fusarium solani* (Mart.) Sacc. selon Toussoun et Nelson (1976) et Leslie et Summerell (2006).

L'isolat N° 18 : cultivé sur milieu PDA donnent des colonies de couleur violacée. Le mycélium est subaérien et peu abondant, sa croissance est lente (Figs. 14a, b). Sur le plan microscopique, les macroconidies sont effilées, longues et légèrement arquées mesurent 27-48 x 3-4.5 µm, présentent 3 à 5 cloisons. Chez cet isolat, les macroconidies sont rares, tandis que les microconidies sont très abondantes, elles sont généralement ovales et monocellulaires (Fig. 14c). Selon les critères établis par Booth (1971), Toussoun et Nelson

(1971), cette description correspond à celle de l'espèce *Fusarium verticillioides* (Sacc.) Nirenberg. (Syn. *F. moniliforme*).

L'isolat N° 22 : sur milieu PDA donne des colonies à mycélium blanc. Cet isolat forme un pigment qui vire du jaune au marron au contact de l'agar (Figs. 15a, b). Les macroconidies sont falciformes avec une cellule apicale pointue et une cellule basale pédicellée, présentent généralement 5 cloisons, les microconidies sont ovales mono ou bicellulaires, et les chlamydo-spores sont abondantes (Fig. 15c). Cette description correspond à l'espèce *Fusarium torulosum* (Berkeley & Curtis) Nirenberg selon Leslie et Summerell (2006). Nirenberg (1995) rapporte la présence de *F. torulosum* dans les racines des céréales.

L'isolat N°26 : cultivé sur milieu PDA, cet isolat donne des colonies à mycélium aérien et abondant initialement pale devenant marron avec l'âge, un pigment rouge ou jaune se forme au contact de l'agar (Figs. 16a, b), les macroconidies sont relativement courtes avec une cellule apicale recourbée et effilée et une cellule basale bien développée, elles présentent de 3 à 5 cloisons mais généralement 3 et elles sont rares dans les cultures. Les microconidies sont globuleuses ou napiformes et présentent une papille, elles sont généralement non cloisonnées, et les chlamydo-spores sont abondantes (Fig. 16c). Cette description correspond à l'espèce *Fusarium poae* (Peck) Wollenweber selon Leslie et Summerell (2006).

L'isolat N°11 : sur milieu PDA donne des colonies de couleur abricot. Le mycélium est subaérien cotonneux (Figs. 17a, b), les macroconidies sont courtes, amincies aux deux extrémités, la cellule apicale est plus pointue que la cellule basale, de dimensions uniformes, 20-28 x 2,5-5 µm, elles comportent 1 à 3 cloisons. Cet isolat ne présente ni de microconidies ni de chlamydo-spores. Cette description correspond à l'espèce *Microdochium nivale* selon Toussoun et Nelson (1976) et Zillinsky (1983).

Tableau 7 . Critères de distinction des espèces de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* isolées

Fusarium spp	Macroconidies (µm)	Microconidies (µm)	Chlamydo-spores	Nombre de cloisons (macroconidies)
F .culmorum	30-60 x 4-7	absentes	présentes	3 à 5
F.graminearum	25-50 x 2,5-5	absentes	rare	5 à 6
F. solani	27-46 x 3- 4,5	abondantes	abondantes	5 à 7
F. verticillioides	27-48 x 3-4,5	abondantes	absentes	3 à 4
F. torulosum	-	présentes	abondantes	5
F. poae	20-40 x 3-4,5	présentes	présentes	3 à 5
M. nivale	15-22 x 2,5- 5	absentes	absentes	1 à 3

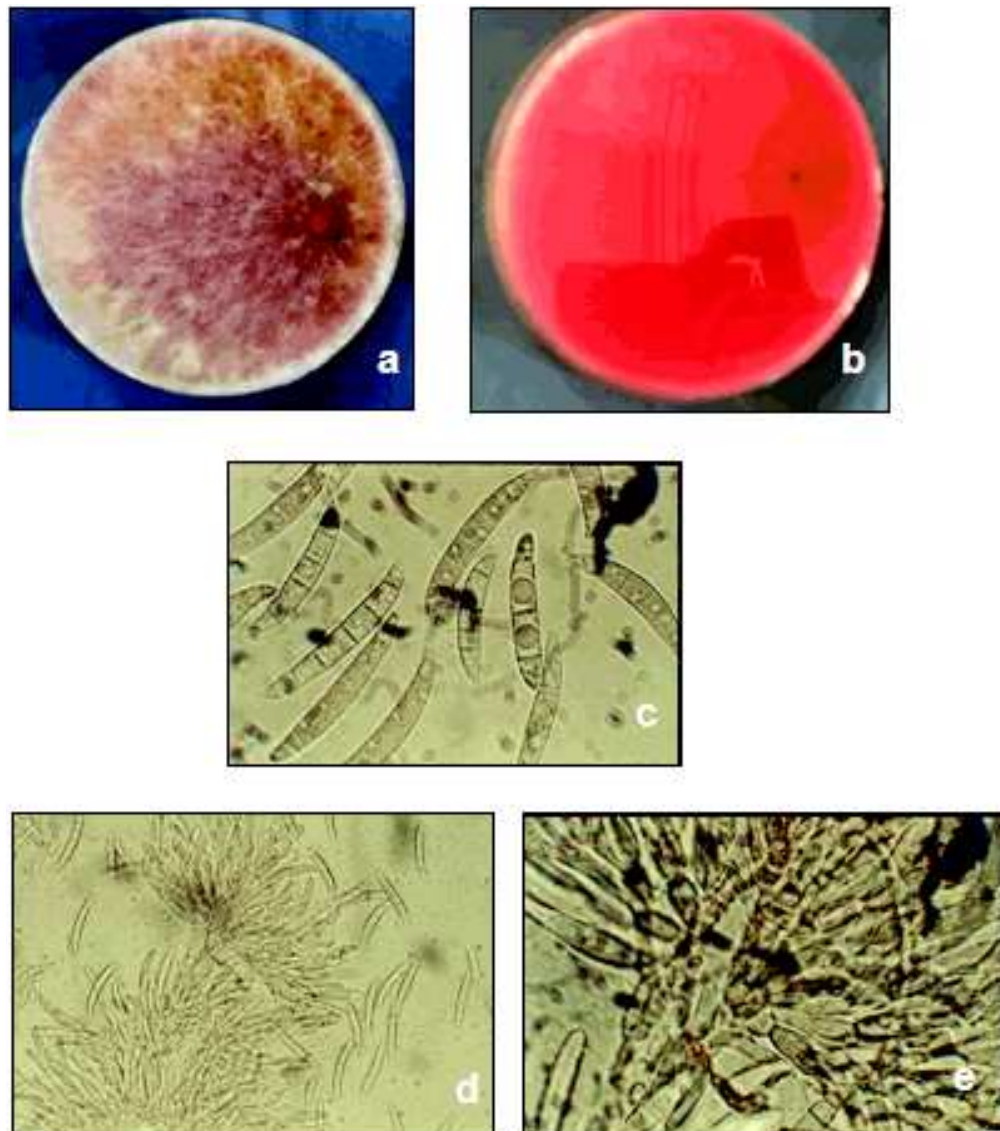


Figure 11. Aspect macroscopique et microscopique de *F. culmorum*, a : colonie de *F. culmorum* sur milieu PDA, b : revers de la colonie, c : macroconidies (gr: 100 x 3,2), d : sporodochie (gr : 55 x 3,2), e : sporodochie (gr : 100 x 3,2).

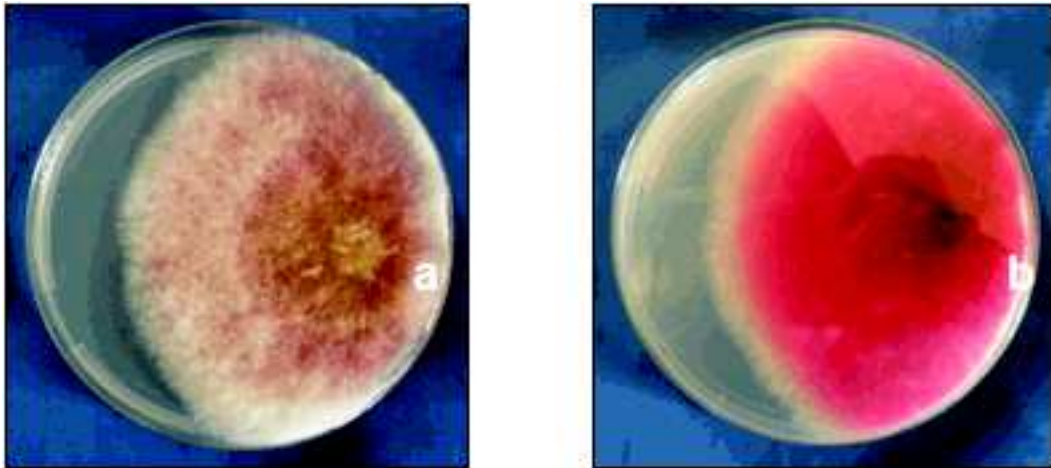


Figure 12. Aspect macroscopique de *F. graminearum*,
a : colonie sur milieu PDA, b : revers de la colonie.

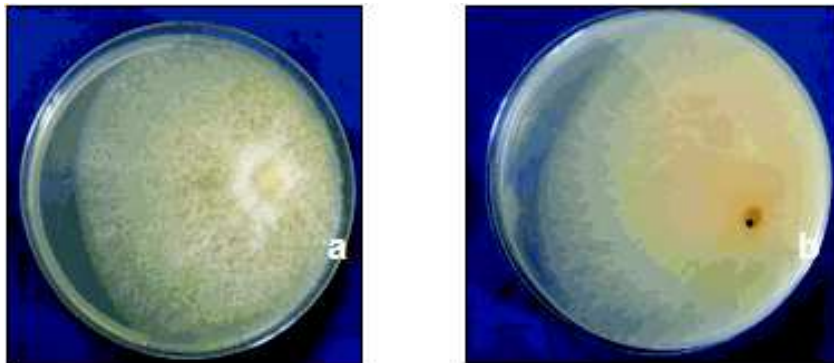


Figure 13. Aspect macroscopique et microscopique de *F. solani*, **a** : colonie sur milieu PDA, **b** : revers de la colonie, **c** : macroconidies (gr : 100 x 3,2), **d** : microconidies (gr : 100 x 3,2).

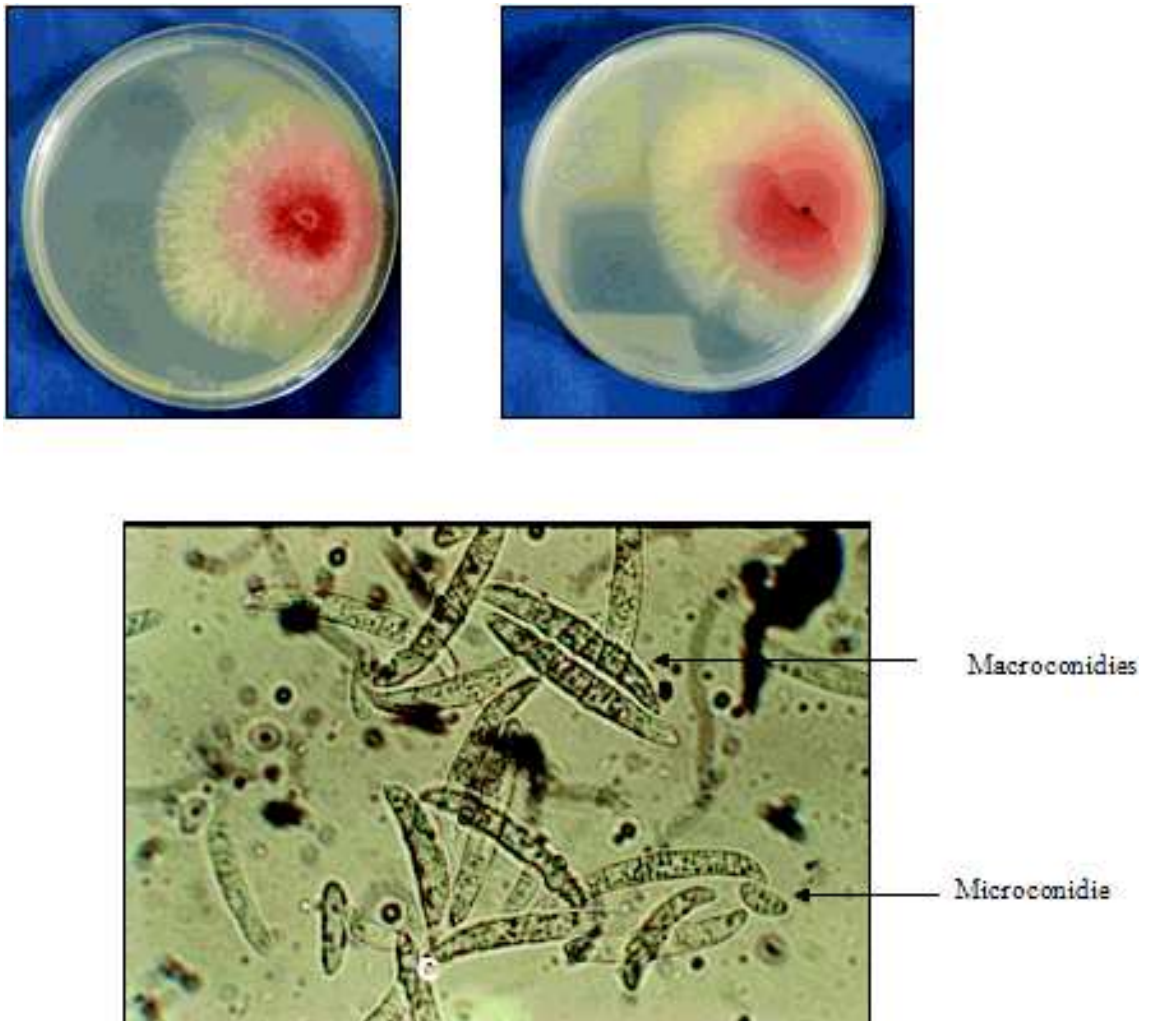


Figure 14. Aspect macroscopique et microscopique de *F. verticillioides*, **a** : aspect de la colonie sur milieu PDA, **b** : revers de la colonie, **c** : aspect microscopique du champignon, macroconidies et microconidies (gr : 100 x 3,2).

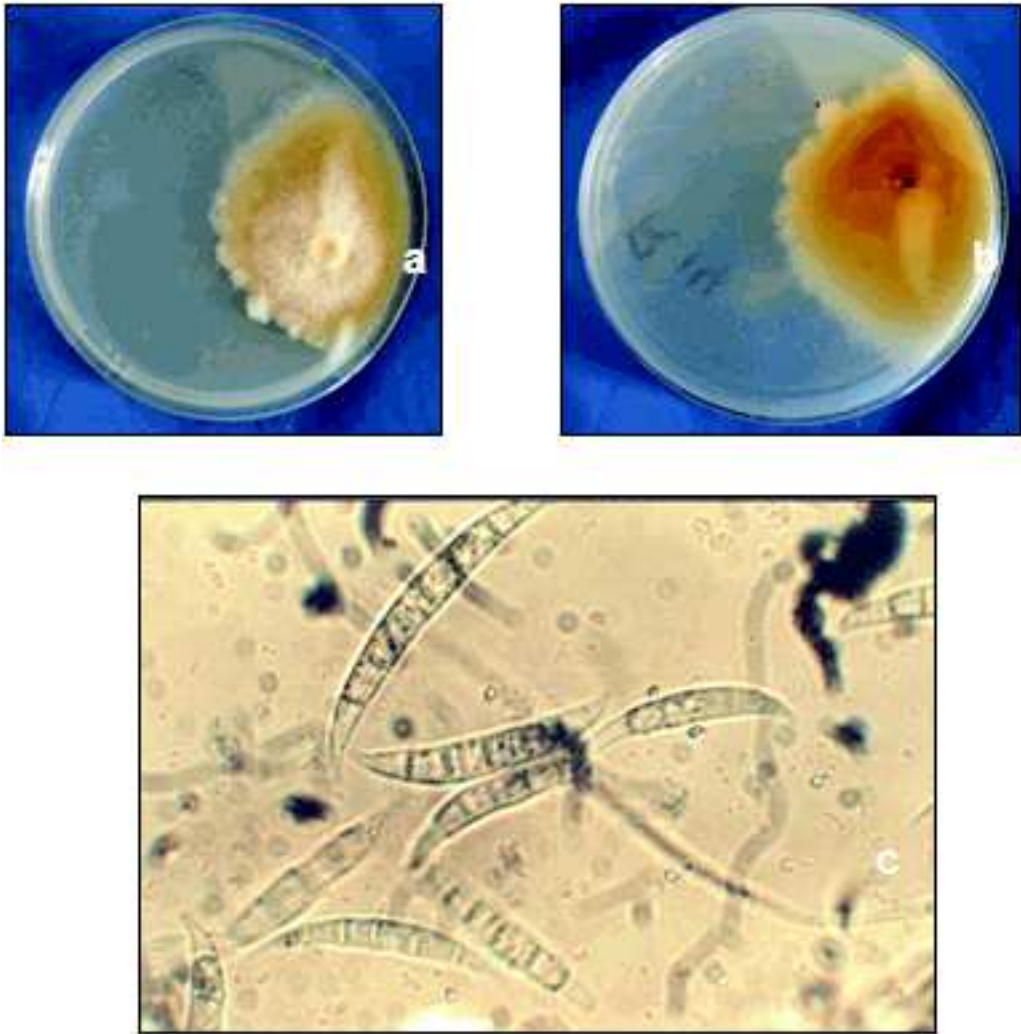


Figure 15. Aspect macroscopique et microscopique de *F. torulosum*, **a** : aspect de la colonie sur milieu PDA, **b** : revers de la colonie, **c** : macroconidies (gr : 100 x 3,2)

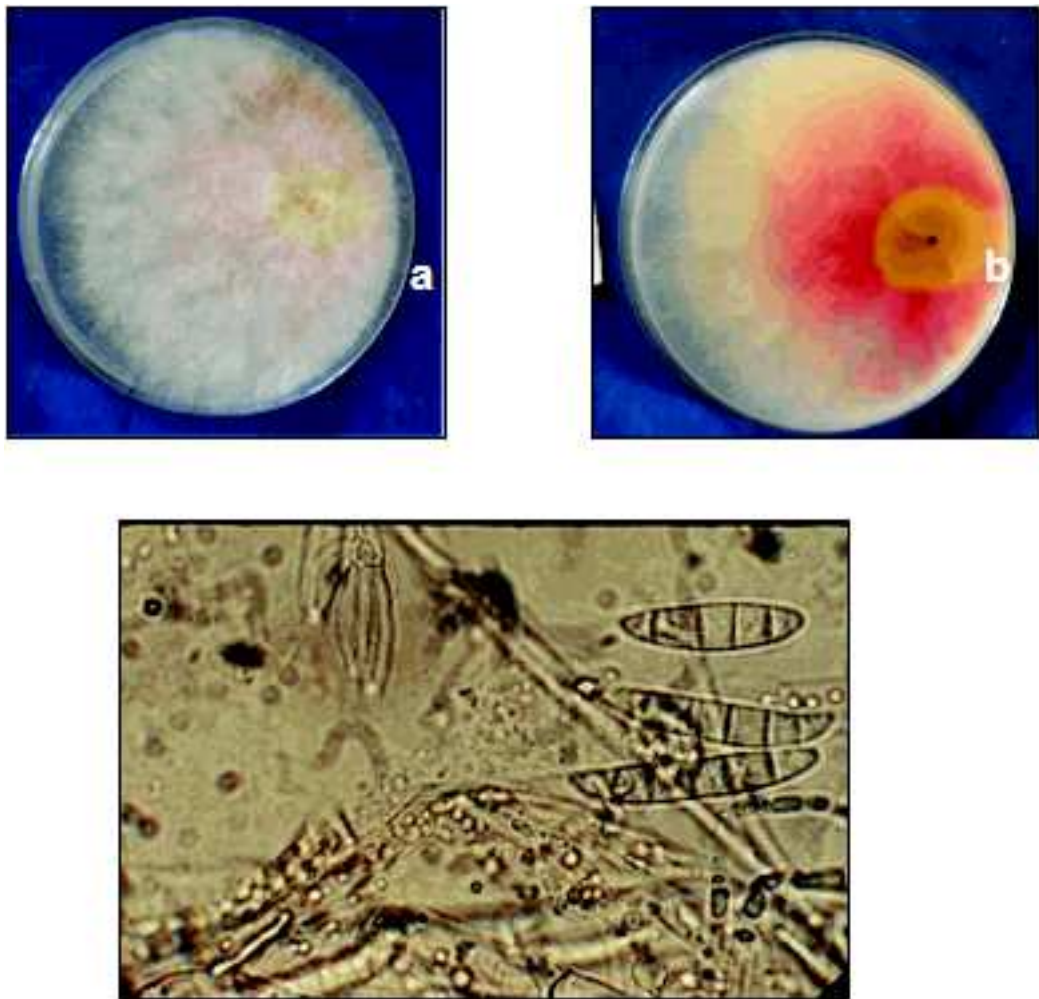


Figure 16. Aspect macroscopique et microscopique de *F. poae*, **a** : aspect de la colonie sur milieu PDA, **b** : revers de la colonie, **c** : aspect microscopique (gr : 100 x 3,2).

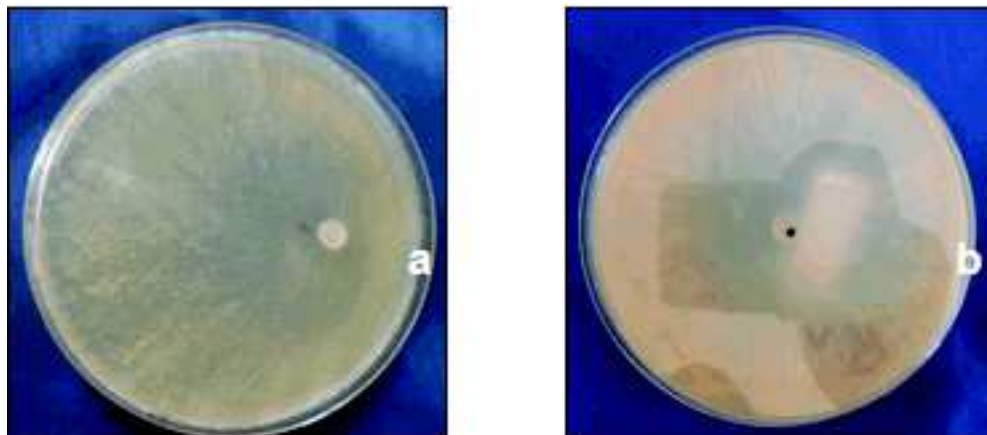


Figure 17. Aspect macroscopique de *M. nivale*, **a** : colonie sur milieu PDA, **b** : revers de la colonie.

III.1.2. Effet de la température sur la croissance mycélienne des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale*

Les 26 isolats appartenant aux différentes espèces du genre *Fusarium* et à l'espèce *M. nivale* sont incubés à différentes températures (15, 20, 25 et 30°C) afin de définir la température optimale pour chaque espèce. Les résultats obtenus montrent que parmi les températures testées, la température optimale de croissance de *F. culmorum* et de *F. graminearum* est de 25°C avec un diamètre moyen de 84,8 et 78 mm respectivement après 4 jours d'incubation ; tandis que les isolats des espèces *F. solani*, *F. verticilloides* et *F. torulosum* ont une croissance plus élevée à 30°C avec des diamètres moyens de 38, 46 et 41 mm respectivement. Enfin, la température optimale des isolats appartenant aux espèces *F. poae* et *M. nivale* est de 20°C avec des diamètres moyens de 76 et 47 mm respectivement (Tableau 8, Fig. 18).

Il est également remarqué que le taux de croissance le plus rapide à toutes les températures d'incubation est enregistré chez les isolats appartenant à l'espèce *F. culmorum* avec une croissance moyenne de 8,95 mm/ jour, suivi de *F. poae* et *F. graminearum* avec des taux moyens de croissance de 8,25 et 8,17 mm/ jour respectivement, tandis que l'espèce la plus lente est *F. torulosum* avec un taux moyen de croissance de 3,77 mm/ jour (Tableau 9, Fig. 19).

La croissance mycélienne des isolats appartenant aux espèces *F. culmorum* et *F. graminearum* augmente entre 15 et 25°C et diminue entre 25 et 30°C et celle des isolats de *F. solani*, *F. verticilloides* et *F. torulosum* augmente entre 15 et 30°C, tandis que la croissance mycélienne de *F. poae* et *M. nivale* augmente entre 15 et 20°C et diminue entre 20 et 30°C (Fig. 20).

L'analyse de la variance de la croissance mycélienne montre l'existence d'une différence très hautement significative entre les différentes espèces pour la même température et au sein de la même espèce pour les quatre températures d'incubation (Annexe 2).

Espèce	Diamètre moyen des colonies (mm) après 4 jours d'incubation à :			
	15°C	20°C	25°C	30°C
<i>F. culmorum</i>	59,4 d	60,8 c	84,8 f	81 c
<i>F. graminearum</i>	53 cd	71 d	78 e	59 bc
<i>F. solani</i>	26 ab	31 a	33 a	38 a
<i>F. verticillioides</i>	22 a	27 a	43 c	46 ab
<i>F. torulosum</i>	20 a	29 a	31 a	41 a
<i>F. poae</i>	62 d	76 d	55 d	70 cd
<i>M. nivale</i>	40 bc	47 b	39 b	33 a

Tableau 8. Diamètre moyen (mm) des espèces de *Fusarium* spp. et *M. nivale* après 4 jours d'incubation à 15, 20, 25 et 30°C.

Les valeurs qui sont suivies de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes selon le test de LSD de Fisher au seuil de 5%.

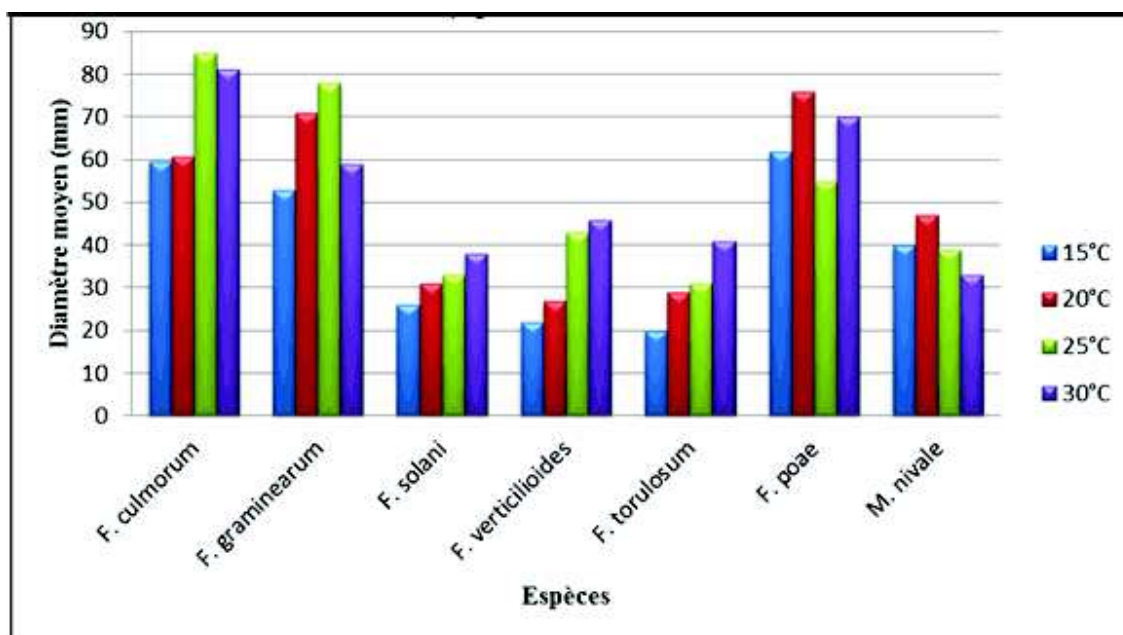


Figure 18. Diamètre moyen (mm) des espèces de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* après 4 jours d'incubation à 15, 20, 25 et 30°C.

Espèce	Croissance mycélienne (mm/ jour) après 4 jours d'incubation à :			
	15°C	20°C	25°C	30°C
<i>F. culmorum</i>	7,4 d	7,6 c	10,6 f	10,1 c
<i>F. graminearum</i>	6,6 cd	8,9 d	9,8 e	7,4 bc
<i>F. solani</i>	3,3 ab	3,9 a	4,1 a	4,8 a
<i>F. verticillioides</i>	2,8 a	3,4 a	5,4 c	5,8 ab
<i>F. torulosum</i>	2,5 a	3,6 a	3,9 a	5,1 a
<i>F. poae</i>	7,8 d	9,5 d	6,9 d	8,8 cd
<i>M. nivale</i>	5,0 bc	5,9 b	4,9 b	4,1 a

Tableau 9. Croissance mycélienne moyenne (mm/ jour) des isolats de *Fusarium spp.* et de *M. nivale* après 4 jours d'incubation à 15, 20, 25 et 30°C.

Les valeurs qui sont suivies de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes selon le test de LSD de Fisher au seuil de 5%.

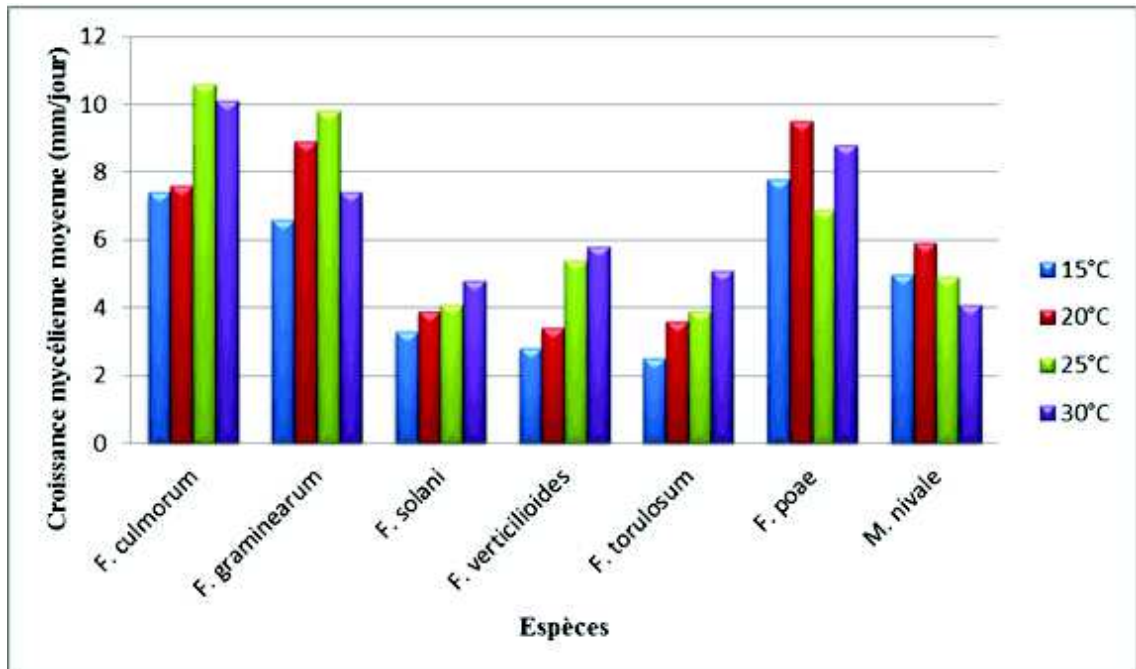


Figure 19. Croissance mycélienne moyenne (mm/jour) des espèces de *Fusarium spp.* et de *M. nivale* après 4 jours d'incubation à 15, 20, 25 et 30°C.

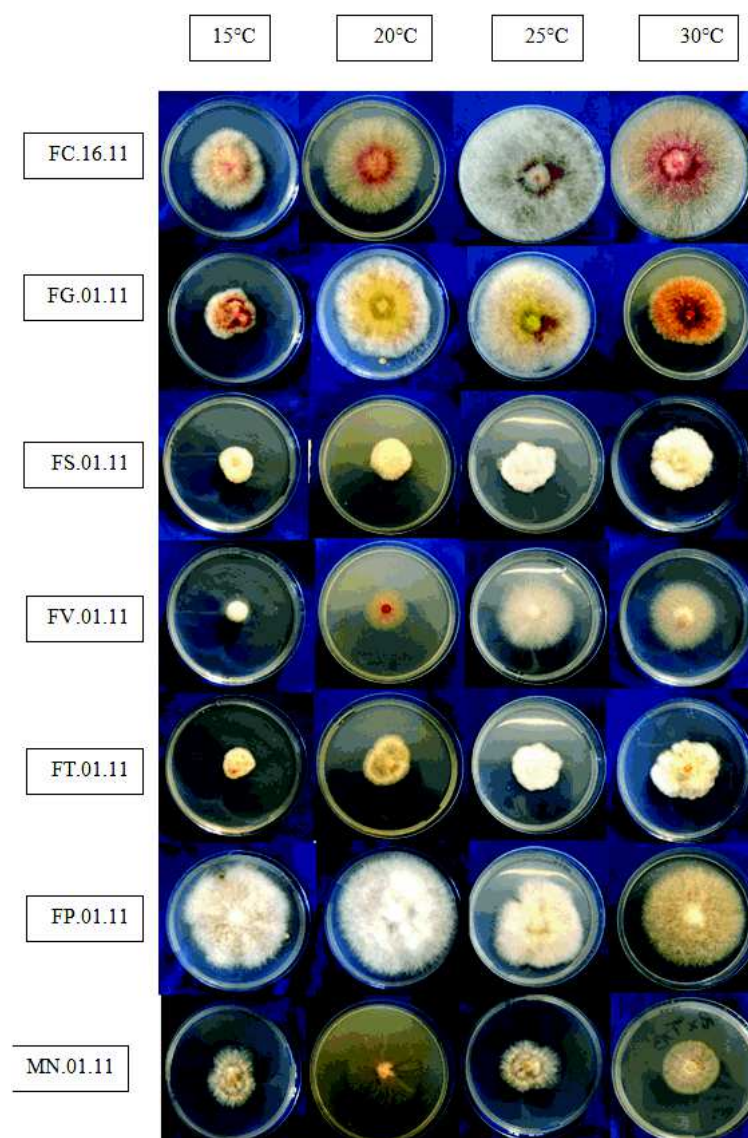


Figure 20. Croissance mycélienne des isolats appartenant à *F. culmorum*, *F. graminearum*, *F. solani*, *F. verticillioides*, *F. poae* et *M. nivale* respectivement après 4 jours d'incubation à 15, 20, 25 et 30°C

Discussion

Les isolats obtenus à partir des épis, du collet et des racines du blé présentant les symptômes typiques de la fusariose appartiennent au genre *Fusarium* et à l'espèce *M. nivale*. Les études qui ont porté sur l'observation macroscopique (l'aspect cultural, la coloration du mycélium, présence ou absence de pigment dans le milieu ainsi que sa couleur) et microscopique (la forme et la taille des macroconidies, la présence ou l'absence des microconidies ou des chlamydospores), ont abouti à la détermination des espèces. Il s'agit de : *F. culmorum*, *F. graminearum*, *F. solani*, *F. verticillioides*, *F. torulosum*, *F. poae* et *M. nivale*. L'identification des espèces fongiques isolées a été basée principalement sur les

clés de détermination établies par Tousson et Nelsson (1976), Booth (1971) ainsi que les descriptions proposées par Zillinsky (1983), Leslie et Summerell (2006).

La collection obtenue est composée de 26 isolats appartenant aux genres *Fusarium* et *Microdochium*. Une variabilité dans la dominance des espèces est notée, ainsi l'espèce *F. culmorum* est la plus dominante (17 isolats), suivie par *F. graminearum* (3 isolats), puis *F. solani* (2 isolats), alors que le reste des espèces sont représentées par un seul isolat.

Plusieurs travaux sont en accord avec ces résultats : Parry et al. (1995) ont conclu que *F. graminearum* et *F. culmorum* sont les espèces les plus dominantes sur blé. Ces mêmes auteurs expliquent que la dominance de chaque espèce dans une région donnée est influencée par les conditions climatiques de cette dernière, surtout la température. *F. culmorum* a été identifiée comme l'espèce la plus dominante dans l'ouest de l'Allemagne (Muthomi et al., 2000). Kosiak et al. (2003) rapportent que *F. culmorum* est parmi les quatre espèces les plus fréquemment isolées du genre *Fusarium* à partir du blé, d'orge et de l'avoine en Norvège. Clear et Patrick (2006) classent *F. culmorum* avec *F. graminearum* et *F. avenaceum* parmi les trois espèces les plus dominantes responsables de la fusariose des céréales au Canada. *F. graminearum* semble être plus dominant dans les régions tempérées et les zones humides du monde comme les Etats Unis (Goswami and Kistler, 2004 ; Vigier et al., 1997), alors que *F. culmorum* domine dans les régions à basse température comme le nord, le centre et l'est de l'Europe (Parry et al., 1995). Selon Chekali et al. (2010), *F. culmorum* est considérée comme la principale espèce qui cause la pourriture racinaire en Afrique du Nord.

Plusieurs auteurs rapportent la présence d'autres espèces dans le complexe fongique responsable de la fusariose du blé : *F. poae* et *M. nivale* avaient été rapportées par Brennan et al. (2003). Tan et Niessen (2003) ont rapporté que *F. verticillioides*, et *F. solani* ont été isolées à partir des graines des céréales atteintes de la fusariose. Nirenberg (1995) avait indiqué dans ses travaux la présence de *F. torulosum* dans les racines des céréales.

Selon Burgess et al. (1975), deux populations morphologiquement identiques se distinguent chez *G. zae* (*F. graminearum*). Les isolats du groupe 2 qui sont homothaliques et produisent en culture des périthèces. Par contre, les isolats du groupe 1 n'en produisent pas et sont présumés être hétérothaliques. Ces deux groupes sont classés en deux espèces dénommées *F. pseudograminearum* Aoki & O'Donnell pour le groupe 1 et *F. graminearum* pour le groupe 2 (Aoki et O'Donnell, 1999). Comme peu de traits morphologiques permettent la distinction entre ces deux groupes, l'identification moléculaire peut palier à ce problème. Dans notre étude, *F. graminearum* isolé a été identifié uniquement en se basant sur les critères morphologiques. Pour cela, les trois isolats sont considérés comme étant *F. graminearum*.

L'étude de la croissance mycélienne des isolats à différentes températures montre que l'optimum de croissance est de 25°C pour les espèces *F. culmorum* et *F. graminearum*, 20°C pour *F. poae* et *M. nivale*, tandis que les isolats des espèces *F. solani*, *F. verticillioides* et *F. torulosum* ont une croissance plus élevée à 30°C.

Les résultats obtenus dans cette étude sont en accord avec ceux obtenus par Brennan et al. (2003) qui ont trouvé que la température optimale de croissance de *F. culmorum* et *F. graminearum* est 25°C, et celle de *M. nivale* est 20°C. Wagacha et Muthomi (2007) ont signalé que la croissance mycélienne de *F. culmorum* augmente entre 25 et 30°C, tandis que sa température optimale est comprise entre 20-25°C. Campbell et Lipps (1998) rapportent que *F. graminearum* isolé aux Etats Unis est doté d'un optimum de croissance de 25°C.

Pettitt et *al.* (1996) ont trouvé que la température optimale de *F. culmorum* est comprise entre 20 et 25°C, tandis que *M. nivale* croit mieux à 20°C.

Selon Burgess et *al.* (1994), la croissance mycélienne de *F. solani* et *F. verticillioides* augmente entre 25 et 30°C, ils rapportent que le diamètre moyen de la colonie de *F. solani* après 3 jours d'incubation est comprise entre 2,1 et 2,9 cm à 25°C et entre 2,6 et 3,6 cm à 30°C, alors que le diamètre moyen de la colonie de *F. verticillioides* après 3 jours d'incubation à 25°C est compris entre 2,9 et 3,9 cm, et entre 3 et 4 cm à 30°C. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus dans cette étude.

III.2. Etude pathologique des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale*

III.2.1. Effet des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* sur la croissance du coléoptile *in vitro*

Le test de pathogénicité est réalisé à différentes températures (15, 20, 25 et 30°C). Le degré d'agressivité des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* est exprimé par le pourcentage de réduction de la croissance du coléoptile par rapport au témoin non inoculé (Tableau 11, Fig. 23).

L'agressivité des isolats varie selon les espèces, selon les températures d'incubation mais une variabilité est également notée aussi entre les différents isolats de la même espèce (Tableau 10, Fig. 21). La température d'incubation qui montre des pourcentages de réduction de la croissance du coléoptile les plus élevés par rapport au témoin est 20°C en moyenne pour tous les isolats, suivie de 25, 15 puis 30°C (Annexe 3, Tableaux 1 et 3).

L'isolat le plus agressif au niveau des quatre températures d'incubation est FG.03.11 de l'espèce *F. graminearum* avec un pourcentage moyen de réduction de la croissance du coléoptile de 100%, et l'isolat le moins agressif est FS.01.11 de l'espèce *F. solani* avec un pourcentage de réduction moyen de 59,2% (Annexe 3, Tableau 4).

L'analyse de la variance de la croissance du coléoptile montre d'une part l'existence d'une différence très hautement significative entre les différents isolats et les témoins non inoculés et d'autre part entre les différentes espèces, il est noté aussi que l'agressivité de l'espèce diffère selon les températures d'incubation (Annexe 3, Tableau 1).

Les analyses statistiques ont permis de classer les espèces selon l'agressivité en deux groupes : l'un est composé de 4 espèces : *F. graminearum*, *F. culmorum*, *F. poae* et *F. verticillioides*, ces dernières présentent des pourcentages moyens de retard de la croissance du coléoptile de 95.17, 92.68, 92.67 et 90.95 % respectivement, et le deuxième groupe est composé de *F. torulosum*, *M. nivale* et *F. solani* avec des pourcentages moyens de réduction de la croissance du coléoptile de 81.42, 81.36 et 78.41% respectivement (Annexe 3, Tableau 2).

La température à laquelle l'espèce présente le pourcentage de réduction de la croissance de coléoptile le plus élevé est variable selon les espèces. Ainsi pour l'espèce *F. culmorum* cette température est 25°C suivie de 20°C, puis 15°C et la température où ce pourcentage est le plus réduit est 30°C. Tandis que *F. graminearum*, *F. torulosum* et *F. poae* présentent une agressivité élevée à 20°C avec des pourcentages moyens de réduction de

99.04, 89.28 et 100% respectivement. Enfin les trois espèces *F. solani*, *F. verticillioides* et *M. nivale* sont plus agressives à 15°C avec des pourcentages de réduction de la croissance du coléoptile de 85.83, 96.19 et 90.71 respectivement (Tableau 12, Fig. 22, Annexe 3, Tableaux 6, 7, 8, 9, 10, 11 et 12).

Corrélation entre la croissance mycélienne des isolats et leur agressivité

Les corrélations entre la croissance mycélienne des isolats à différentes températures (15, 20, 25 et 30°C) et leur agressivité évaluée par le pourcentage de retard de la croissance de coléoptile par rapport au témoin dans les mêmes températures sont calculées pour chaque espèce. La corrélation positive la plus élevée est trouvée chez *M. nivale* ($r = 0,42$), suivie de *F. graminearum* ($r = 0,35$), ces corrélations sont significatives et montrent que ces espèces ont tendance à être plus agressives lorsqu'elles sont dans des températures proches de leur température de croissance optimale. Pour les autres espèces, les corrélations sont négatives, elles sont significatives pour *F. verticillioides* ($r = -0,67$) et *F. torulosum* ($r = -0,59$), et non significatives pour *F. culmorum* ($r = -0,09$) et *F. solani* ($r = -0,08$) (annexe 7, Tbleaux 1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7).

Espèce	Isolat	Longueur moyenne du coléoptile (mm) après 4 jours d'incubation à :			
		15°C	20°C	25°C	30°C
<i>F. culmorum</i>	FC.01.11	0,2 ab	0,0 a	0,8 ab	3,4 fg
	FC.02.11	0,9 def	0,2 abc	0,3 a	5,9 i
	FC.03.11	0,9 def	0,0 a	0,0 a	4,7 hi
	FC.04.11	1,2 efg	0,2 abc	0,0 a	0,9 abcd
	FC.05.11	0,8 cde	0,0 a	0,0 a	3,6 gh
	FC.06.11	1,9 ijk	0,0 a	0,0 a	7,6 i
	FC.07.11	1,5 ghi	0,0 a	0,0 a	1,9 cde
	FC.08.11	4,5 m	1,0 cde	0,5 a	2,2 ef
	FC.09.11	2,2 k	0,0 a	0,0 a	0,8 abcd
	FC.10.11	2,3 kl	0,0 a	0,0 a	1,3 bcde
	FC.11.11	2,1 jk	0,6 abcde	2,5	3,6 efg
	FC.12.11	1,6 ghi	0,9 bcde	0,0 a	1,1abcde
	FC.13.11	1,7 hij	0,0 a	0,0 a	1,2abcde
	FC.14.11	0,0 a	0,0 a	0,0 a	0,7 abc
	FC.15.11	0,0 a	0,5 abcd	0,0 a	0,6 abc
	FC.16.11	0,6 bed	0,0 a	0,0 a	2,1 def
	FC.17.11	0,0 a	0,0 a	0,4 a	2,0 de
<i>F. graminearum</i>	FG.01.11	0,9 def	0,0 a	0,8 ab	1,5bcde
	FG.02.11	0,0 a	0,4 abc	2,0 c	1,4bcde
	FG.03.11	0,0 a	0,0 a	0,0 a	0,0 a
<i>F. solani</i>	FS.01.11	1,2 efg	6,2 g	7,8 e	7,5 j
	FS.02.11	2,7 l	2,0 f	0,2 a	0,3 ab
<i>F. verticillioides</i>	FV.01.11.	0,5 bcd	1,3 def	1,7 bc	1,4bcde
<i>F. torulosum</i>	FT.01.11	1,5 ghi	1,5 ef	4,0 d	3,3 fg
<i>F. poae</i>	FP.01.11	0,4 abc	0,0 a	1,6 bc	2,0 de
<i>M. nivale</i>	MN.01.11	1,3 fgh	2 f	2,5 d	3,6 gh
Témoin		14 m	14 h	14 f	14 k

Tableau 10. Longueur moyenne du coléoptile (mm) sous l'effet des isolats de *Fusarium spp.* et de *M. nivale* après 4 jours d'incubation à 15, 20, 25 et 30°C.

Les valeurs qui sont suivies de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes selon

le test de LSD de Fisher au seuil de 5%.

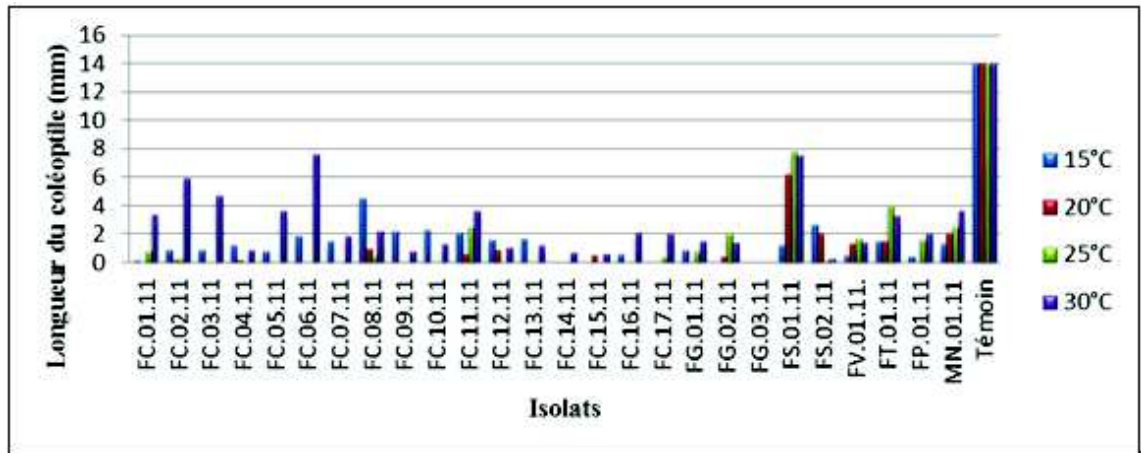


Figure 21. Longueur du coléoptile (mm) sous l'effet des isolats de *Fusarium spp.* et de *M. nivale* après 4 jours d'incubation à 15, 20, 25 et 30°C.

Tableau 11. Pourcentage de réduction de la croissance du coléoptile par rapport au témoin, sous l'effet des isolats de *Fusarium spp.* et de *M. nivale* après 4 jours d'incubation à 15, 20, 25 et 30°C.

Espèce	Isolat	Pourcentage de réduction de la croissance du coléoptile après 4 jours d'incubation à			
		15°C	20°C	25°C	30°C
<i>F. culmorum</i>	FC.01.11	98,6 lm	100,0 f	94,3 de	75,7 de
	FC.02.11	93,6 hij	98,6 ef	97,9 e	57,9 b
	FC.03.11	93,6 hij	100,0 f	100,0 e	66,4 bc
	FC.04.11	91,4 ghi	98,6 ef	100,0e	93,6 ghij
	FC.05.11	94,3 ijk	100,0 f	100,0 e	74,3 cd
	FC.06.11	86,4 cde	100,0 f	100,0 e	45,7 b
	FC.07.11	89,3 efg	100,0 f	100,0 e	86,4 fgh
	FC.08.11	67,9 a	92,9 cde	96,4 e	84,3 ef
	FC.09.11	84,3 c	100,0 f	100,0 e	94,3 ghij
	FC.10.11	83,6 bc	100,0 f	100,0 e	90,7 fghi
	FC.11.11	85,0 cd	95,7 cdef	82,1 e	74,3 def
	FC.12.11	88,6 efg	93,6 cde	100,0 e	92,1 fghij
	FC.13.11	87,9 def	100,0 f	100,0 e	91,4 fghij
	FC.14.11	100,0 m	100,0 f	100,0 e	95,0 hij
	FC.15.11	100,0 m	96,4 def	100,0 e	95,7 hij
	FC.16.11	95,7 jkl	100,0 f	100,0 e	85,0 efg
	FC.17.11	100,0 m	100,0 f	97,1 e	85,7 fg
<i>F. graminearum</i>	FG.01.11	93,6 hij	100,0 f	94,3 de	89,3 fghi
	FG.02.11	100,0 m	97,1 ef	85,7 c	90,0 fghi
	FG.03.11	100,0 m	100,0 f	100,0e	100,0 g
<i>F. solani</i>	FS.01.11	91,4 ghi	55,7 a	44,3 a	46,4 a
	FS.02.11	80,7 b	85,7 b	98,6 e	97,9 fghi
<i>F. verticillioides</i>	FV.01.11.	96,4 jkl	90,7 bcd	87,9 cd	90,0 ij
<i>F. torulosum</i>	FT.01.11	89,3 efg	89,3 bc	71,4 b	76,4 de
<i>F. poae</i>	FP.01.11	97,1 klm	100,0 f	88,6 cd	85,7 fg
<i>M. nivale</i>	MN.01.11	90,7 fgh	85,7 b	82,1 b	74,3 cd

Les valeurs qui sont suivies de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes selon le test de LSD de Fisher au seuil de 5%.

Tableau 12. Pourcentage moyen de réduction de la croissance du coléoptile par rapport au témoin sous l'effet des espèces de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* après 4 jours d'incubation à 15, 20, 25 et 30°C.

Espèce	Pourcentage moyen de réduction de la croissance du coléoptile après 4 jours d'incubation à			
	15°C	20°C	25°C	30°C
<i>F. culmorum</i>	90,60 c	98,57 d	98,10 d	81,67 bc
<i>F. graminearum</i>	97,86 d	99,03 de	93,33 cd	93,10 c
<i>F. solani</i>	86,05 a	70,70 a	71,45 ab	72,15 b
<i>F. verticillioides</i>	96,40 cd	90,70 bcd	87,90 bc	90,00 bc
<i>F. torulosum</i>	89,30 ab	89,30 bc	71,40 a	76,40 bc
<i>F. poae</i>	97,10 cd	100 def	88,60 bcd	85,70 bc
<i>M. nivale</i>	90,70 a	85,70 b	82,10 ab	74,30 ab

Les valeurs qui sont suivies de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes selon le test de LSD de Fisher au seuil de 5%.

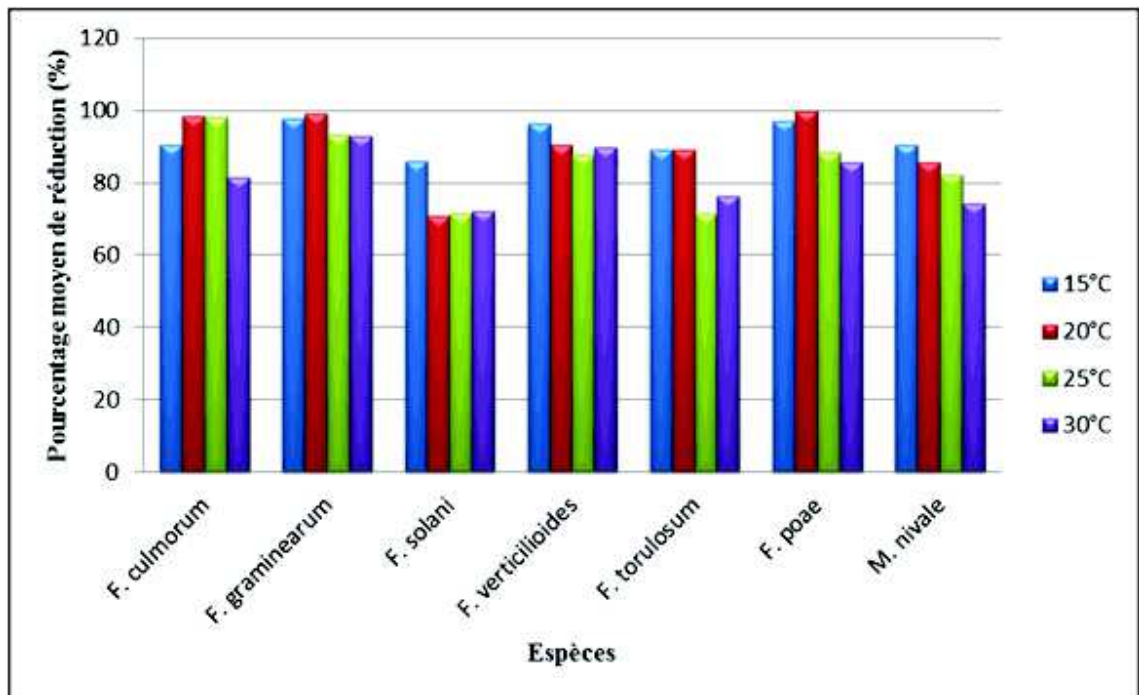


Figure 22. Pourcentage moyen de réduction de la croissance du coléoptile par rapport au témoin, sous l'effet des espèces de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* après 4 jours d'incubation à 15, 20, 25 et 30°C.*

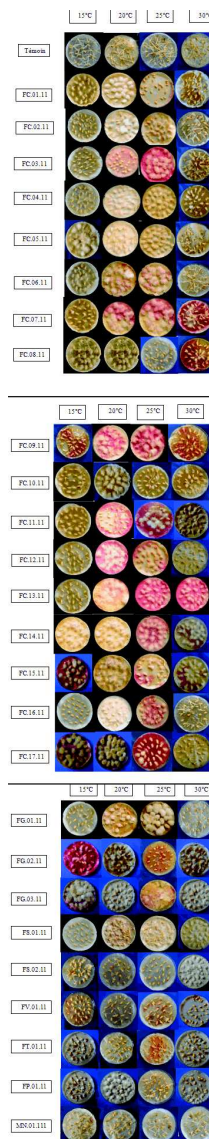


Figure 23. Effet des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* sur la croissance de coléoptile après 4 jours d'incubation à 15, 20, 25 et 30°C.

III.2.2. Etude de l'agressivité des isolats de *Fusarium* spp. et de *Microdochium nivale* sur le collet

Afin d'évaluer l'agressivité des espèces de *Fusarium* spp. et de *M. nivale*, un suivi est réalisé quotidiennement jusqu'au 45^{ème} jour après le semis, et des notations sont faites après arrachage des plants de blé. Ces dernières sont faites avec une échelle de notation de 0 à 3 (Fig. 27).

Pour le témoin négatif, durant la période de l'essai, aucun symptôme n'a été observé (Fig. 26a, b). Pour les plants issus des graines de blé semées dans un sol inoculé, le début d'apparition des symptômes est observé au 15^{ème} jour après le semis par un noircissement au niveau du collet. La taille de la nécrose évolue avec le temps, et d'autres se forment sur la tige.

Après arrachage des plants, 45 jours après le semis, les symptômes observés sont un rétrécissement des racines et des nécroses au niveau du collet et de la tige (Figs. 26c, 28).

Pour la même espèce une variabilité dans l'indice de maladie est notée, tel que pour les isolats des espèces de *F. culmorum*, *F. graminearum* et *F. solani* où une différence très hautement significative existe entre les isolats (Annexe 4). L'isolat le plus agressif est FG.01.11 (*F. graminearum*) avec un indice d'attaque de 2,5 suivis de FC.10.11 (*F. culmorum*) avec un indice d'attaque de 2,4, alors que l'isolat le moins agressif est FS.02.11 de l'espèce *F. solani* (Tableau 13, Fig. 24).

Un indice d'agressivité moyen est calculé pour chaque espèce, ainsi les indices de maladie chez les plants inoculés indiquent que l'espèce la plus agressive est *F. graminearum* avec un indice de maladie moyen de 1,74 suivi de *F. culmorum* avec un indice moyen de 1,15. Le classement des espèces a permis de distinguer 3 groupes selon le degré d'agressivité où *F. culmorum* et *F. graminearum* forment deux groupes différents alors que les autres espèces forment le même groupe avec le témoin (Tableau 14, Fig. 25, Annexe 4).

Figure 24. Indice de la maladie des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* sur le collet.

Espèce	Isolat	Indice de la maladie
<i>F. culmorum</i>	FC.01.11 (collet)	0,6 bcde
	FC.02.11 (collet)	0,7 cdef
	FC.03.11 (racine)	0,7 defg
	FC.04.11 (collet)	1,2 hij
	FC.05.11 (collet)	1 efghi
	FC.06.11 (collet)	1,5 jk
	FC.07.11 (collet)	1,2 ghid
	FC.08.11 (collet)	0,9 efg
	FC.09.11 (épi)	1,0 fghi
	FC.10.11 (épi)	2,4 l
	FC.11.11 (racine)	1,2 hij
	FC.12.11 (racine)	1 efghi
	FC.13.11 (racine)	1,2 hij
	FC.14.11 (racine)	1 fghi
	FC.15.11 (racine)	1,1 ghij
	FC.16.11 (racine)	1,3 hij
	FC.17.11 (racine)	1,4 ij
<i>F. graminearum</i>	FG.01.11 (collet)	2,5 l
	FG.02.11 (collet)	1,8 k
	FG.03.11 (épi)	0,9 defg
<i>F. solani</i>	FS.01.11 (racine)	0,3 abc
	FS.02.11 (racine)	0,2 a
<i>F. verticillioides</i>	FV.01.11 (racine)	0,2 ab
<i>F. torulosum</i>	FT.01.11 (racine)	0,4 abcd
<i>F. poae</i>	FP.01.11 (épi)	0,2 ab
<i>M. nivale</i>	MN.01.11 (racine)	0,6 bcde
Témoin		0,0 a

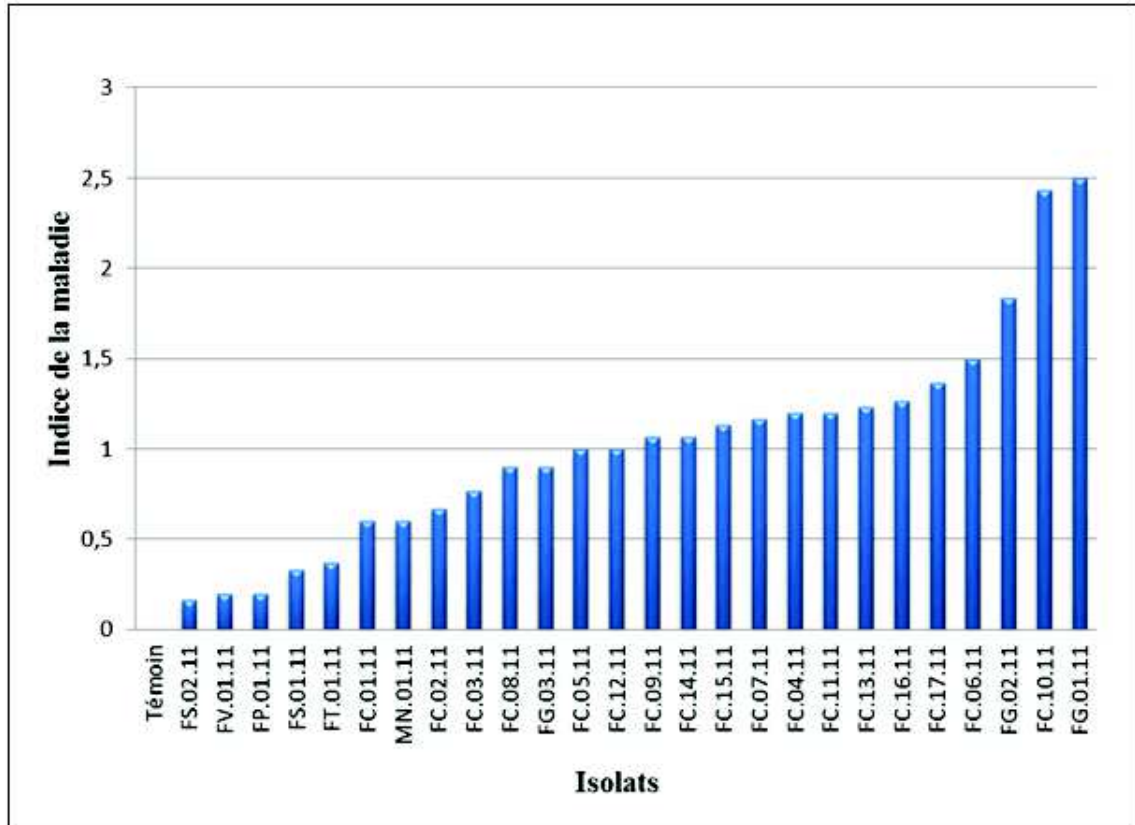


Figure 24. Indice de la maladie des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivales* sur le collet.

Espèce	Indice moyen
<i>F. culmorum</i>	1,15 b
<i>F. graminearum</i>	1,74 c
<i>F. solani</i>	0,25 a
<i>F. verticillioides</i>	0,20 a
<i>F. torulosum</i>	0,36 a
<i>M. nivale</i>	0,60 a
Témoin	0,00 a

Tableau 14. Indice moyen de la maladie des espèces de *Fusarium* et *M. nivale* sur le collet.

Les valeurs qui sont suivies de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes selon le test de LSD de Fisher au seuil de 5%.

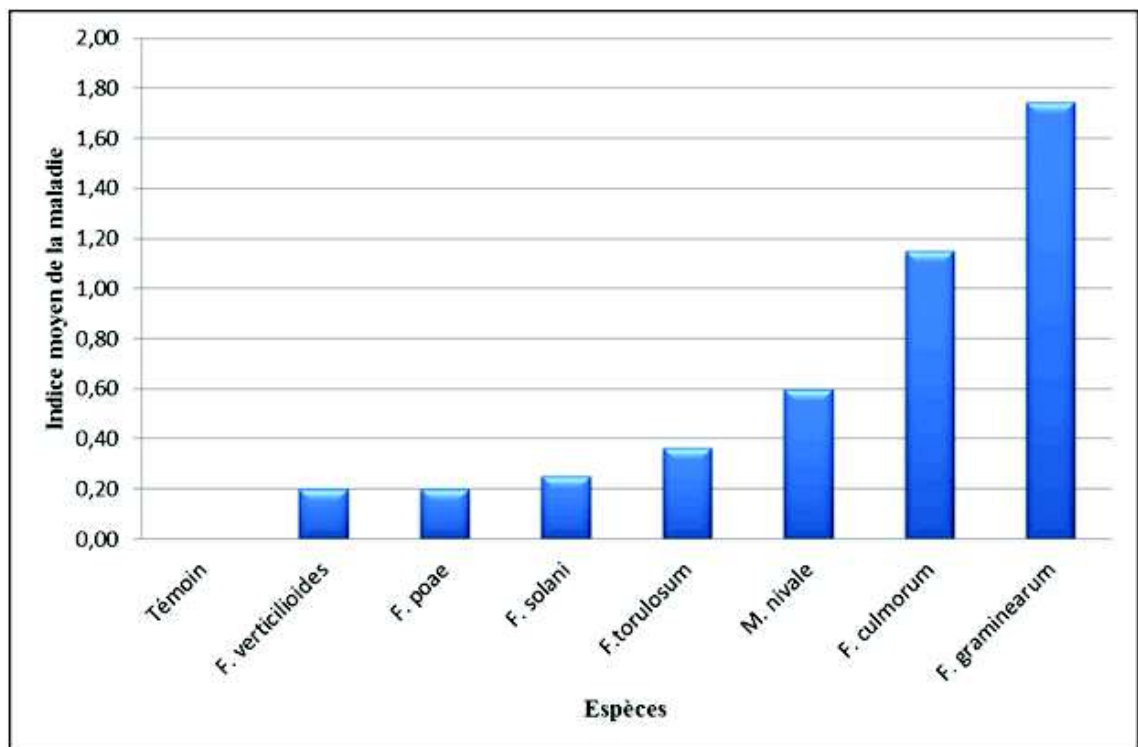


Figure 25. Indice moyen de la maladie des espèces de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* sur le collet.

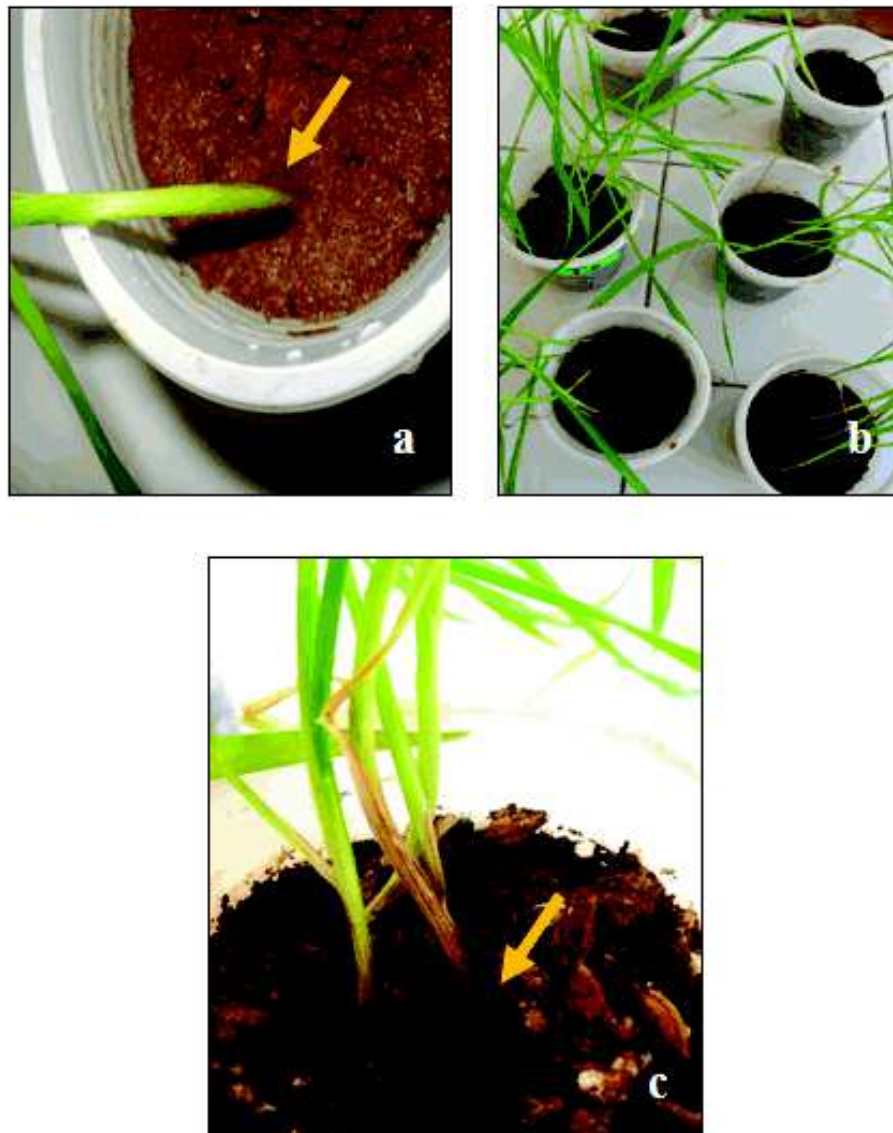


Figure 26. Test de l'inoculation sur le collet, **a** : partie basale (saine) du témoin, **b** : témoin, **c** : brunissement du collet inoculé.



Figure 27. Echelle de notation de la maladie, 0 : absence de symptômes, 1 : noircissement ou brunissement de 1 à 25 % du collet, 2 : noircissement ou brunissement de 26 à 50 % du collet, 3 : noircissement ou brunissement de plus de 50 % du collet

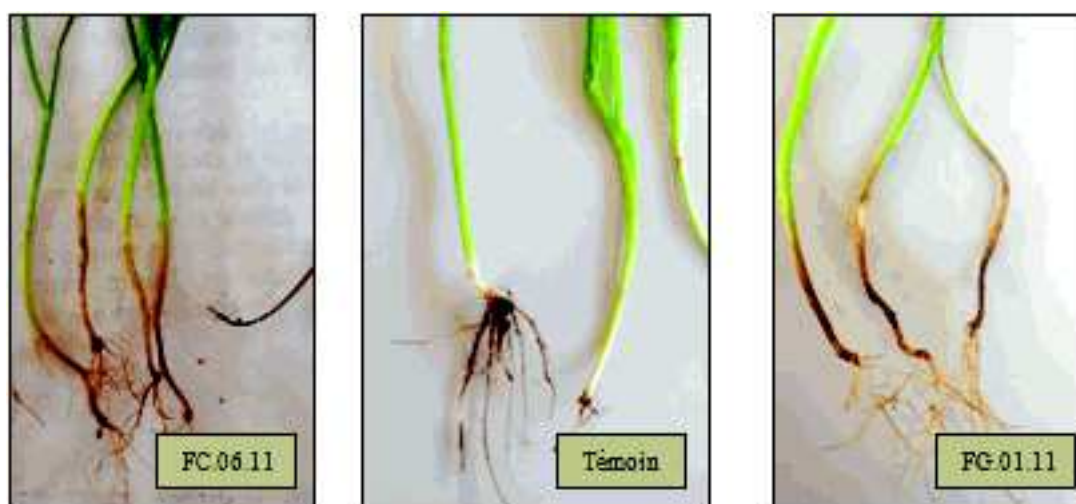


Figure 28. Comparaison entre le témoin non inoculé (au milieu) et des plants inoculés présentant des symptômes de la pourriture racinaire (celui de la gauche inoculé par l'isolat FC.06.11 de l'espèce *F. culmorum* et celui de la droite par l'isolat FG.01.11 de l'espèce *F. graminearum*).

III.2.3. Etude de l'agressivité des isolats de *Fusarium* spp. et de *Microdochium nivale* sur les épis

III.2.3.1. L'expression de la maladie sur les épis

Les premiers symptômes sont apparus presque dans la même durée pour tous les isolats après 12 jours de l'inoculation. Les notations des symptômes sont réalisées après un mois en utilisant une échelle de notation de 0 à 9.

Pour la même espèce une variabilité dans l'indice de maladie est notée, tel que pour les isolats des espèces de *F. culmorum*, *F. graminearum* et *F. solani* où une différence très hautement significative existe entre les isolats. Les résultats obtenus montrent que l'isolat le plus agressif est FC.13.11 avec un indice d'attaque de 6,6 suivis de FC.17.11, FC.12.11 puis FC.11.11 avec des indices d'attaque de 6,0, 5,8 et 5,5 respectivement, tandis que les isolats les moins agressifs sont FG.03.11, FV.01.11 et FP.01.11 avec des indices d'attaque de 0,2, 0,2 et 0,3 respectivement (Tableau 15, Fig. 29, Annexe 5, Tableau 4).

Le calcul des indices moyens d'agressivité a permis de classer les différentes espèces. Ainsi l'espèce la plus agressive est *F. culmorum* avec un indice d'attaque moyen de 3,45 suivie de *F. torulosum* avec un indice d'attaque moyen de 1,80, tandis que l'espèce la moins agressive est *F. verticillioides* avec un indice d'attaque de 0,26. (Tableau 16, Fig. 30).

Les symptômes observés sont des échaudages d'un épillet ou plus, d'une partie de l'épi (Figs. 31a, b et c) ou de l'épi entier (Figs. 31d, et e), on assiste aussi à des échaudages des glumes ou à un symptôme sous forme d'un cerne ovale brun (Fig. 32e), des taches sont observés sur les glumes (Fig. 32d) ou sur les barbes (Figs. 32a et b), des amas de spores roses sont bien visibles à l'œil nu chez certains épis (Fig. 31g). Le rachis peut être atteint directement ou indirectement par les épillets attaqués, il présente alors une coloration violacée (Fig. 31f). Les épis attaqués sont entièrement échaudés quelque temps après l'attaque, les microparcelles inoculées sont entièrement desséchées alors que le témoin reste encore vert (Figs. 33, 34).

Espèce	Isolat	Indice de la maladie
<i>F. culmorum</i>	FC.01.11	2,6 g
	FC.02.11	2,9 gh
	FC.03.11	1,3 de
	FC.04.11	0,6 bc
	FC.05.11	2,9 gh
	FC.06.11	1,9 f
	FC.07.11	Non testée
	FC.08.11	Non testée
	FC.09.11	2,7 gh
	FC.10.11	2,7 gh
	FC.11.11	5,5 j
	FC.12.11	5,8 j
	FC.13.11	6,6 k
	FC.14.11	3,3 hi
	FC.15.11	3,8 i
	FC.16.11	3,2 h
	FC.17.11	6,0 j
<i>F. graminearum</i>	FG.01.11	1,5 ef
	FG.02.11	0,4 abc
	FG.03.11	0,2 ab
<i>F. solani</i>	FS.01.11	0,7 bcd
	FS.02.11	0,9 cd
<i>F. verticillioides</i>	FV.01.11	0,3 ab
<i>F. torulosum</i>	FT.01.11	1,8 ef
<i>F. poae</i>	FP.01.11	0,3 ab
<i>M. nivale</i>	MN.01.11	0,6 bc
Témoin		0,0 a

nivale sur les épis.

Les valeurs qui sont suivies de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes selon le test de LSD de Fisher au seuil de 5%.

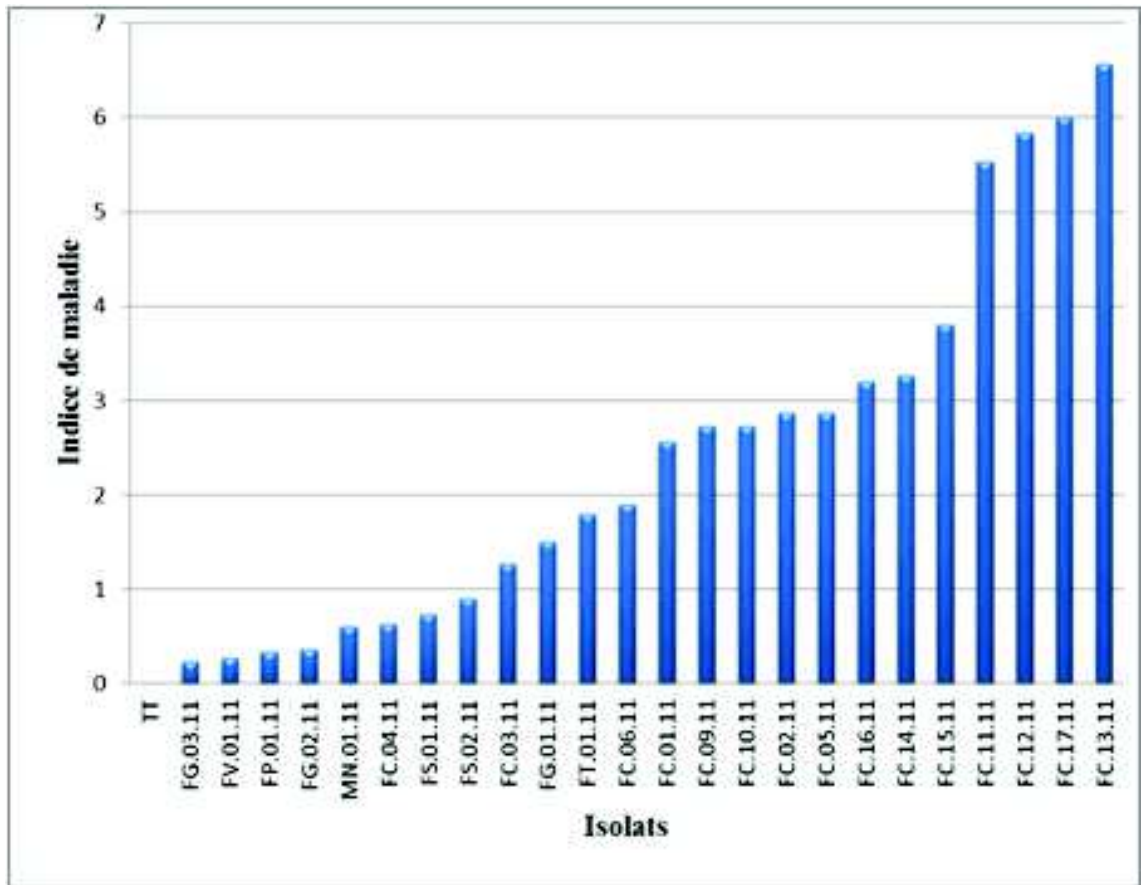


Figure 29. Indice de la maladie des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* sur épi.

Tableau 16. Indice moyen de la maladie des espèces de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* sur épi

Espèces	Indice moyen
<i>F. culmorum</i>	3,45 b
<i>F. graminearum</i>	0,70 a
<i>F. solani</i>	0,81 a
<i>F. verticillioides</i>	0,26 a
<i>F. torulosum</i>	1,80 ab
<i>F. poae</i>	0,33 a
<i>M. nivale</i>	0,60 a
Témoin	0,00 a

Les valeurs qui sont suivies de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes selon le test de LSD de Fisher au seuil de 5%.

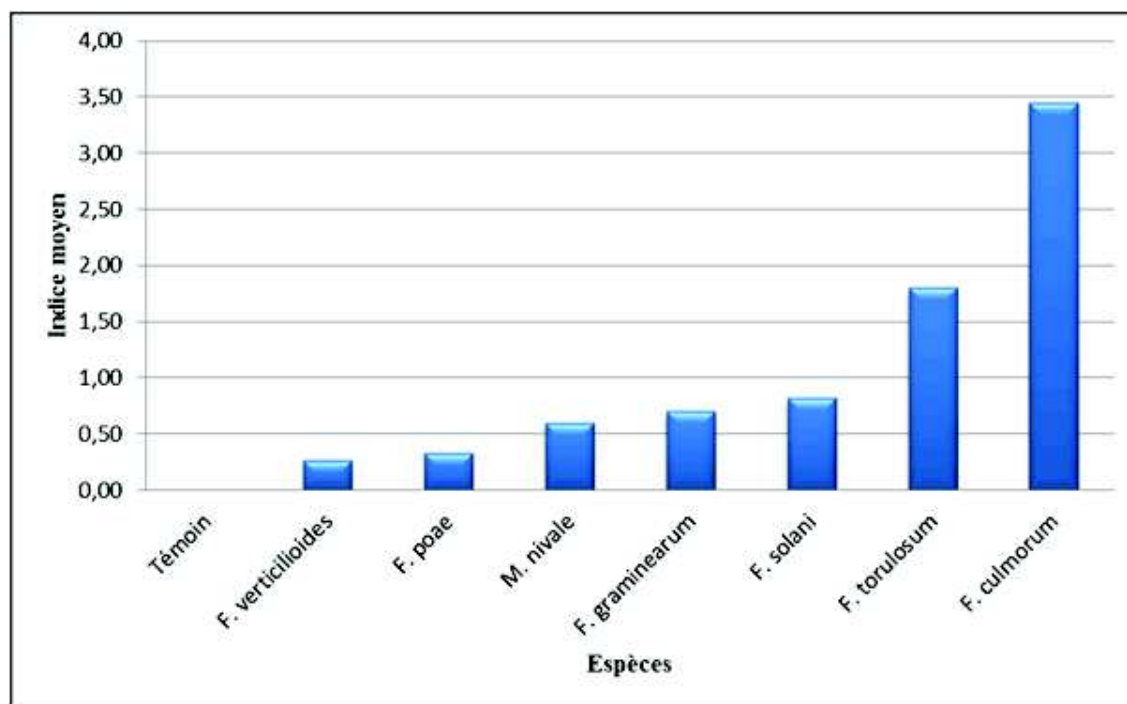


Figure 30. Indice moyen de maladie des espèces de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* sur épis



Figure 31. Symptômes observés après l'inoculation des épis avec l'isolat FC.17.11 de l'espèce *F. culmorum*. **a** : début d'attaque sur la partie basale de l'épi, **b** : attaque plus évoluée de la base de l'épi, **c** : attaque au milieu de l'épi, **d** : épi entièrement attaqué, **e** : deux épis atteints, **f** : rachillet atteint avec une couleur violacée, **g** : amas de spores orange sur les deux épillets.



Figure 32. Symptômes observés après l'inoculation des épis par des isolats de *Fusarium* spp . **a** et **b** : épis inoculés par l'isolat FS.02.11 de l'espèce *F. solani*, des taches brunes sur les glumes, **c** : épi inoculé par *F. graminearum*, **d** : épi inoculé par l'isolat FT.01.11 de l'espèce *F. torulosum*, **e** : épi inoculé par l'isolat FV.01.11 de l'espèce *F. verticillioides*.



Figure 33. Epis témoins



Figure 34. Comparaison entre des épis inoculés (à droite) qui sont entièrement desséchés et des épis témoins (à gauche) qui restent encore verts avec des grains bien remplis.

III.2.3.2. Effet des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* sur le Poids de Mille Grains (PMG)

Après le battage, les graines de chaque lot sont récupérées, celles issues des épis inoculés sont chétives et déformées (Fig. 35). La mesure du poids de mille grains a montré l'existence d'une différence entre les épis inoculés et le témoin ; pour les épis témoins le PMG est

de 59g. Un pourcentage de réduction du poids de mille grains par rapport au témoin est calculé pour chaque isolat, et donc pour chaque espèce. L'Analyse de la variance de ce pourcentage selon montre qu'il existe une différence très hautement significative entre les différentes espèces et le témoin et entre les espèces elles-mêmes (Annexe 6, Tableau 1). Ainsi l'espèce qui présente le pourcentage de réduction le plus élevée est *F. culmorum* (36,97%), tandis que l'espèce qui présente le pourcentage le plus faible est *F. graminearum* (12,25%). L'isolat qui présente le PMG le plus réduit est FC.03.11 de l'espèce *F. culmorum* avec un PMG de 32 g et un pourcentage de réduction de 45,83%, tandis que l'isolat qui présente le PMG le plus élevé est FG.02.11 avec un PMG de 55,11g donc un pourcentage de réduction de 6,6% (Tableau 17, Fig. 36, Annexe 6, Tableau 2).

- Corrélation entre le pourcentage de la maladie sur les épis et le pourcentage de réduction du poids de mille grains

La corrélation entre le pourcentage de la maladie sur les épis et le pourcentage de réduction du poids de mille grains est significative ($r = 0,62$) (Annexe 9, Tableau 1). Ainsi, le PMG diminue avec l'augmentation de la sévérité de la fusariose des épis. Une corrélation est aussi calculée pour l'ensemble des isolats de *F. culmorum* testés, elle est de 0,32, et considérée comme étant significative (Fig. 37, Annexe 9, Tableau 2).



Figure 35. Grains issus des épis témoins (a) et grains fusariés issus des épis inoculés par les isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* (b).

Espèce	Isolat	Poids de mille grains (g)	% de réduction de PMG
<i>F. cubnorum</i>	FC.01.11	41,92 fg	28,93
	FC.02.11	37,9 hij	35,8
	FC.03.11	32 i	45,83
	FC.04.11	42,91 efg	27,33
	FC.05.11	46,3 cde	21,66
	FC.06.11	36,1 jk	38,83
	FC.07.11	-	-
	FC.08.11	-	-
	FC.09.11	36,23 jk	38,6
	FC.10.11	33,6 kl	43
	FC.11.11	37,06 ijk	37,16
	FC.12.11	32,54 i	44,83
	FC.13.11	35,18 jkl	40,33
	FC.14.11	41,38 g	29,86
	FC.15.11	34,5 jkl	41,5
	FC.16.11	37,86 hij	35,8
	FC.17.11	32,38 i	45,10
<i>F. graminearum</i>	FG.01.11	52,42 b	11,16
	FG.02.11	55,11 ab	6,6
	FG.03.11	47,22 cd	19,93
<i>F. solani</i>	FS.01.11	40,18 ghi	31,83
	FS.02.11	48,46 c	17,8
<i>F. verticillioides</i>	FV.01.11	45,08 def	23,66
<i>F. torulosum</i>	FT.01.11	43,32 efg	26,66
<i>F. poae</i>	FP.01.11	46,22 cde	21,66
<i>M. nivale</i>	MN.01.11	41,26 gh	30
Témoin		59 a	0

Tableau 17. Effet des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* sur le poids de mille grains.

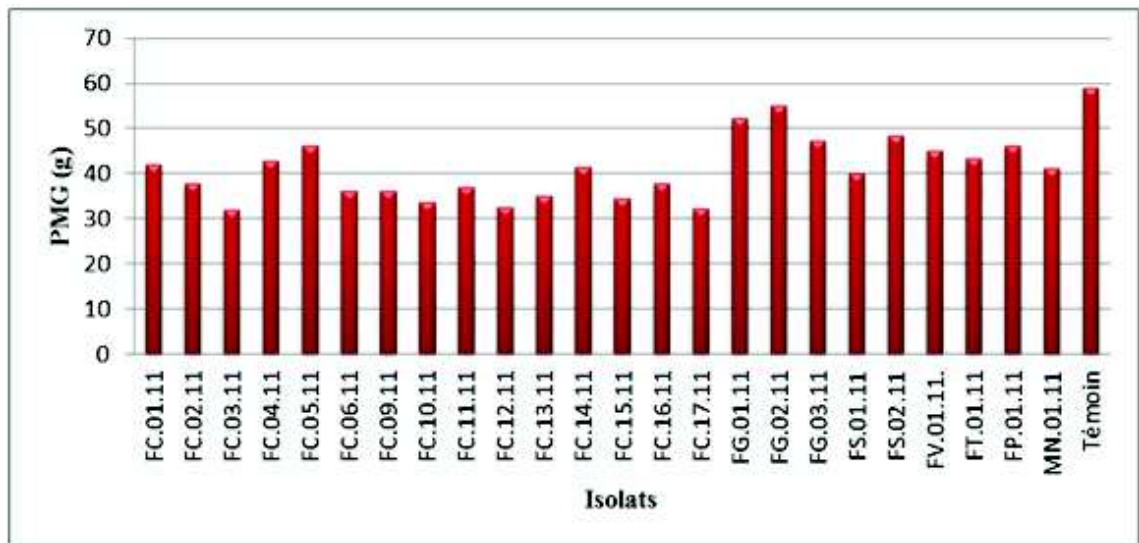


Figure 36. PMG des graines issues des épis inoculés par les isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale*.

III.2.3.3. Analyse phytosanitaire des graines issues des épis inoculés

Après la moisson, un battage est effectué et les graines obtenues sont analysées afin de vérifier le postulat du Koch, pour cela un agar test est effectué. Les résultats obtenus montrent que la majorité des colonies résultantes appartiennent à l'espèce inoculée, quelques colonies d'*Alternaria* sont aussi obtenues avec rarement une colonie d'une espèce différente (Fig. 38).

Corrélations entre les trois tests de l'étude pathologique

Afin d'évaluer l'agressivité des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* sur le blé, trois tests sont effectués (un test *in vitro* et deux tests *in vivo*) : le test *in vitro* permet d'évaluer l'effet des isolats sur la croissance du coléoptile des graines de blé, ainsi un pourcentage de réduction de la croissance de ce dernier est calculé. Le deuxième test consiste à évaluer l'effet de ces isolats sur le collet, et un pourcentage de la maladie est calculé. Enfin, le troisième test consiste à évaluer l'effet des mêmes isolats sur épis, et un pourcentage de la maladie est aussi calculé (Tableau 18, Fig. 39).

Des corrélations sont donc calculées pour les trois pourcentages, il est à noter que le test *in vitro* avait été réalisé à 4 températures, et selon les résultats obtenus, la température qui présente le degré d'agressivité le plus élevé était de 20°C. De ce fait, les pourcentages de retard de la croissance du coléoptile utilisés pour le calcul des corrélations sont ceux obtenus à 20°C.

Des corrélations sont calculées pour *F. culmorum*, *F. graminearum* et *F. solani*, la corrélation significative la plus élevée est trouvée chez *F. solani* ($r = 0,72$) qui présente la corrélation entre le pourcentage de réduction de la croissance du coléoptile et le pourcentage de la maladie sur les épis (Annexe 8, Tableau 3), suivie de ($r = 0,65$) trouvée entre le pourcentage de maladie sur le collet et celui des épis pour l'espèce *F. graminearum* (Annexe 8, Tableau 2). Pour l'espèce *F. culmorum*, une corrélation significative négative ($r = -0,41$) est notée entre le pourcentage de réduction de la croissance du coléoptile et le pourcentage de maladie sur les épis (Annexe 8, Tableau 1). Les autres corrélations ne sont pas significatives et sont notées au niveau des tableaux de l'annexe 8.

Espèce	Isolat	Pourcentage de retard de la croissance du coléoptile (%)	Pourcentage de la maladie sur le collet (%)	Pourcentage de la maladie sur épi (%)
<i>F. cubnorum</i>	FC.01.11	100,0	20,0	28,9
	FC.02.11	98,6	23,3	32,2
	FC.03.11	100,0	23,3	14,4
	FC.04.11	98,6	40,0	06,7
	FC.05.11	100,0	33,3	32,2
	FC.06.11	100,0	50,0	63,3
	FC.07.11	100,0	40,0	-
	FC.08.11	92,9	30,0	-
	FC.09.11	100,0	33,3	30,0
	FC.10.11	100,0	80,0	30,0
	FC.11.11	95,7	40,0	61,1
	FC.12.11	93,6	33,3	64,4
	FC.13.11	100,0	40,0	73,3
	FC.14.11	100,0	33,3	36,6
	FC.15.11	96,4	36,7	42,2
	FC.16.11	100,0	43,3	35,6
	FC.17.11	100,0	46,7	66,7
<i>F. graminearum</i>	FG.01.11	100,0	83,3	16,7
	FG.02.11	97,1	60,0	04,4
	FG.03.11	100,0	30,0	02,2
<i>F. solani</i>	FS.01.11	55,7	10,0	07,7
	FS.02.11	85,7	06,7	10,0
<i>F. verticillioides</i>	FV.01.11.	90,7	06,7	03,3
<i>F. torulosum</i>	FT.01.11	89,3	13,3	20,0
<i>F. poae</i>	FP.01.11	100,0	06,6	03,3
<i>M. nivale</i>	MN.01.11	85,7	20,0	6,7
Témoin		0,0	0,0	0,0

Tableau 18. Le pourcentage de retard de la croissance du coléoptile, le pourcentage de la maladie sur le collet et le pourcentage de la maladie sur épi.

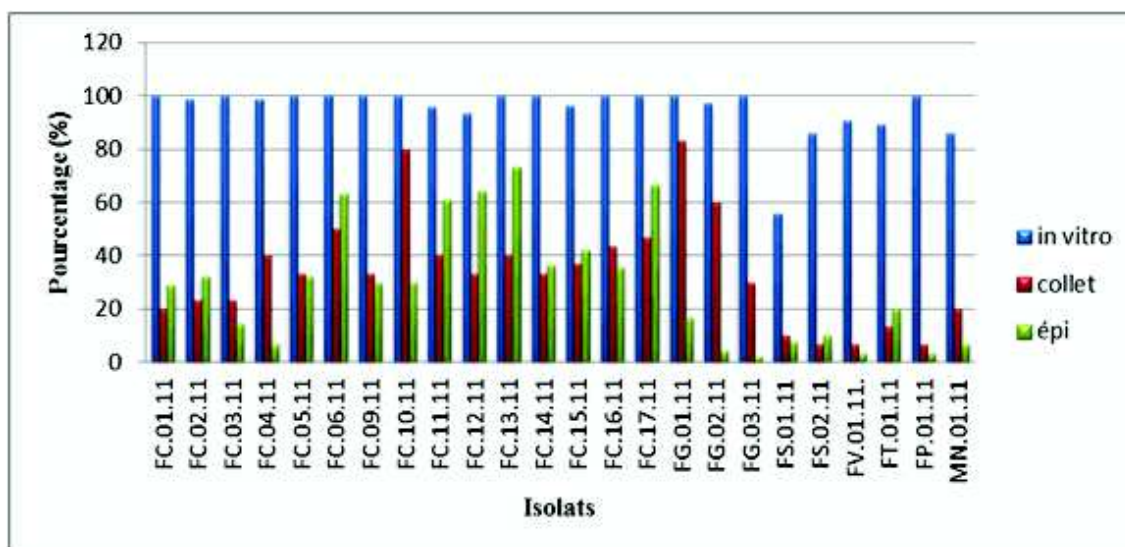


Figure 39. Le pourcentage de réduction de la croissance du coléoptile in vitro, le pourcentage de la maladie sur le collet et le pourcentage de la maladie sur les épis sous l'effet des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale*.

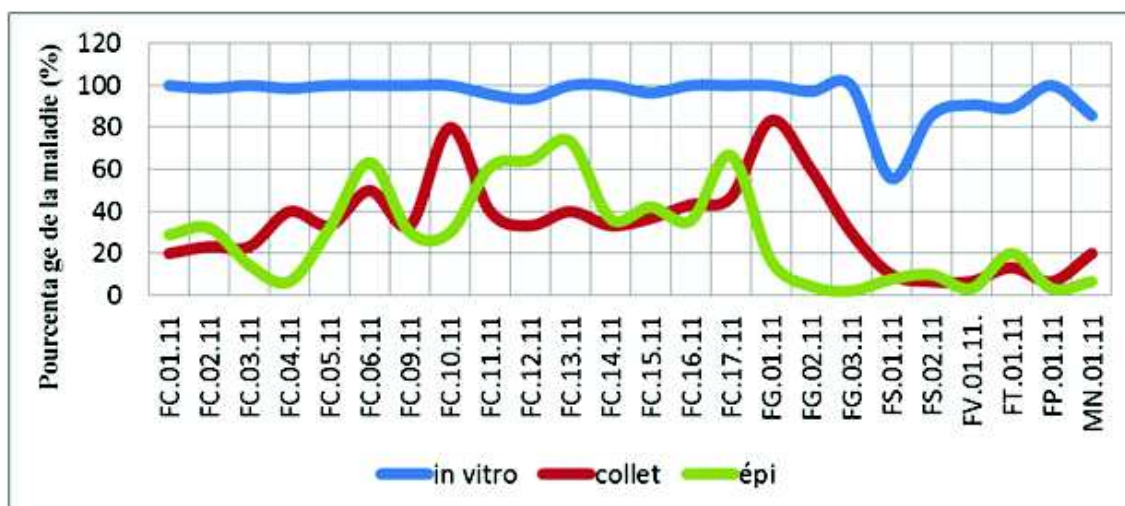


Figure 40. Le pourcentage de réduction de la croissance du coléoptile in vitro, le pourcentage de la maladie sur le collet et le pourcentage de la maladie sur les épis sous l'effet des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale*.

Discussion

L'étude de l'effet des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* sur la croissance du coléoptile montre qu'il existe une variabilité dans l'agressivité des différentes espèces. L'espèce la plus agressive est *F. graminearum*, alors que l'espèce la moins agressive est *F. solani*. Selon le degré d'agressivité, ces espèces sont classées en deux groupes : le groupe le plus agressif dont le pourcentage d'inhibition de la croissance du coléoptile par rapport au témoin se situe entre 90,95 et 95,17% est composé de 4 espèces : *F. graminearum*, *F. culmorum*, *F. poae*

et *F. verticillioides*, et le groupe le moins agressif dont le pourcentage se situe entre 78,41 et 81,42 est composé de 3 espèces : *F. torulosum*, *M. nivale* et *F. solani*.

La température à laquelle l'espèce présente le pourcentage de réduction de la croissance du coléoptile le plus élevé est variable selon les espèces. Ainsi pour *F. culmorum* cette température est de 25°C suivie de 20°C, puis 15°C et la température où ce pourcentage est le plus réduit est 30°C, tandis que *F. graminearum*, *F. torulosum* et *F. poae* présentent une agressivité élevée à 20°C. Enfin, les trois espèces *F. solani*, *F. verticillioides* et *M. nivale* sont plus agressives à 15°C.

Brennan et al. (2003) ont réalisé ce test de pathogénicité *in vitro* avec cinq espèces : *F. graminearum*, *F. culmorum*, *F. poae*, *F. avenaceum* et *M. nivale* à 10, 15, 20, 25 et 30°C, ils ont trouvé que *F. culmorum*, *F. graminearum* et *F. avenaceum* sont plus agressifs entre 20 et 25°C, *F. poae* entre 15 et 20°C et *M. nivale* est plus agressif entre 15 et 20°C. Ils ont noté qu'entre 20 et 25°C, *F. avenaceum*, *F. culmorum* et *F. graminearum* causent plus de 83.3% du retard de la croissance du coléoptile par rapport au témoin. *F. poae* et *M. nivale* causent plus de 45.6% du retard de la croissance du coléoptile entre 10 et 15°C. Ces auteurs ont trouvé que l'espèce la plus agressive est *F. graminearum* et l'espèce la moins agressive est *M. nivale*, et cela est en accord avec les résultats obtenus dans cette présente étude.

Contrairement à ces résultats, Demirci et Dane (2003) ont trouvé que les isolats de l'espèce *M. nivale* sont fortement agressifs. Il a été démontré par Parry et al. (1994) que la température a un effet sur la pathogénie de l'espèce *M. nivale* par rapport à sa plante hôte. En effet, les températures basses (10-15 °C) favorisent le développement et par conséquent l'attaque par *M. nivale*, tandis que des températures plus élevées (> 16 °C) favorisent le développement et la propagation d'autres agents pathogènes. Les résultats de cette étude ont montré aussi, de par sa variation significative entre les isolats, que l'agressivité peut varier au sein d'une même espèce, et entre isolats provenant d'un même champ, ou de différentes régions.

Un calcul des corrélations entre la croissance mycélienne des isolats et leur agressivité évaluée par le pourcentage du retard de la croissance du coléoptile est réalisée. Ainsi, des corrélations sont calculées pour chaque espèce. La corrélation positive la plus élevée est trouvée chez *M. nivale* ($r = 0,42$), suivie de *F. graminearum* ($r = 0,35$) puis *F. poae* ($r = 0,27$). A partir de ces corrélations, on peut dire que ces espèces sont plus agressives dans leurs températures optimales de croissance. Les corrélations des autres espèces sont négatives, la plus élevée est celle notée chez l'espèce *F. verticillioides* ($r = -0,67$), suivie de *F. torulosum* ($r = -0,59$), ces deux corrélations sont significatives. Enfin, des corrélations très faibles sont notées chez *F. culmorum* ($r = -0,09$) et *F. solani* ($r = -0,08$).

Brennan et al. (2003) ont calculé les corrélations entre la croissance mycélienne et la pathogénicité *in vitro* pour les espèces citées précédemment, ils ont trouvé que la seule corrélation significative est celle de *M. nivale* à 15°C ($r = -0,83$).

D'après les résultats relatifs à l'essai de l'inoculation du sol et présentant des symptômes sur la partie basale, *F. graminearum* est l'espèce la plus agressive, suivie de *F. culmorum*, tandis que *M. nivale*, *F. torulosum*, *F. solani*, *F. poae* et *F. verticillioides* ont une agressivité réduite. Cela signifie que *F. culmorum* et *F. graminearum* sont les seules à causer des indices de maladies significatifs et que le reste des espèces ne sont pas assez agressives sur collet. Cependant, ces résultats doivent être renforcés par un nombre plus élevé d'isolats.

Plusieurs études sont en accord avec ces résultats. Afin d'identifier les champignons responsables de la pourriture du pied du blé en Tunisie, des prospections ont été faites

par Gargouri et al. (2001), les champignons les plus fréquemment isolés étaient *Fusarium culmorum* (70%) et *G. zae* (*F. graminearum*) (21,5%). Plusieurs auteurs notent que *F. graminearum* et *F. pseudograminearum* sont les deux espèces qui causent les dégâts sur le collet du blé (Liu et al., 2008). En étudiant l'agressivité des espèces de *Fusarium* et *Microdochium* en Tunisie, Kammoun-Gargouri (2011) a montré que les espèces *F. culmorum* et *F. pseudograminearum* sont les plus agressives, alors que les espèces *F. avenaceum* et *M. nivale* var. *nivale* sont moins agressives. Chakraborty et al. (2010) ont inoculé les plantules du blé avec des isolats de *F. graminearum* et de *F. pseudograminearum*. Les résultats obtenus ont montré que les isolats de *F. pseudograminearum* sont les plus agressifs. En étudiant l'agressivité de plusieurs espèces de

Fusarium, vis-à-vis de la pourriture des racines, Fernandez et Chen (2005) ont rapporté que les deux espèces *F. culmorum* et *F. graminearum* sont plus agressives que l'espèce *F. avenaceum*. De plus, Smiley et al. (2005) ont rapporté que sous serre, les espèces *F. culmorum* et *F. pseudograminearum* peuvent engendrer des niveaux d'attaques élevés. Tunali et al. (2006) ont noté une pathogénie élevée causée par les espèces *F. culmorum* et *F. pseudograminearum* sur des plantules de blé.

Selon Smiley et al. (2005), la pourriture racinaire du blé est causée par un complexe d'espèces fongiques comportant *Fusarium pseudograminearum*, *F. culmorum*, *F. avenaceum*, *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoemaker et *Microdochium nivale*. La dominance de chaque espèce dans ce complexe diffère selon les régions géographiques. Cependant, les deux espèces majeures sont *F. pseudograminearum* et *F. culmorum*. *F. pseudograminearum* est l'espèce la plus dominante responsable de la pourriture racinaire du blé aux Etats Unis et en Australie (Smiley et al., 2005; Burgess et al., 2001), tandis que *F. culmorum* est le principal agent causal de cette maladie en Afrique du nord (Chekali et al., 2010 ; Boughalleb et al., 2006; Gargouri, 2003; Mergoum, 1997).

Les résultats relatifs au test de pathogénicité sur épis obtenus au cours de cette étude ont permis de classer les différentes espèces selon le degré d'agressivité sur épi. L'espèce la plus agressive est *F. culmorum* suivie de *F. torulosum*, tandis que *F. solani*, *F. graminearum*, *M. nivale*, *F. poae* et *F. verticillioides* ont une agressivité réduite. Selon Parry et al. (1995), *F. graminearum* et *F. culmorum* sont les espèces pathogènes majeures responsables de la fusariose sur épi. *F. poae*, *F. avenaceum*, *M. nivale* ainsi que d'autres espèces de *Fusarium* jouent un rôle moins important. Fernandez et Chen (2005) et Masher et al. (2005) n'ont pas trouvé une différence d'agressivité entre *F. culmorum* et *F. graminearum* en infectant les épis du blé.

Muthomi et al. (2007) ont inoculé les épis du blé variété «Mbuni» avec des espèces du genre *Fusarium* impliquées dans la fusariose des épis du blé. Ils ont noté que l'espèce *F. graminearum* est la plus agressive. Selon Kriel et al. (2006), *F. graminearum* est l'agent causal le plus important de la fusariose de l'épi sur blé.

La comparaison des résultats obtenus pour les deux inoculations (sur collet et sur épi) montre que l'espèce *F. graminearum* est la plus agressive sur le collet, tandis que son agressivité sur épi est réduite. Cela laisse supposer que peut-être il s'agit des isolats de l'espèce *F. pseudograminearum* qui est connue par son agressivité élevée sur le collet et qui n'est pas citée comme agressive sur épi. Cependant, cela reste à vérifier par les études moléculaires.

Afin d'évaluer la relation entre les symptômes visibles de la fusariose de l'épi et la perte du rendement, une composante de rendement est mesurée ; il s'agit du poids de 1000 grains (PMG). Un pourcentage de réduction du PMG est calculé pour chaque isolat, ainsi

ce pourcentage varie entre 6,6 et 45,83%. La corrélation entre l'indice de maladie sur épi transformé en pourcentage et le pourcentage de réduction du PMG pour l'ensemble des isolats est significative ($r = 0,62$). Donc, les symptômes de la maladie visibles sur les épis peuvent donner des prévisions concernant la perte de rendement avant la moisson.

Saur et Benacet (1999) ont évalué l'effet de la fusariose de l'épi sur deux composantes de rendement : le poids de 1000 grains et le nombre de grains par épi. Ils ont noté que la diminution moyenne du poids de 1000 grains des parcelles contaminées par rapport aux parcelles témoins est de 13,6% alors que la diminution du poids de grain par épi est de 16,9%. Ces mêmes auteurs ont trouvé un coefficient de corrélation élevé ($r = 0,838$) entre les symptômes visibles sur les épis et la diminution relative du PMG. Masher *et al.* (2005) ont constaté l'existence d'une forte corrélation entre la perte de rendement et les symptômes visibles sur épi.

Il est cité précédemment que les espèces appartenant au genre *Fusarium* ainsi que l'espèce *M. nivale* sont capables de causer trois types de maladies : des fontes de semis, des pourritures des racines et du collet et la gale ou fusariose de l'épi (*Fusarium* head blight). Donc ces organes (graines, racines ou collet et épis) peuvent être attaqués par les mêmes espèces, mais à différents stades phénologiques de la plante : la germination pour les fontes de semis, l'épiaison et la floraison pour la fusariose des épis et tout le cycle de la céréale pour les pourritures racinaires. Cela rend l'épidémiologie de la fusariose très compliquée et laisse poser plusieurs questions dont les réponses ne sont pas encore claires. Dans ce contexte, cette étude offre quelques résultats concernant ces trois types de symptômes ; qui sont ensuite utilisés pour calculer les éventuelles corrélations qui peuvent exister entre ces maladies.

Des corrélations sont donc calculées pour l'ensemble des espèces concernant le test de pathogénicité *in vitro*, le test d'inoculation sur collet et le test d'inoculation sur les épis. La corrélation significative la plus élevée est trouvée chez *F. solani* ($r = 0,72$) qui représente la corrélation entre le pourcentage de réduction de la croissance du coléoptile et le pourcentage de la maladie sur les épis, suivie de ($r = 0,65$) notée entre le pourcentage de la maladie sur le collet et celui des épis pour l'espèce *F. graminearum*. Pour l'espèce *F. culmorum*, une corrélation significative négative ($r = -0,41$) est notée entre le pourcentage de réduction de la croissance du coléoptile et le pourcentage de la maladie sur les épis.

On peut ainsi suggérer que pour les isolats de *F. solani* testés, le test *in vitro* peut donner une idée de l'agressivité sur les épis. Cependant, il est nécessaire de refaire ces tests avec un nombre plus élevé d'isolats pour donner des conclusions plus sûres concernant l'espèce. En effet l'évaluation de l'agressivité des isolats par inoculation sur graines nous permet d'obtenir les résultats au bout du 4^{ème} jour d'incubation. C'est une technique rapide, qui permet aux améliorateurs d'évaluer la résistance des variétés sélectionnées dans un temps court. C'est dans ce sens qu'il est intéressant de trouver une éventuelle corrélation entre l'agressivité évaluée par cette technique et celle par l'inoculation sur épis qui exige un temps plus long (tout le cycle du blé).

Pour l'espèce *F. graminearum* une corrélation significative positive est notée entre l'agressivité évaluée par la technique d'inoculation sur le collet et celle d'inoculation sur les épis. Cela signifie que les isolats qui présentent le degré d'agressivité le plus élevé sur l'épi le présentent également sur le collet.

Pour les 15 isolats de *F. culmorum*, la corrélation négative ($r = -0,41$) laisse supposer que les isolats qui montrent une agressivité par la technique *in vitro* ne sont pas

obligatoirement agressifs sur les épis. De ces résultats, on suggère que la technique *in vitro* ne peut pas être utilisée pour estimer l'agressivité sur les épis pour l'espèce *F. culmorum*.

Les travaux de Mesterhazy (1983, 1984) ont montré l'existence d'une corrélation entre la réduction de la croissance du coléoptile des plantules *in vitro* et les tests de la pathogénicité sur les épis pour l'espèce *F. graminearum*. Selon (Brenan, 2003), la corrélation entre les tests de pathogénicité *in vitro* et *in vivo* pour les autres espèces de *Fusarium* n'est pas encore déterminée

III.3. Effet des isolats de *Trichoderma* spp. sur la croissance des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale*.

III.3.1. Identification de l'isolat de *Trichoderma*

L'isolat est doué d'une croissance rapide, et présente un mycélium de couleur blanchâtre. Les spores sont initialement de couleur blanche et deviennent verdâtres avec l'âge. Elles sont produites en cercles concentriques. L'observation microscopique montre que l'isolat possède des conidiophores avec des ramifications en structure pyramidale et des phialides ampulliformes, les ramifications des branches du conidiophore sont longues et les conidies sont arrondies. La culture de cet isolat présente une odeur de noix de coco caractéristique de l'antifongique volatil (6 α pentyl pyrone). Ces caractéristiques correspondent à celle de l'espèce *T. atroviride* tels que décrit par Bisset (1992) et Dodd et al. (2003). Sachant que l'antifongique volatils a été décrit uniquement au niveau de la section *Trichoderma* chez les deux espèces *T. atroviride* et *T. viride* Pers.

III.3.2. Confrontation entre les agents antagonistes et les agents pathogènes

III.3.2.1. La confrontation directe

Le test de la confrontation directe consiste à placer un explant de l'agent pathogène et un autre de l'agent antagoniste dans les mêmes boîtes de Pétri, ces dernières sont incubées pendant 7 jours et des observations quotidiennes sont réalisées. Au bout du 7^{ème} jour, des mesures du diamètre des colonies de l'agent pathogène sont réalisées. Les résultats mentionnés au niveau du tableau 19 montrent l'existence d'une nette réduction du diamètre

moyen des colonies des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* en présence des isolats de *Trichoderma* spp. par rapport au témoin (Fig. 43 et 45).

Les deux isolats de *T. atroviride* ont envahi les isolats de *Fusarium* et de *M. nivale*, Pour l'isolat Ta13 un recouvrement total est observé chez tous les isolats pathogènes testés, sauf chez l'isolat FP.01.11 (*F. poae*) où on observe un recouvrement partiel (Fig. 45). Pour l'isolat Tn3 (nouvellement isolé), un recouvrement total est observé chez FC.13.11, FG.01.11, FV.01.11 et FT.01.11. Cependant, un recouvrement partiel est observé chez le reste des isolats. Cet envahissement est accompagné d'une forte sporulation de l'agent antagoniste

au-dessus de la colonie de l'agent pathogène (Fig. 41). Une zone d'inhibition de 2 à 4 mm est observée chez l'isolat FT.01.11. Cette zone d'inhibition indique la diffusion

dans le milieu d'une substance antifongique non volatile secrétée par l'isolat Tn3 efficace contre l'isolat FT.01.11 (Fig. 42).

De plus, il est à noter que le pourcentage d'inhibition de la croissance mycélienne de *Fusarium* spp et de *M. nivale* est variable selon les isolats de *Trichoderma* spp. Ce pourcentage varie entre 81 et 100% (Tableau 20, Fig. 44).

L'analyse de la variance du diamètre moyen des colonies des isolats de *Fusarium* spp. a montré l'existence d'une différence très hautement significative entre les différents traitements et les témoins (Annexe 10). Les pourcentages d'inhibition de la croissance des isolats de *Fusarium* spp. sont plus importants sous l'effet de l'isolat Ta.13.

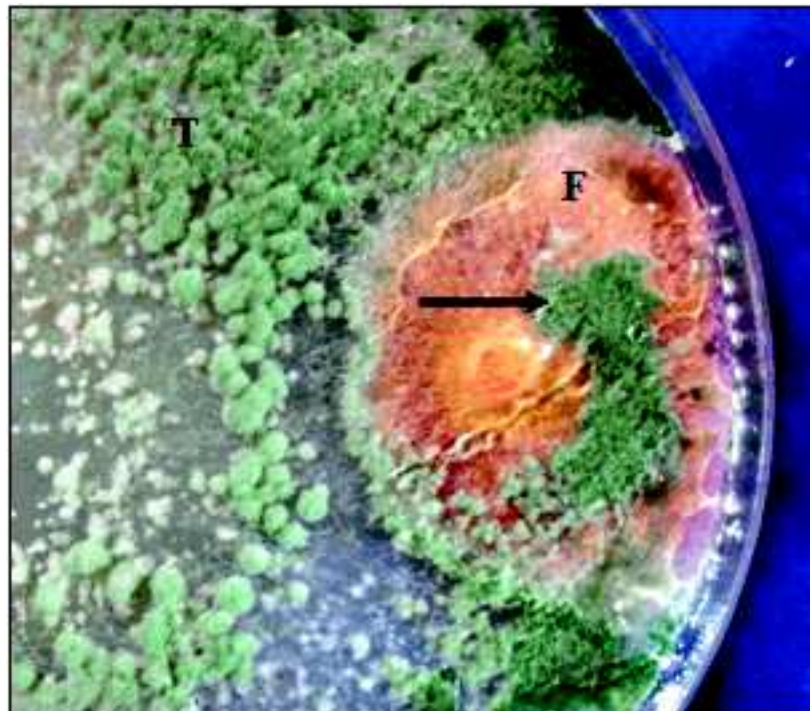


Figure 41. Recouvrement et sporulation de *Trichoderma* sur la colonie de *Fusarium*

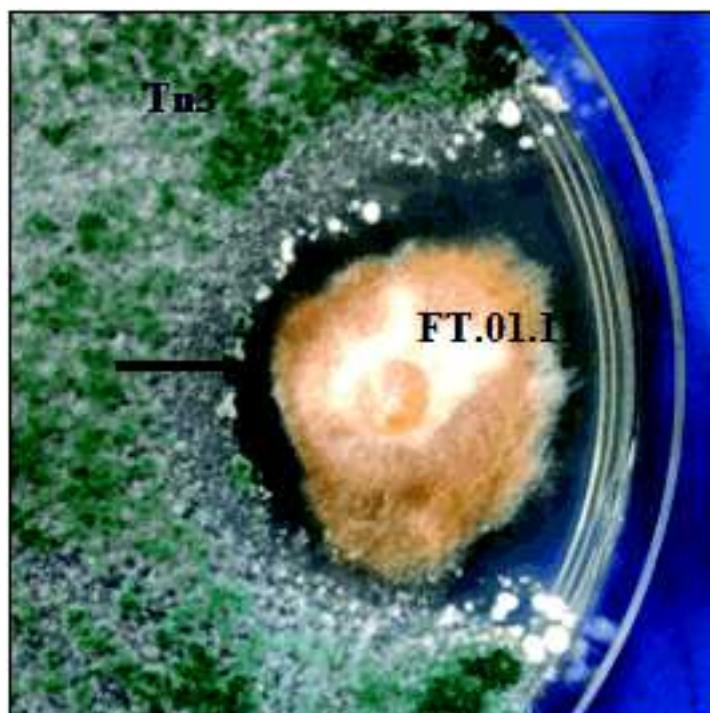


Figure 42. Zone d'inhibition entre FT.01.11 et l'isolat de *T. atroviride* Tn3.

Isolat / Traitement	Témoin (mm)	T13 (mm)	TN3 (mm)
FC.13.11	85	00	05
FG.01.11	66	00	08
FS.02.11	71	00	08
FV.01.11	48	00	00
FT.01.11	47	00	08
FP.01.11	80	13	15
MN.01.11	81	00	00

Tableau 19. Diamètre moyen des colonies de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* sous l'effet des deux isolats de *T. atroviride* Ta13 et Tn3 dans le cas de la confrontation directe

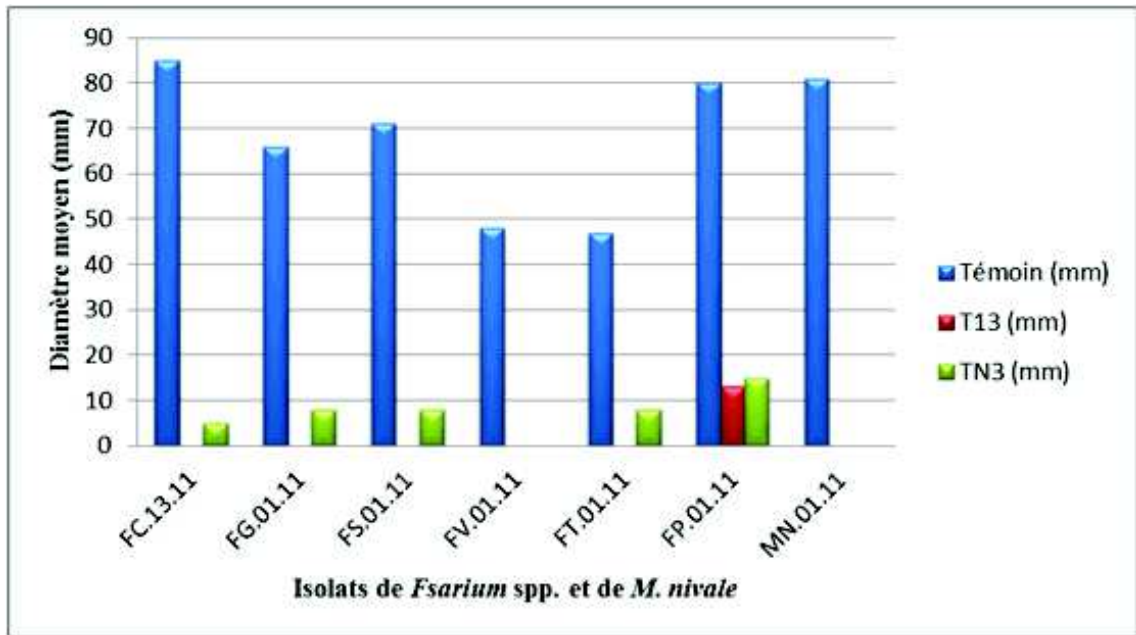


Figure 43. Diamètre moyen (mm) des colonies de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* sous l'effet des isolats de *T. atroviride* Ta13 et Tn3 dans le cas de la confrontation directe.

Isolat / Traitement	T13 (%)	TN3 (%)
FC.13.11	100 b	94 ab
FG.01.11	100 b	88 ab
FS.01.11	100 b	89 ab
FV.01.11	100 b	100 b
FT.01.11	100 b	83 ab
FP.01.11	84 a	81 a
MN.01.11	100 b	100 b

Tableau 20. Pourcentage de réduction de la croissance mycélienne des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* sous l'effet des isolats de *T. atroviride* Ta13 et Tn3 dans le cas de la confrontation directe.

Les valeurs qui sont suivies de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes selon le test de LSD de Fisher au seuil de 5%.

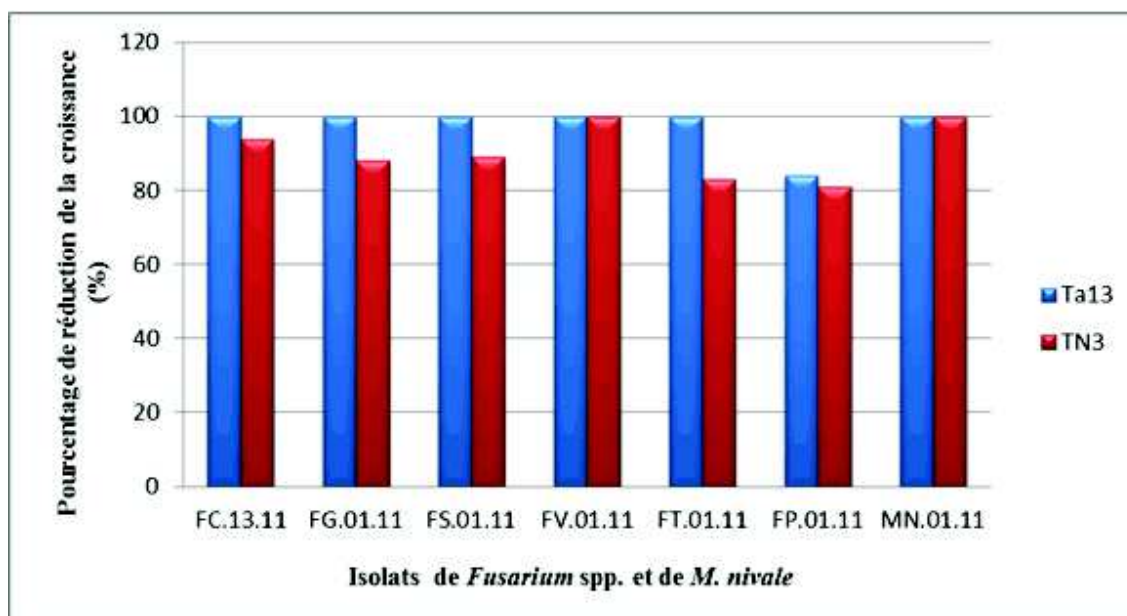


Figure 44. Pourcentage de réduction de la croissance mycélienne des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* sous l'effet des deux isolats de *T. atroviride* Ta13 et Tn3 dans le cas de la confrontation directe

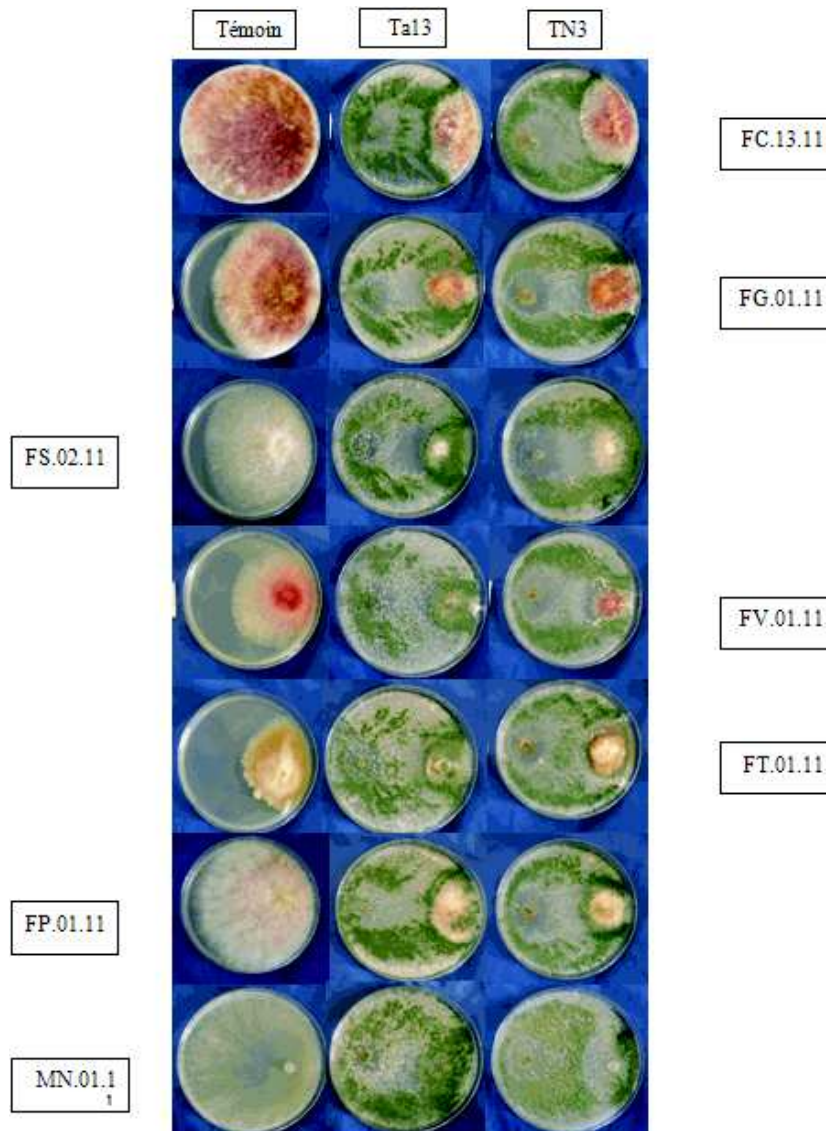


Figure 45. Effet des deux isolats de *T. atroviride* : Ta13 et Tn3 sur la croissance mycélienne des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* dans le cas de la confrontation directe.

III.3.2.2. Confrontation à distance

Cette technique nous a permis de mettre en évidence l'effet inhibiteur à distance des isolats de *Trichoderma* spp. exercé sur les isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* par la sécrétion des substances antifongiques volatiles. Après 4 jours de confrontation, les résultats obtenus montrent l'existence d'une nette réduction du diamètre moyen des colonies de tous les isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* par rapport au témoin (Tableau 21, Fig. 46). Cette réduction est variable selon les isolats de *Trichoderma* et les isolats de *Fusarium* spp. ou *M. nivale* (Fig. 48) où un pourcentage de réduction qui varie entre 0 et 57 % est observé (Tableau 22, Fig. 47).

L'analyse de la variance de diamètre moyen des colonies de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* montre qu'il existe une différence très hautement significative entre les isolats de

Fusarium spp. traités et les témoins, cependant, une différence non significative ($p = 0,1$) est notée entre l'effet des deux isolats de *Trichoderma* (Annexe 11, Tableau 1).

Les deux isolats de *T. atroviride* utilisés ont statistiquement le même effet antagoniste, cependant Tn3 est classée en premier lieu avec un pourcentage moyen de réduction de la croissance mycélienne de 32,58%, alors que Ta13 présente un pourcentage de 27,99% (Annexe 11, Tableau 3).

Les résultats obtenus montrent que l'isolat Ta13 est plus efficace dans le cas de la confrontation directe, tandis que l'isolat Tn3 est plus efficace dans le cas de la confrontation à distance.

Isolat / Traitement	Témoin (mm)	T13 (mm)	Tn3 (mm)
FC.13.11	80	56	48
FG.01.11	35	26	21
FS.01.11	55	46	43
FV.01.11	33	25	28
FT.01.11	21	19	21
FP.01.11	39	21	21
MN.01.11	72	42	31

Tableau 21. Diamètre moyen des colonies de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* sous l'effet des deux isolats de *T. atroviride* Ta13 et Tn3.

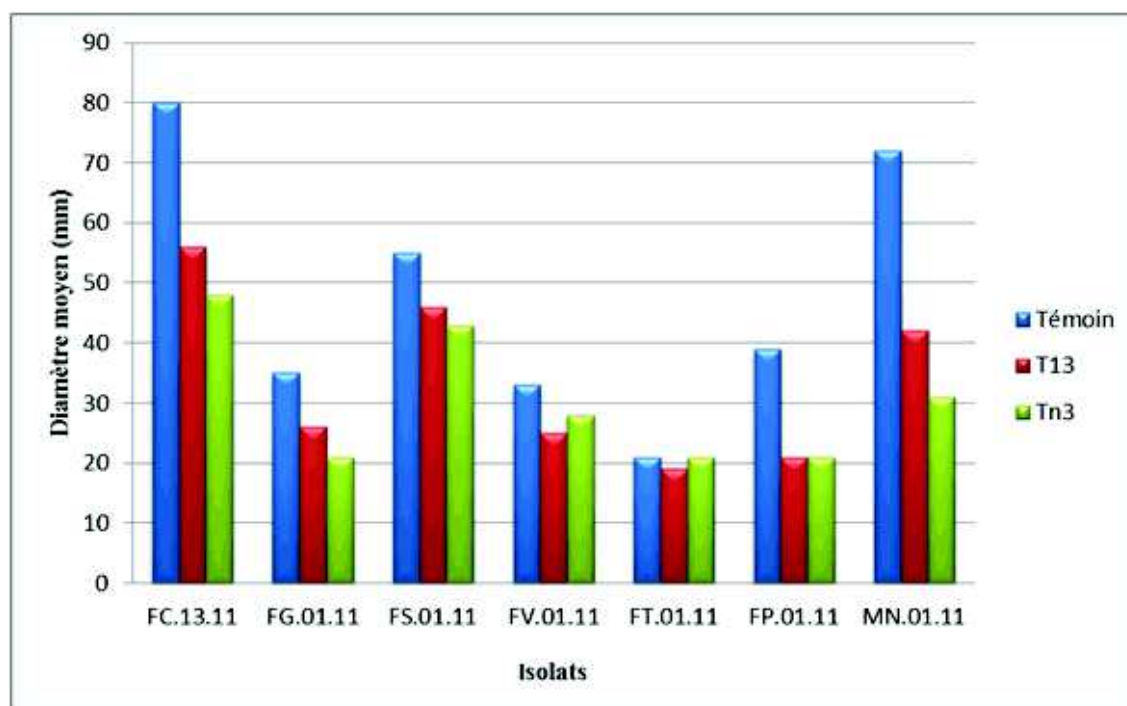


Figure 46. Diamètre moyen des colonies de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* sous l'effet des deux isolats de *T. atroviride* Ta13 et Tn3 dans le cas de la confrontation à distance.

Isolat	T13 (%)	Tn3 (%)
FC.13.11	30 abc	40 c
FG.01.11	26 abc	40 c
FS.01.11	16 a	22 b
FV.01.11	24 ab	15 b
FT.01.11	10 a	00 a
FP.01.11	46 c	46 c
MN.01.11	42 bc	57 d

Tableau 22. Pourcentage de réduction de la croissance mycélienne des isolats de *Fusarium spp* et de *M. nivale* dans le cas de la confrontation à distance

Les valeurs qui sont suivies de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes selon le test de LSD de Fisher au seuil de 5%.

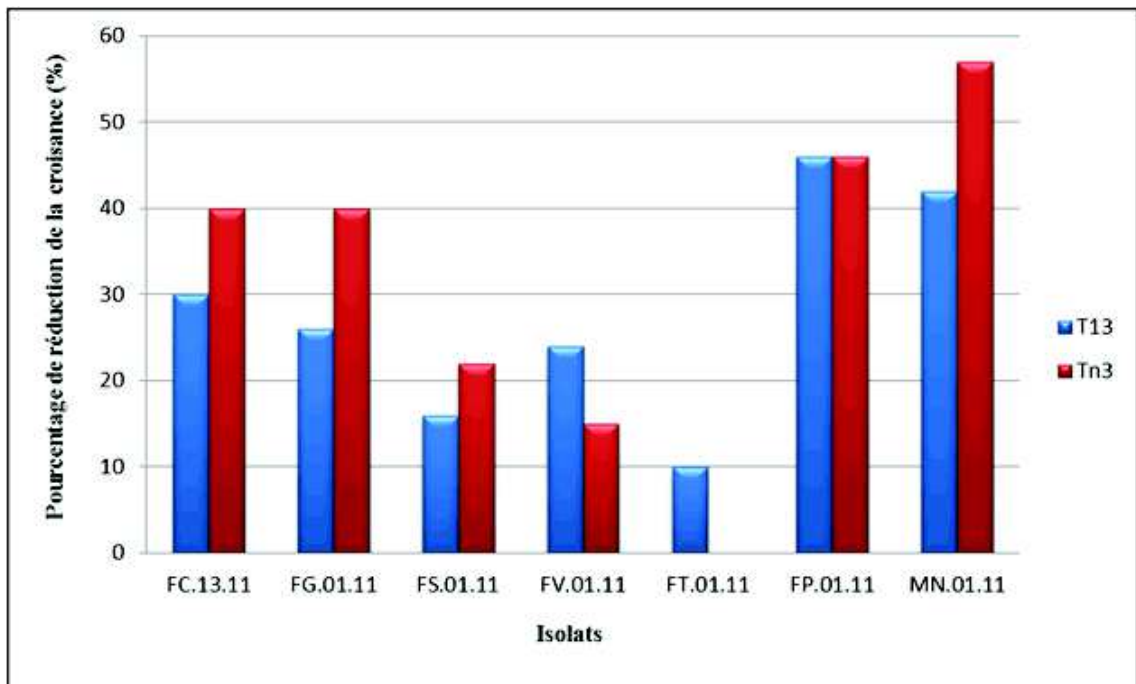


Figure 48. Effet des deux isolats de *T. atroviride* Ta13 et Tn3 sur la croissance des isolats de *Fusarium spp.* et de *M. nivale* dans le cas de la confrontation à distance.

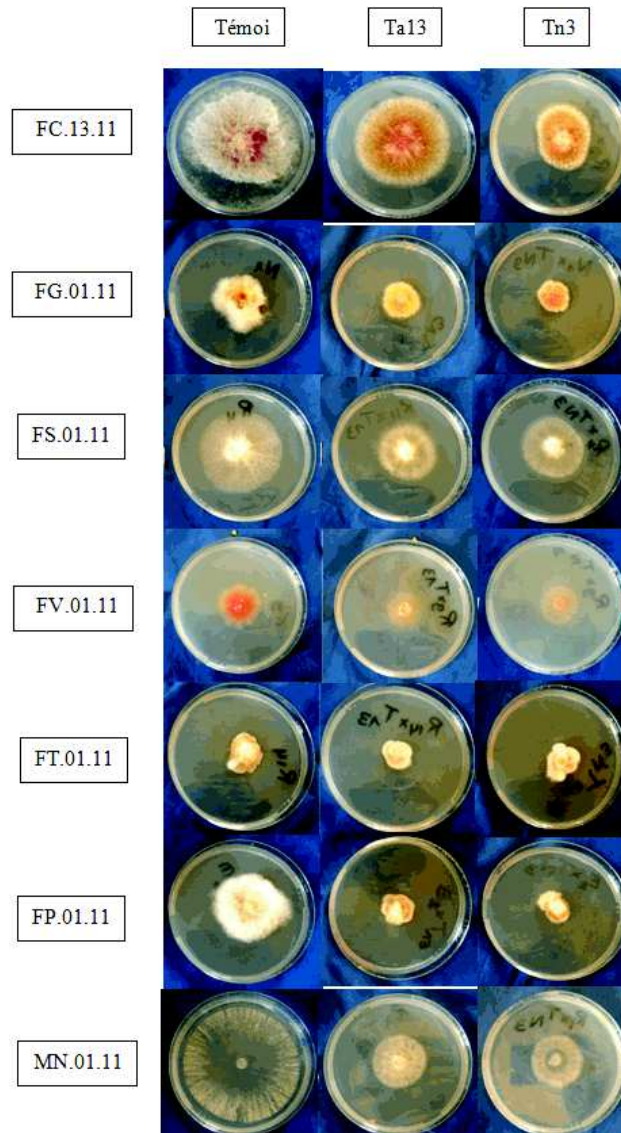


Figure 48. Effet des deux isolats de *T. atroviride* Ta13 et Tn3 sur la croissance des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* dans le cas de la confrontation à distance.

Discussion

Pour évaluer l'effet de *Trichoderma* sur les agents de la fusariose du blé, deux isolats de l'espèce *T. atroviride* ont été choisis : Ta13, l'isolat le plus efficace parmi une collection de *Trichoderma* testée contre l'agent de la fusariose du pois chiche et les agents de la fusariose du blé d'après plusieurs travaux (Bouregghda, 2009 ; Abdallah, 2010 ; Dane, 2012b ; Djellialia, 2012) et Tn3 nouvellement isolé. En parallèle, un isolat de chaque espèce de *Fusarium* ou de *M. nivale* a été choisi selon les résultats du test d'agressivité sur les épis.

Les deux isolats de *T. atroviride* ont inhibé efficacement la croissance mycélienne des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale*, à des degrés variables et par le biais de différents mécanismes.

Le test de confrontation directe a mis en évidence le pouvoir mycoparasitaire des deux isolats de *T. atroviride*. Un recouvrement total de l'agent antagoniste est observé pour la plupart des isolats de l'agent pathogène. De plus, une forte sporulation des deux isolats de *T. atroviride* est notée au-dessus des colonies des agents pathogènes, prouvant ainsi leur pouvoir hautement mycoparasitaire. D'après les résultats obtenus, il s'est avéré que l'isolat Ta13 est plus efficace que l'isolat Tn3 en induisant des pourcentages d'inhibition de la croissance des pathogènes plus élevés et un recouvrement total de la majorité des colonies des espèces testées. Une variabilité est aussi notée dans la sensibilité des isolats de *Fusarium* et de *M. nivale*. Les tests de confrontation directe ont ainsi montré que l'isolat le plus sensible est FV.01.11 de l'espèce *F. verticillioides*, tandis que l'isolat le moins sensible est FT.01.11 de l'espèce *F. torulosum*.

Plusieurs travaux ont mis en évidence la capacité de différentes espèces de *Trichoderma* de réduire la croissance des espèces du genre *Fusarium* et *Microdochium* par le biais de plusieurs mécanismes.

Abdallah (2010) a réalisé le test de la confrontation directe avec trois isolats de *Trichoderma* : TL.9 (*T. longibrachiatum*), Th.6 (*T. harzianum*) et Ta.13 (*T. atroviride*), « ce dernier isolat est le même que celui utilisé dans cette étude » contre des isolats appartenant à 7 espèces : *F. graminearum*, *F. culmorum*, *F. lateritium*, *F. moniliforme*, *F. avenaceum*, *F. solani* et *M. nivale*. Les résultats obtenus ont montré que l'isolat de *Trichoderma* qui présente les pourcentages d'inhibition de la croissance mycélienne les plus élevés est Ta13.

Dans le même sens, Materase et al. (2012) ont utilisé dix isolats appartenant au genre *Trichoderma* comme agents de lutte biologique contre deux isolats de *F. culmorum* et *F. graminearum* causant la fusariose de l'épi du blé. Ces deux dernières espèces sont connues par leur haute production de mycotoxines. Les résultats obtenus indiquent que l'isolat *T. gamsii* 6085 est le plus efficace. Ils ont alors suggéré que cette espèce représente un bon candidat dans la lutte biologique contre la fusariose de l'épi du blé.

Bouregghda (2009) a évalué l'effet des isolats de trois espèces de *Trichoderma* spp. : *T. atroviride*, *T. longibrachiatum* et *T. harzianum* à l'égard des deux pathotypes (pathotype de flétrissement et de jaunissement) de *Fusarium oxysporum* f.sp. *ciceris* (Padwick) Matuo et K. Sato. (Foc) agent du flétrissement du pois chiche. A noter que Ta13 est parmi les isolats de *T. atroviride* utilisés. Ainsi le pourcentage de réduction de la croissance mycélienne le plus élevé est obtenu avec l'isolat de *T. atroviride* (Ta. 13). Ce pourcentage est de 84,44 % pour le pathotype de jaunissement et de 65,64% pour le pathotype de flétrissement.

Rojo et al. (2007) ont évalué *in vivo* l'effet de deux isolats appartenant à *T. harzianum* et *T. longibrachiatum* contre *F. solani* agent de la pourriture racinaire de l'arachide, les résultats obtenus montrent que *Trichoderma* réduit l'incidence de la maladie et améliore la croissance de la plante.

Cotxarrera et al. (2002) ont conclu que la tourbe mélangée à du compost réduit significativement l'incidence du flétrissement fusarien de la tomate causé par *Fusarium oxysporum* f. sp. *Lycopersici*. Ils ont alors étudié les propriétés microbiologiques de ce compost, ainsi ils ont prouvé que *T. asperellum* Samuels, Lieckf. et Nirenberg est en grande partie le responsable de cette suppression.

Singh Lakhesar et al. (2010) ont proposé une méthode de lutte contre la pourriture racinaire des céréales causée par *F. pseudograminearum* en utilisant 3 espèces antagonistes : *Fusarium equiseti* (Corda) Sacc., *Fusarium nygamai* Burgess et Trimboliet *Trichoderma harzianum*. Ils ont étudié un des mécanismes d'action de ces antagonistes qui

est la compétition pour les nutriments. Ils ont trouvé que cette compétition est plus élevée pour les sources d'azote que pour les sources du carbone.

Le pouvoir de *Trichoderma* à contrôler les maladies est aussi prouvé chez d'autres genres ; Berber et *al.* (2009) ont réalisé le test de la confrontation directe sur milieu PSA

entre quatre isolats de *Bipolaris* pathogènes du Sorgho et trois souches de *T. harzianum* et trois souches de *T. viride*, ils ont trouvé que ces dernières inhibent la croissance mycélienne et la germination conidienne de *Bipolaris*.

Dans le cas de la confrontation à distance, absence de contact direct entre l'agent antagoniste et l'agent pathogène où *Trichoderma* spp. agit seulement par la production de substances antifongiques volatiles. Une réduction significative de la croissance avec les deux isolats de *T. atroviride* à l'égard de tous les isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* est notée. Ainsi l'inhibition à distance s'est avérée plus importante avec l'isolat Tn3. L'isolat de l'agent pathogène le plus sensible est celui appartenant à l'espèce *M. nivale*, tandis que l'isolat le moins sensible appartient à l'espèce *F. torulosum*.

Abdallah (2010) a réalisé le test de la confrontation à distance des isolats de *Fusarium* et de *M. nivale* avec trois isolats appartenant à *T. atroviride* (Ta13), *T. harzianum* et *T. longibrachiatum*. Les résultats obtenus ont montré une nette réduction de la croissance mycélienne des isolats de l'agent pathogène; ainsi l'inhibition à distance s'est avéré plus importante avec l'isolat Ta13 de l'espèce *T. atroviride*.

Bouregghda (2009) a montré l'inhibition à distance de la croissance de *Fusarium oxysporum* f.sp. *ciceris* sous l'effet des substances antifongiques volatiles secrétées par des isolats de *Trichoderma* spp. et a trouvé que les taux d'inhibition les plus importants sont enregistrés chez les isolats de l'espèce *T. atroviride* (Ta.3, Ta.7 et Ta.13), et l'isolat Th.16 de l'espèce *T. harzianum*.

En réalisant le test de la confrontation à distance entre *Rhizoctonia solani* Kühn et des isolats de *T. gamsii*, Anees et *al.* (2010) ont noté une faible inhibition de la croissance du pathogène par le biais des substances antifongiques volatiles, tandis que le mycoparasitisme et la production des substances diffusibles dans le milieu de culture sont les deux mécanismes par lesquels *T. gamsii* agit le mieux.

Chez les deux isolats de *T. atroviride* testés, une odeur de noix de coco est présente en culture sur milieu PDA, selon Dodd et *al.* (2003) et Samuels et *al.* (2002), cette dernière est caractéristique de l'antifongique volatil 6 α pentyl pyrone rencontré uniquement chez les espèces *T. atroviride* et *T. viride* de la section *Trichoderma*.

D'après les résultats obtenus, il s'est avéré que l'isolat Ta13 est plus efficace dans le cas de la confrontation directe, tandis que l'isolat Tn3 est plus efficace dans le cas de la confrontation à distance. D'après ce résultat, on conclut que les isolats de la même espèce peuvent se différencier dans les degrés d'efficacité des mécanismes d'action mis en jeu ; ainsi Ta13 a un degré de mycoparasitisme plus élevé, tandis que Tn3 possède une capacité plus élevée de sécréter des substances antifongiques volatiles.

CONCLUSION GENERALE

La connaissance des espèces impliquées dans le complexe fongique : pourriture racinaire et fusariose de l'épi est nécessaire pour comprendre l'épidémiologie des fusarioses et pour lutter contre celles-ci.

Les isoléments effectués à partir des plants de blé présentant les symptômes typiques de la pourriture racinaire et de la fusariose de l'épi ont permis d'obtenir une collection de 26 isolats. L'identification de ces isolats a abouti à la détermination de 7 espèces différentes : *F. culmorum*, *F. graminearum*, *F. solani*, *F. verticillioides*, *F. torulosum*, *F. poae* et *M. nivale*. Les isolats de *F. graminearum* comme tous les autres isolats sont identifiés uniquement en se basant sur les critères morphologiques, ainsi la distinction entre *F. graminearum* et *F. pseudograminearum* n'était pas possible. Pour cela, les trois isolats obtenus ont été considérés comme étant du *F. graminearum*.

Parmi les espèces isolées *F. culmorum* est le plus dominant (17 isolats), suivi de *F. graminearum* (3 isolats), puis *F. solani* (2 isolats), tandis que les autres espèces sont représentées par un seul isolat. Plusieurs auteurs expliquent la dominance de chaque espèce dans une région donnée par les conditions climatiques. En effet, plusieurs travaux ont rapporté que l'espèce *F. culmorum* est la plus dominante dans les pays de l'Afrique du Nord.

L'étude de l'effet de la température sur la croissance mycélienne des isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* montre l'existence d'une différence dans l'optimum de croissance entre les espèces étudiées. Cet optimum est de 25°C pour *F. culmorum* et *F. graminearum* et de 20°C pour *F. poae* et *M. nivale*, tandis que les isolats des espèces *F. solani*, *F. verticillioides* et *F. torulosum* ont une croissance plus élevée à 30°C. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par plusieurs auteurs.

L'étude pathologique des isolats obtenus à partir des différents organes des plants de blé (racine, collet et épi) avait été réalisée *in vitro* et *in vivo*. Cette étude est réalisée selon trois techniques, la première est l'étude de l'effet de ces isolats sur la croissance du coléoptile des grains du blé *in vitro* ; les deux autres sont réalisées *in vivo* par inoculation artificielle sur le collet et les épis.

L'étude de l'effet des isolats de *Fusarium* et de *M. nivale* sur la croissance du coléoptile *in vitro* montre qu'il existe une variabilité dans l'agressivité des différentes espèces. L'espèce la plus agressive est *F. graminearum*, alors que l'espèce la moins agressive est *F. solani*. Selon le degré d'agressivité, ces espèces sont classées en deux groupes : le groupe le plus agressif qui est composé de 4 espèces : *F. graminearum*, *F. culmorum*, *F. poae* et *F. verticillioides*, et le groupe le moins agressif est composé de 3 espèces : *F. torulosum*, *M. nivale* et *F. solani*.

L'agressivité des isolats de *Fusarium* spp. et *M. nivale* évaluée par l'inoculation du sol a montré que *F. graminearum* est l'espèce la plus agressive, suivie de *F. culmorum*, tandis que *M. nivale*, *F. torulosum*, *F. solani*, *F. poae* et *F. verticillioides* ont une agressivité très réduite. Ces résultats montrent que parmi les isolats des espèces testées dans cette étude, seules les deux espèces *F. graminearum* et *F. culmorum* ont une agressivité importante sur le collet.

L'inoculation des épis a montré que l'espèce la plus agressive est *F. culmorum* suivie de *F. torulosum*, tandis que *F. solani*, *F. graminearum*, *M. nivale*, *F. poae* et *F. verticillioides* ont une agressivité réduite.

La comparaison des résultats obtenus pour les deux inoculations (sur collet et sur épi) montre que l'espèce *F. graminearum* est la plus agressive sur le collet, tandis que son agressivité sur épi est réduite. Cela laisse supposer que peut être les trois isolats appartiennent à l'espèce *F. pseudograminearum* qui est connue par son agressivité élevée sur le collet et les racines et qui n'est pas citée comme agressive sur épi. Cependant, cela reste à vérifier par les études moléculaires.

Les corrélations calculées entre les l'agressivité des isolats évaluée par les trois techniques d'inoculations ont montré quela corrélation significative la plus élevée est trouvée chez *F. solani* ($r = 0,72$) qui représente la corrélation entre le pourcentage de réduction de la croissance du coléoptile et le pourcentage de la maladie sur les épis. On peut ainsi suggérer que pour les isolats de *F. solani* testés, le test *in vitro* peut donner une idée de l'agressivité sur les épis. Cependant, il est nécessaire d'utiliser un nombre plus élevé d'isolats pour donner des conclusions plus sûres concernant cette espèce. Chez l'espèce *F. graminearum* une corrélation positive significative ($r = 0,65$) est notée entre le pourcentage de la maladie sur le collet et celui des épis. Pour l'espèce *F. culmorum*, une corrélation significative négative ($r = -0,41$) est notée entre le pourcentage de réduction de la croissance du coléoptile et le pourcentage de la maladie sur les épis. Pour les 15 isolats de *F.*

culmorum, la corrélation négative ($r = -0,41$) laisse supposer que les isolats qui montrent une agressivité par la technique *in vitro* ne sont pas obligatoirement agressifs sur les épis.

En effet l'évaluation de l'agressivité des isolats par inoculation sur graines nous permet d'obtenir les résultats au bout du 4^{eme} jour d'incubation. C'est une technique rapide, qui permet aux améliorateurs d'évaluer la résistance des variétés sélectionnées dans un temps court. C'est dans ce sens qu'il est intéressant de trouver une éventuelle corrélation entre l'agressivité évaluée par cette technique et celle par l'inoculation sur épis qui exige un temps plus long (tout le cycle du blé).

La corrélation entre l'indice de maladie sur épi transformé en pourcentage et le pourcentage de réduction du PMG pour l'ensemble des isolats est significative ($r = 0,62$). Ainsi, les symptômes de la maladie visibles sur les épis peuvent donner des prévisions concernant la perte de rendement avant la moisson.

Deux isolats appartenant à l'espèce *T. atroviride* ont été utilisés dans cette étude pour évaluer leur activité antagoniste *in vitro* à l'égard de plusieurs espèces de *Fusarium* spp. (*F. culmorum*, *F. graminearum*, *F. solani*, *F. poae*, *F. verticillioides*, et *F. torulosum*) et l'espèce *M. nivale*. Ainsi deux isolats de *T. atroviride*, Ta. 13 préalablement utilisé dans plusieurs travaux et qui s'est montré efficace à l'égard des agents de la fusariose du blé et un isola Tn3 obtenu lors de cette présente étude sont utilisés. Les agents pathogènes ont été sélectionnés en fonction de leur agressivité (l'isolat le plus agressif de chaque espèce a été retenu).

Le test de confrontation directe a mis en évidence le pouvoir mycoparasitaire des deux isolats de *T. atroviride*. Un recouvrement total de l'agent pathogène est observé pour la plupart des isolats. De plus une forte sporulation des deux isolats de *T. atroviride* est notée sur les colonies des agents pathogènes. D'après les résultats obtenus, il s'est avéré que l'isolat Ta13 est plus efficace que l'isolat Tn3 dans l'inhibition de la croissance des espèces pathogènes et dans l'envahissement de leur colonie. Une variabilité est aussi notée dans la sensibilité des isolats de *Fusarium* et de *M. nivale*. Les tests de confrontation directe ont ainsi montré que l'isolat le plus sensible est FV.01.11 de l'espèce *F. verticillioides*, tandis

que l'isolat le moins sensible est FT.01.11 de l'espèce *F. torulosum*. Une zone d'inhibition allant de 2 à 4 mm est observée chez l'isolat FT.01.11 en confrontation avec l'isolat Tn3, indiquant ainsi la production d'une substance antifongique diffusible dans le milieu par Tn3 efficace contre l'isolat FT. 01.11.

Dans le cas de la confrontation à distance, absence de contact direct entre l'agent antagoniste et l'agent pathogène où *Trichoderma* spp. agit seulement par la production de substances antifongiques volatiles. Une réduction significative de la croissance avec les deux isolats de *T. atroviride* à l'égard de tous les isolats de *Fusarium* spp. et de *M. nivale* est notée. Ainsi l'inhibition à distance s'est avérée plus importante avec l'isolat Tn3. L'isolat de l'agent pathogène le plus sensible est celui appartenant à l'espèce *M. nivale*, tandis que l'isolat le moins sensible appartient à *F. torulosum*.

Chez les deux isolats de *T. atroviride* testés, une odeur de noix de coco est présente en culture sur milieu PDA, cette dernière est caractéristique de l'antifongique volatil 6 α pentyl pyrone rencontré uniquement chez les espèces *T. atroviride* et *T. viride* de la section *Trichoderma*.

D'après ce résultat, on peut conclure que les isolats de la même espèce peuvent se différencier dans les degrés d'efficacité selon le mécanisme mis en jeu ; ainsi Ta13 est doté d'un degré de mycoparasitisme plus élevé, tandis que Tn3 possède une capacité plus élevée de sécréter des substances antifongiques volatiles.

En perspectives, il est intéressant de pousser les études pour une connaissance globale des différentes espèces responsables de la pourriture racinaire et du collet ainsi que la fusariose de l'épi en Algérie. Pour cela, il est nécessaire d'effectuer un échantillonnage plus large dans les principales zones céréalières du pays et dans les différents étages bioclimatiques et sur plusieurs années, afin d'identifier les espèces existantes, leur pouvoir pathogène et leurs fréquences selon les régions. En plus, l'identification morphologique de ces espèces doit être confirmée par les outils moléculaires. De même, il est intéressant de tester l'agressivité des espèces existantes sur la partie basale et sur les épis.

En effet, la fusariose de l'épi affecte le rendement sur le plan quantitatif, mais surtout qualitatif par la production des mycotoxines nuisibles pour la santé humaine et animale. Ainsi une analyse de la capacité toxigène des isolats serait très utile.

La lutte biologique avec les isolats de *Trichoderma* spp. s'est avérée efficace au laboratoire. Afin de pousser plus les études, il serait intéressant de faire des essais en plein champs. En plus, il est intéressant d'effectuer d'autres isolements afin d'obtenir des isolats qui peuvent être plus efficaces. Il serait également intéressant de produire des biopesticides à base des agents antagonistes qui se montrent efficaces.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdallah, N. 2010.** Etude pathologique de la fusariose du blé et évaluation *in vitro* de l'activité antagoniste de *Trichoderma* spp. à l'égard de quelques isolats de *Fusarium* spp. et de *Microdochium nivale* (Fr.) Samuels et Hallett. Mém. Ing. Agr. ENSA. El-Harrach. 84p.
- Agrios, G.N. 2005.** Plant Pathology. Fifth edition, Elsevier Academic Press, San Diego, CA. 962 p.
- Akinsanmi, O.A., Backhouse, D., Simpfendorfer, S. et Chakraborty, S. 2006.** Pathogenic variation of *Fusarium* isolates associated with head blight of wheat in Australia. Journal of Phytopathology 154: 513-521.
- Alabouvette, C. et Cordier C. 2012.** Les *Trichoderma*, trois fois bénéfiques ? Bio-protecteurs, bio-fertilisants, bio-stimulant? Un peu des trois, mais gare aux généralisations. Phytoma 652 : 17-21.
- Anees, M., Tronsmo A., Edel-Hermann, V., Hjeljord, L. G., Héraud, C. et Steinberg, C. 2010.** Characterization of field isolates of *Trichoderma* antagonistic against *Rhizoctonia solani*. Fungal Biology 114 : 691-710.
- Anonyme. 2011.** Blé hybride HYNO [[http://www.hyno.com/blé hybride/cadre navigation.asp ?rub=infothèque](http://www.hyno.com/blé%20hybride/cadre%20navigation.asp?rub=infothèque)] (onglet « le blé en général »).
- Aoki, T., et O'Donnell, K. 1999.** Morphological and molecular characterization of *Fusarium pseudograminearum* sp. nov., formerly recognized as the Group 1 population of *F. graminearum*. Mycologia 91: 597-609.
- Aouali, S. et Douici-Khalfi A. 2009.** Recueil des principales maladies fongiques des céréales en Algérie. ITGC. pp. 10–25.
- Benhamou, N. et Chet, I. 1993.** Hyphal interactions between *Trichoderma harzianum* and *Rhizoctonia solani*: Ultrastructure and gold cytochemistry of the mycoparasitic process. Phytopathology 83: 1062-1071.
- Benhamou, N. et Chet, I. 1996.** Parasitism of sclerotia of *Sclerotium rolfsii* by *Trichoderma harzianum*: Ultrastructural and cytochemical aspects of the interaction. Phytopathology 86: 405-416.
- Benmokhtar, T. et Kafi, D. 1999.** Contribution à l'étude des virus des céréales, caractérisation biologique des virus de la mosaïque du blé et de l'orge : WMSV, BSMV. Mém. Ing. Agr. INA. El-Harrach. 55 p.
- Berber, F., Ouzzani Touhami, A., Badoc, A. et Douira, A. 2009.** Antagonisme *in vitro* et *in vivo* de deux *Trichoderma* à l'égard de quatre espèces de *Bipolaris* pathogènes sur le sorgho. Bull. Soc. Pharm. Bordeaux. 148: 93-114.
- Bisset, J. 1984.** A revision of the genus *Trichoderma*. I. Section Longibrachiatum sect. Nov. Canadian Journal of Botany. 62: 924-931.
- Bisset, J. 1991a.** A revision of the genus *Trichoderma*. II. Infrageneric classification. Canadian Journal of Botany 69: 2357-2372.

- Bisset, J. 1991b.** A revision of the genus *Trichoderma*. III. Section *Pachybasium*. Canadian Journal of Botany 69: 2373-2417.
- Bisset, J. 1991c.** A revision of the genus *Trichoderma*. IV. Additional notes on section *Longibrachiatum*. Canadian Journal of Botany 69: 2418-2420.
- Bissett, J. 1992.** *Trichoderma atroviride*. Canadian Journal of Botany 70: 639-641.
- Bonanomi, G., Antignani, V., Capodilupo, M. et Scala, F. 2010.** Identifying the characteristics of organic soil amendements that suppress soilborne plant diseases. Soil Biology and Biochemistry 42: 136-144.
- Booth, C. 1971.** The genus *Fusarium*. Commonwealth Mycological Institute, Kew, Surrey, England, p 237.
- Booth, C. 1977.** Laboratory guide to the identification of the major species. Commonwealth. Mycological Institute – England. 220 p.
- Bottalico, A. 1998.** *Fusarium* disease of cereals: species complex and related mycotoxin profiles in Europe. Journal of Plant Pathology 80: 85-103.
- Bouabcha, H. 2003.** Efficacité des techniques d'incorporation de quelques isolats de *Trichoderma longibrachiatum* Rifai dans la lutte contre la fusariose du blé. Mém. Ing. Agr. INA. El-Harrach. 100p.
- Boubetra, S. et Mouhamedi, F. 1998.** Contribution à l'étude des virus affectant les céréales au niveau de la région du centre d'Alger. Mém. Ing. Agr. INA. El Harrach. 69 p.
- Boughalleb, N., Souli, M., Karbous, B. et Mahjoub, M.E.L., 2006.** Identification et répartition géographique des fusarioses affectant l'épi et le pied du blé dans certaines régions du Nord de la Tunisie. EPPO Bulletin 36, 51.
- Boukhris, S. 1992.** Identification des bactéries phytopathogènes transmises par semences de blé en Algérie. Mém. Ing. Agr. I.N.A. El Harrach. Alger. 67p.
- Boulal, H., Zaghouane, O., El mourid, M. et Rezghi, S. 2007.** Guide pratique de la conduite des céréales d'automne (blé et orge) dans le Maghreb (Algérie, Maroc, Tunisie). ITGC/ICARDA. 176 p.
- Bouregghda, H. 2009.** Recherche de l'effet antagoniste de *Trichoderma* spp. à l'égard de *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris* (Padwick) Matuo et K. Sato (Foc), agent du flétrissement du pois chiche. Thèse Doct. INA. El Harrach. Alger. 145p.
- Bouroubi, N. et Djeghmoum, C. 2009.** Essai de lutte biologique par l'utilisation de *Paenibacillus polymyxa* à l'égard de la fusariose du blé. Mem. Ing. Agr. INA. El-Harrach. Alger. 75p.
- Boutigny, A.-L., Richard-Forget, F. et Barreau, C. 2008.** Natural mechanisms for cereal resistance to the accumulation of *Fusarium* trichothecenes. European Journal of Plant Pathology 121 : 411-423.
- Brennan, J. M., Fagan, B., van Maanen, A., Cooke, B. M., et Doohan, F. M. 2003.** Studies on *in vitro* growth and pathogenicity of European *Fusarium* fungi. European Journal of Plant Pathology 109 : 577-587.
- Brotman, Y., Gupta Kapuganti J. et Viterbo A. 2010. *Trichoderma*. Current Biology Vol 20 No 9 R390.

- Burgess, L.W., Backhouse, D. et Summerell, B., 2001.** Crown rot of wheat. In: Summerell, B.A., Leslie, I.F., Backhouse, D., Bryden, W.L., Burgess, L.W. (Eds.), *Fusarium- Paul E Nelson Memorial Symposium*. The American Phytopathological Society Press, St. Paul, MN, USA, pp. 271-294.
- Burgess, L.W., Summerell, B.A., Bullock, S., Gott, K. P., et Backhouse, D. 1994.** Laboratory manual for *Fusarium* research, 3rd edn. Sydney, Australia, University of Sydney and Botanical Garden, pp 133.
- Burgess, L.W., Wearing, A.H., et Toussoun, T.A. 1975.** Surveys of *Fusaria* associated with crown rot of wheat in eastern Australia. *Australian Journal of Agricultural Research* 26: 791-799.
- Burlakoti, R. R., Estrada, R., Rivera, V. V., Boddada, A., Secor, G. A. et Adhikari, T. B. 2007.** Real-time PCR quantification and mycotoxin production of *Fusarium graminearum* in wheat inoculated with isolates collected from potato, sugar beet, and wheat. *Phytopathology* 97 : 835-841.
- Cahagnier, B. 2001.** Céréales et mycotoxines. Généralités, présences, dosage. *Industrie des céréales* 122 : 22-29.
- Campbell, K. et Lipps, P. 1998.** Allocation of resources : Source of variation in *Fusarium* head blight screening nurseries. *Phytopathology* 88: 1078-1086.
- Caron, D. 1993.** Les fusarioses. In *Maladies des blés et orges* (ITCF, ed.), 30- 39 pp.
- Chakraborty, S., Obanor, F., Westecott, R. et Abeywickrama, K. 2010.** Wheat crown rot pathogens *Fusarium graminearum* and *F. pseudograminearum* lack specialization. *Phytopathology* 100: 1075-1065.
- Chehat, F. 2007.** Analyse macroéconomique des filières, la filière blés en Algérie. Projet PAMLIM « Perspectives agricoles et agroalimentaires Maghrébines Libéralisation et Mondialisation » Alger : 7-9 avril 2007.
- Chekali, S., Gargouri, S., Paulitz, T., Nicol, J. M., Rezgui, M. et Nasraoui, B. 2010.** Effects of *Fusarium culmorum* and water stress on durum wheat in Tunisia. *Crop Protection* 30: 718-725.
- Chen, L., Yang, X., Raza, W., Luo, J., Zhang, F. et Shen, Q. 2011.** Solid-state fermentation of agro-industrial wastes to produce bioorganic fertilizer for the biocontrol of *Fusarium* wilt of cucumber in continuously cropped soil. *Bioresource Technology* 102: 3900-3910.
- Clavel, A. J. 2006.** Diagnostic des accidents du blé dur. ARVALIS Institut du végétal. Paris. 105p.
- Clear, R. et Patrick, S., 2006.** *Fusarium* head blight in western Canada. Canadian Grain Commission. /<http://grainscanada.gc.ca>.
- Cotxarrera, L., Trillas-Gay M. I., Steinberg, C. et Alabouvette, C. 2002.** Use of sewage sludge compost and *Trichoderma asperellum* isolates to suppress *Fusarium* wilt of tomato. *Soil Biology and Biochemistry* 34: 467-476.
- Daami-Remadi, M. et El Mahdjoub, M. 2001.** Lutte biologique contre la pourriture aqueuse des tubercules de pomme de Terre par *Trichoderma harzianum*. *Ann. L'INRAT* 74: 167-186.

- Dane, Y. 2012a.** Etude de la croissance *in vitro* et de l'agressivité de quelques isolats de *Fusarium culmorum* (W.G. Sm.) Sacc. agent de la pourriture racinaire et de la gale de l'épi du blé. Mém. Ing. Agr. INA. El-Harrach. Alger. 60p.
- Dane, Y. 2012b. Comparaison de l'efficacité de *Trichoderma atroviride* P. Karsten et de deux biofongicides (Fongibacter et Bioten) dans la lutte contre *Fusarium culmorum* (W.G. Sm.) Sacc. agent de la pourriture racinaire et de la gale de l'épi du blé. Mém. Master. Agronomie. INA. El-Harrach. Alger. 56p.
- Demirci, E., et Dane, E. 2003.** Identification and pathogenicity of *Fusarium* spp. from stem bases of Winter Wheat in Erzurum, Turkey. *Phytoparasitica* 3: 170-173.
- Dill Macky, R., et Jones R. K. 2000.** The effect of previous crop residues and tillage on *Fusarium* head blight of wheat. *Plant Disease* 84 : 71-76.
- Djebari, B. 2005.** Contribution à la connaissance des bactérioses du blé, de l'orge et du triticale. Thèse. Maj. Agr., INA. El-Harrach. 92 p.
- Djelailia, F. 2011.** Etude pathologique de quelques espèces de *Fusarium* spp. et essai d'un biofongicide (Fongibacter) dans la protection contre la fusariose du blé. Mém. Ing. Agr. ENSA. El-Harrach. Alger. 76p.
- Djelailia, F. 2012.** Etude pathologique de quelques isolats de *Fusarium* spp. agent causal de la fusariose du blé et lutte biologique avec *Trichoderma atroviride* (Ta13). Mém. Master 2. Centre universitaire de Khemis-Meliana. 55p.
- Djerbi, M. 1969.** Etude écologique et histologique des actions parasitaires des espèces fusarienne à l'égard du blé. Faculté des sciences Paris. Thèse du 3^{ème} cycle de science naturel, pp 111.
- Djermoun, A. 2009.** La production céréalière en Algérie : les principales caractéristiques. *Revue Nature et Technologie* 01 : 45-53.
- Dodd, S. L., Lieckfeldt, E. et Samuels, G. J. 2003.** *Hypocrea atroviridis* sp. nov., the teleomorph of *Trichoderma atroviride*. *Mycologia* 95 : 27-40.
- Druzhinina, I. S., Seidl-Seiboth, V., Herrera-Estrella, A., Benjamin, A. H., Kenerley, C. M., Monte, E., Prasun, K. M., Zeilinger, S., Grigoriev, I. V. et Kubicek, C.P. 2011.** *Trichoderma*: the genomics of opportunistic success. *Nature Reviews Microbiology* 9: 749-759.
- Dubos, B. 1986.** L'utilisation des *Trichoderma* comme agent de lutte biologique à l'égard de deux parasites aériens : *Chondrostereum purpureum* (Pers. Ex Fr.) Pouzar (Plomb des arbres fruitiers) et *Botrytis cinerea* Pers. (Pourriture grise de la vigne). Pp. 35-49. In : L'emploi d'ennemis naturels dans la production des cultures. Versailles, 10 janvier 1985. Ed. INRA (les colloques de l'INRA, n° 34).
- Duc, P. et Bezet, M. 2003.** Blé : comment la fusariose de l'épi joue sur les qualités technologique et sanitaires. *Phytoma – la défense des végétaux* 566 : 19-21.
- Edwards, S., O'Callaghan, J., et Dobson, A.D.W. 2002.** PCR based detection and quantification of mycotoxigenic fungi. *Mycological Research* 106: 1005-1025.
- Feliachi, K. 2000.** Programme de développement de la céréaliculture en Algérie. ITGC. El Harrach. Alger.

- Feliachi, K. 2002.** Programme de développement de la céréaliculture en Algérie. ITGC. El Harrach. Alger.
- Fernandez, M. R. et Chen, Y. 2005.** Pathogenicity of *Fusarium* species on different plant parts of spring wheat under controlled conditions. *Plant Disease* 89: 164-169.
- Fontenelle, A. D. B., Guzzo, S. D., Lucon, C. M. M. et Harakava, R., 2011.** Growth promotion and induction of resistance in tomato plant against *Xanthomonas euvesicatoria* and *Alternaria solani* by *Trichoderma* spp. *Crop protection* 30: 1492-1500.
- Gajera, H. P. et Vakharia D. N. 2010.** Molecular and biochemical characterization of *Trichoderma* isolates inhibiting a phytopathogenic fungi *Aspergillus niger* Van Tieghem. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 74: 274-282.
- Gams, W. et Bisset, J. 1998.** Morphology and identification of *Trichoderma*. Pp : 1-33. *Trichoderma and Gliocladium* Vol. 1. Edited by Kubicek C. P., and Harman, G. E., Taylor & Francis. London.
- Gargouri, S., Hadjlaoui, M., Guermach, A. et Marrakchi, M. 2001.** Identification des espèces fongiques associées à la pourriture racinaire du blé et étude de leur répartition selon les étages bioclimatiques en Tunisie. *Bulletin OEPP* 31: 499-503.
- Gargouri, S., 2003.** Evaluation de l'incidence de la pourriture du pied et étude de la diversité génétique de la structure des populations des espèces de *Fusarium* associées à la maladie. Thèse de Doctorat, Université de Tunis El Manar, Faculté des sciences de Tunis Département de Biologie. Tunisie, 108 pp.
- Geiser, D.M., Jimenez-Gasco, M.M., Kang, S., Makalowska, I., Veeraraghavan, N., Ward, T.J., Zhang, N., Kuldau, G.A., et O'Donnell, K. 2004.** FUSARIUM-ID v. 1.0: A DNA sequence database for identifying *Fusarium*. *European Journal of Plant Pathology* 110: 47-479.
- Gilbert, J. et Tekouz, A. 2000.** Effect of *Fusarium* head blight and seed treatment on germination, emergence, and seedling vigour of wheat. *Canadian Journal of Plant Pathology* 17: 252-259.
- Goswami, R.S. et Kistler H.C. 2004.** Heading for disaster: *Fusarium graminearum* on cereal crops. *Molecular Plant Pathology* 5: 515-525.
- Gustafson, P., Raskina, O., Ma, X. et Nevo, E. 2009.** Wheat evolution, domestication and improvement. *In* : Carver, B. F., Wheat science and trade. pp. 5-29.
- Gutzuiller, A., Czeglédé, L. et Stoll, P. 2005.** Efficacité d'adsorbants contre les mycotoxines de *Fusarium* chez le porc. *Revue Suisse Agric.* 37 (3) : 121-129.
- Hamadache, A. 1995.** Les mauvaises herbes des grandes cultures. *Revue Céréaliculture ITGC.* Alger, 40 p.
- Hamadache, A., Abdellaoui, Z. et Aknine M. 2002.** Facteurs agrotechniques d'amélioration de la productivité du blé dur en Algérie. Cas de la zone sub-humide. *Revue Semestrielle* 10 : 5-18.
- Hamel, A. N. 2002.** Comparaison de deux techniques de l'apport de l'agent antagoniste *Trichoderma* dans la lutte contre la fusariose du blé: *Fusarium graminearum* et *Fusarium culmorum*. *Mém. Ing. Agr. INA.* El-Harrach. 56p.

- Harrouche, F. 1998.** Aperçu sur l'infestation de quelques parcelles de céréales par *Heterodera avenae* dans la région de Staouali. Mém. Ing. Agr. INA.EL- Harrach. 83p.
- Howell, C. R. 2006.** Understanding the mechanisms employed by *Trichoderma virens* to effect biological control of cotton diseases. *Phytopathology* 96 : 178-180.
- Hsu, M.C., Chen, K.W., Lo, H.J., Chen, Y.C., Liao, M.H., Lin, Y.H., et Li, S.Y. 2003.** Species identification of medically important fungi by use of real-time Light CyclerPCR. *Journal of Medical Microbiology* 52: 1071-1076.
- Isebbbaert, S., De Saeger, S., Devreese, R., Maene, P., Hermans, B. et Haesaert, G. 2009.** Mycotoxin-producing *Fusarium* species occurring in winter wheat in Belgium (Flanders) during 2002-2005. *Phytopathology* 157: 108-116.
- Jijakli, H. 2003.** La lutte biologique en phytopathologie. Pp : 289-311. *In* : Lepoivre, P. phytopathologie. Ed.les presses agronomiques des Gembloux.
- Jones, R. K. 2000.** Assesments of *Fusarium* head blight of wheat and Barley in response to fungicide treatment. *Plant Disease* 84 : 1021-1030.
- Kammoun-Gargouri, L. 2010.** La fusariose de l'épi de blé en Tunisie : identification, pathogénie et chémotypage des espèces toxigènes. Thèse de Doctorat, Université de Tunis El Manar, Faculté des sciences de Tunis Département de Biologie. Tunisie, 124 pp.
- Keith, A. et Seifert, D. Sc. 2001.** Systématique of fungal plant disease .www.BS #Spp. Org.uk.
- Kellou, R. 2008.** Analyse du marché algérien du blé dur et des opportunités d'exportation pour les céréaliers français dans le cadre du pole du compétivité Quali-Méditerranée. Thèse. Master of science n° 93. CIHEAM. IAM. Montpellier. 160p.
- Khalifa, M. 2006.** Common root rot of wheat in Syria and DNA variability within *Fusarium* spp. as a major pathogène. Thèse de doctorat. University of Aleppo. Syria. 109p.
- Kolmer, J., Chen, X. et Jin, Y. 2009.** Diseases which challenge global wheat production – the wheat rusts. *In* : Carver, B. F.,Wheat science and trade. Pp. 89-124.
- Kosiak, B., Skjerve, E., Thrane, U. et Torp, M. 2003.** The prevalence and distribution of *Fusarium* species in Norwegian cereals: a survey. *Acta Agric. Scand.* 53: 168-176.
- Kriel, W. 2006.** *Fusarium* head blight of wheat: a most challenging disease. <http://saspp.org/content/view/94/11>.
- Kumar, A., Scher, K., Mukherjee, M., Pardovitz-Kedmi ,E., Sible, G. V., Singh, U. S., Kale, S. P., Mukherjee, P. K. et Horwitz, B. A. 2010.** Overlapping and distinct functions of two *Trichoderma virens* MAP kinases in cell-wall integrity, antagonistic properties and repression of conidiation. *Biochemical and Biophysical Research Communications* 398: 765-770.
- Kumar, S., Sstack, R. W., Friesen, T. L. et Faris, J. D. 2007.** Identification of novel *Fusarium* head blight resistance quantitative trait locus on chromosome 7A in tetraploid wheat. *Phytopathology* 97 : 592-597.
- Lamy Krafft, P. et Roquebert, M. F. 1981.** Analyse des interactions entre deux champignons antagonistes : *Trichoderma viride* Pers. et *Botrytis cinerea* Pers. Ex Fr. Études préliminaires. *Cryptogam. Mycology* 2 : 137-151.

- Leslie, J. et Summerell, B. 2006.** The *Fusarium* Laboratory Manual. First edition, Blackwell Publishing. 387p.
- Liu, C., Mitter, V., Magner, T., Ban, T. et Chakraborty, S. 2008.** Relationship between resistance to *Fusarium* head blight and crown rot in hexaploid wheat. CSIRO Plant Industry.
- Lyøse, E., Bone, K. R. et Klemsdal, S. S. 2008.** Identification of up-regulated genes during zearalenone biosynthesis in *Fusarium*. European Journal of Plant Pathology 122 : 505-516.
- Mahmoudi, M. E. 2004.** Etude de l'effet de combinaison de deux techniques d'incorporation de l'agent antagoniste de *Trichoderma* Pers. dans la lutte contre *Fusarium graminearum* (Schwabe) téléomorphe *Giberella zeae* (Schwabe) Petch agent de la pourriture racinaire du blé. Mém. Ing. Agr. INA. El-Harrach. 80p.
- Marshal, D. 2009.** Diseases which challenge global wheat production – powdery mildew and leaf and head blights. In : Carver, B. F., Wheat science and trade. pp. 155- 169.
- Martinez-Medina, A., Roldan, A. et Pascual, J. A. 2011.** Interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and *Trichoderma harzianum* under conventional and low input fertilization field condition in melon crops: Growth response and *Fusarium* wilt biocontrol. Applied Soil Ecology 47: 98-105
- Mascher, F., Michel, V. et Browne, R. A. 2005.** Sélection de variétés de blé et de triticale résistantes à la fusariose sur épi. Revue suisse Agricole. 37 (5): 189-194.
- Matarese, F., Sarrocco, S., Gruber, S., Seidl-Seiboth, V. et Vannacci, G. 2012.** Biocontrol of *Fusarium* head blight: interactions between *Trichoderma* and mycotoxigenic *Fusarium*. Microbiology 158: 98-106.
- Mauler-Machnik, A. et Suty, A. 1997.** New finding of the epidemiology, importance and control of *Fusarium* ear blight on wheat. Cereal Research Community 25 : 705-711.
- Mergoum, M., 1997.** Evaluation of durum wheat germplasm to root rot (*Fusarium culmorum* and *Cochliobolus sativus*) in Morocco. Plant Research Newsletter 109 : 11-14.
- Mesterhazy, A. 1983.** Breeding wheat for resistance to *Fusarium Graminearum* and *F. culmorum*. Zeitschrift fur Pflanzenzüchtung 91: 295-311.
- Mesterhazy, A. 1984.** A laboratory method to predict pathogenicity of *Fusarium Graminearum* in field and resistance of wheat to scab. Acta Phytopathologica Academiae Scientiarum Hungariae 19: 205-218.
- Michel, V. 2001.** La sélection de variétés de blé et de triticale résistantes aux maladies. Revue suisse Agricole 33 (4): 133-140.
- Miedaner, T., Gang, G., Schilling A. G., Geiger, H. H. 1997.** Aggressiveness and mycotoxin production of populations of *Fusarium culmorum* and *Fusarium graminearum* in winter rye. Cereal Research Communication 25: 471-475.
- Mishra, P.K., Fox, R.T.V. et Culham, A. 2003.** Inter-simple sequence repeat and aggressiveness analyses revealed high genetic diversity, recombination and long-range dispersal in *Fusarium culmorum*. Annals of Applied Biology 143: 291-301.

- Moule, C. 1971.** Phytotechnie spéciale, Tome II Céréales. La maison rustique. Paris, France. 235 p.
- Muthomi, G. W., Riungu, G., Ndung'u, J. K. et Narla, R. D. 2007.** Occurrence of wheat head blight and *Fusarium* species infecting wheat. African Crop Science Conference Proceeding 8: 863-867.
- Muthomi, J.W., Schutze, A., Dehne, H.W., Mutitu, E.W., et Oerke, E.C. 2000.** Characterisation of *Fusarium culmorum* isolates by mycotoxin production and aggressiveness to winter wheat. Journal of Plant Disease and Protection 107: 113-23.
- Nelson, P.E., Toussoun, T.A., et Marasas, W.F.O. 1983.** *Fusarium* species, an illustrated manual for identification. The Pennsylvania University Press, London.
- Nirenberg, H. I. 1995.** Morphological differentiation of *Fusarium sambucinum* Fückel *sensu stricto*, *F. torulosum* (Berk. & Curt.) Nirenberg comb. nov., and *F. venenatum* Nirenberg sp. nov. Mycopathologia 129:131-141.
- O'Donnell, K., Kistler, H.C., Cigelnik, E., et Ploetz, R.C. 1998.** Multiple evolutionary origins of the fungus causing Panama disease of banana: Concordant evidence from nuclear and mitochondrial gene genealogies. Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A. 95: 2044-2049.
- O'Donnell, K., Kistler, H.C., Tacke, B.K., et Casper, H.H. 2000 a.** Gene genealogies reveal global phylogeographic structure and reproductive isolation among lineages of *Fusarium graminearum*, the fungus causing wheat scab. Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A. 97: 7905-7910.
- O'Donnell, K., Nirenberg, H.I., Aoki, T., et Cigelnik, E. 2000 b.** A multigene phylogeny of the *Gibberella fujikuroi* species complex: Detection of additional phylogenetically distinct species. Mycoscience 41: 61-78.
- Osborne, L. E. et Stein, J. M. 2007.** Epidemiology of *Fusarium* head blight on small-grain cereals. International Journal of Food Microbiology 119: 103-108.
- Palazzini, J. M., Ramirez M. L., Torres, A. M. et Chulze, S. 2007.** Potentiel biocontrol for *Fusarium* head blight and deoxynivalenol production in wheat. Crop Protection 26: 1702-1710.
- Pandy, A. K., Arora, D. K., Pandey, R. R., et Srivastava, A. K. 1996.** Integrated control of *Fusarium* wilt of chickpea by solar heating of soil amended with oilseed meals and fungicides. Indian Phytopathology 49: 247-253.
- Parry, D.W., Jenkinson, P. et McLeod, L. 1995.** *Fusarium* ear blight (scab) in small grain cereals_a review. Plant Pathology 44: 207-238.
- Parry, D.W., Pettit, T.R., Jenkinson, P., et Lees, A.K. 1994.** The cereal *Fusarium* complex. In « Ecology of plant pathogens ». (Eds JP Blakeman, B Williamson) (CAB International: Wallingford, UK) pp. 301-320.
- Pettitt, T. R., Parry, D. W. et Polley, R. W. 1996.** Effect of temperature on the incidence of nodal foot rot symptoms in winter wheat crops in England and Wales caused by *Fusarium culmorum* and *Microdochium nivale*. Agricultural and Forest Meteorology 79: 233-242.
- Qu, B., Li, H.P., Zhang, J.B., Huang, T., Carter, J., Liao, Y.C. et Nicholson, P. 2008.** Comparison of genetic diversity and pathogenicity of *Fusarium* head blight

- pathogens from China and Europe by SSCP and seedling assays on wheat. *Plant Pathology* 57: 642-651.
- Reicher, T. 2004.** Foodborne diseases in communal catering. Proceedings of the Fifth World Congress Foodborne Infections and Intoxications, Federal Institute for Risk Assessment, Berlin, 1: 243-250.
- Renane, R. 2008.** Evaluation de l'efficacité in vitro et in vivo de quelques espèces de *Trichoderma* spp. à l'égard de quelques isolats de *Fusarium* spp. dans la protection du blé contre la fusariose. Mém. Ing. Agr. INA. El-Harrach. Alger. 85p.
- Rifai, M. A. 1969.** A revision of the genus *Trichoderma*. *Mycological papers* 116: 1-56.
- Rojan, P. J., Tyagi, R. D., Prévost, D., Satinder, K. B. Pouleur, S. et Surampalli R. Y. 2010.** Mycoparasitic *Trichoderma viride* as a biocontrol agent against *Fusarium oxysporum* f. sp. *Adzuki* and *Pythium arrhenomanes* and as a growth promoter of soybean. *Crop Protection* 29: 1452-1459.
- Rojo, F. G., Reynoso, M. M., Ferez, M., Chulze, S. N. et Torres, A. M. 2007.** Biological control by *Trichoderma* species of *Fusarium solani* causing peanut brown root rot under field conditions. *Crop Protection* 26: 549-555.
- Samuels, G. J. 1996.** *Trichoderma* : a review of biological and systematics of the genus. *Mycological Research* 100: 923-935.
- Samuels, G. J. 2006.** *Trichoderma* : Systematics, the sexual state, and ecology. *Phytopathology* 96: 195-206.
- Samuels, G. J., Chaverri, P., Faar, D. F. et Mc Cray, E. B. 2006.** *Trichoderma* online://nt.ars-grin.gov/taxadescriptions/keys/Trichoderma/index.cfm.
- Samuels, G. J., Dodd, S. L., Gams, W., Castlenry, L. A. et Petrin, O. 2002.** *Trichoderma* species associated with the green mold epidemic of commercially grown *Agaricus bisporus*. *Mycologia* 94 : 146-170.
- Saur, L. et Benacef, N. 1993.** Relation entre les symptômes de fusariose et la perte de rendement chez le blé tendre. *Agronomie* 13 : 829-833.
- Sayoud, R. 1987.** Les maladies des céréales. *Céréaliculture* 17 : 20-21 pp.
- Sayoud, R., Ezzahiri, B. et Bouznad, Z. 1999.** Les maladies des céréales et des légumineuses alimentaires au Maghreb. ITGC. Alger. 64p.
- Schisler, D. A., Khan, N. I., Boehm, M. J., Lipps, P. E., Slininger, P. J. et Zhang, S. 2006.** Selection and evaluation of the potential of choline-metabolizing microbial strains to reduce *Fusarium* head blight. *Biological Control* 39 : 497-506.
- Sidhoumi, L. 2001.** Essai de lutte biologique contre deux agents de la fusariose du blé: *Fusarium graminearum* et *Fusarium culmorum*. Mém. Ing. Agr. INA. El-Harrach. 65p.
- Simon, H., Codaccioni, P. et Lecoeur X. 1989.** Produire des céréales à paille. *Agriculture d'aujourd'hui, sciences, techniques, application.* pp. 168 – 200.
- Simpson, D. R., Rezanoor, H. N., Parry, D.W. et Nicholson, P. 2004.** Evidence for differential host preference in *Microdochium nivale* var. *majus* and *Microdochium nivale* var. *nivale*. *Plant Pathology* 49: 261-268.
- Singh Lakhesar, D. P., Backhouse, D. et Kristiansen, P. 2010.** Nutritional constraints on displacement of *Fusarium pseudograminearum* from cereal straw by antagonists. *Biological Control* 55: 241–247.

- Sivan, A., et Chet, I. 1986.** Biological control of *Fusarium* spp. in cotton wheat and muskmelon by *Trichoderma harzianum*. *Journal of phytopathology* 116 : 39-47.
- Smadhi, D., Mouhouche, B., Zella, L. et Semiani, M. 2009.** Pluviométrie et céréaliculture dans le système agro- économique de L'Algérie. *Sciences et technologie* 29 : 56-62.
- Smiley, R. W., Bakhouse, D., Lucas, P. et Paulitz, T. C. 2009.** Diseases which challenge global wheat production – root, crown, and culm rots. *In* : Carver, B. F., *Wheat science and trade*. pp.125-152.
- Smiley, R.W., Gourlie, J.A., Easley, S.A., et Patterson, L.M. 2005.** Pathogenicity of fungi associated with the wheat crown rot complex in Oregon and Washington. *Plant Disease* 89: 949-957.
- Taghlit, F. 1986.** Lutte intégrée contre les ennemis, ravageurs et déprédateurs des céréales. INA Alger. 15 p.
- Tan, M.-K., et L. M. Niessen. 2003.** Analysis of rDNA ITS sequences to determine genetic relationships among, and provide a basis for simplified diagnosis of, *Fusarium* species causing crown rot and head blight of cereals. *Mycological Research* 107:811-821.
- Tanji, A. 2000.** Mauvaises herbes du blé et de l'orge dans le périmètre du Tadla. *Al Awamia* 102 : 49-57.
- Tanji, A. 2002.** Synthèse de 117 essais de désherbage chimique du blé dur réalisés au Maroc entre 1970 et 2001. *Al Awamia* 106: 11-38.
- Tekauz, A., McCallum, B.D. et Gilbert, J. 2000.** *Fusarium* head blight of barley in western Canada: a review. *Canadian Journal of Plant Pathology* 22: 9-16.
- Toussoun, T. A. et Nelson, P. E. 1976.** *Fusarium* a pictorial guide to the identification of *Fusarium* species according to the taxonomic system of synder and Hansen. Second edition the persel Perselvania University Press. University Park and London. 43 p.
- Tunali, B., Nicol, J., Yelda Erol, F. et Altiparmak, G. 2006.** Pathogenicity of Turkish crown and head scab isolates on stem bases on winter wheat under greenhouse conditions. *Journal of Plant Pathology* 5: 143-149.
- Vidhyasekaran, P. 2004.** Concise encyclopedia of plant pathology. Food Products Press and The Haworth Reference Press. 587p.
- Vigier, B., Reid, L. M., Seifert, K. A., Stewart, D. W. et Hamilton R. I. 1997.** Distribution and prediction of *Fusarium* species associated with maize ear rot in Ontario. *Canadian Journal of Plant Pathology* 19 : 60-65.
- Vinale, F., Sivasithamparam, K. et Ghisalberti, E. L. 2008.** *Trichoderma*-plant-pathogen interactions. *Soil Biology and Biochemistry* 40: 1-10.
- Vogelgsang, S., Suyok, M., Hecker, A., Jenny, E., Krska, R., Schuhmacher, R. et Forrer, H. R. 2008.** Toxigenity and pathogenicity of *Fusarium poae* and *Fusarium avenaceum* in wheat. *European Journal of Plant Pathology* 122: 265-276.
- Wagacha, J. M., Oerke, E. C., Dehneh, W. et Steiner, U. 2012.** Colonization of wheat seedling leaves by *Fusarium* specie as observed in growth chambers: a role as inoculum for head blight infection?. *Fungal Ecology* xxx: 1-10.

- Wagacha, J.M. et Muthomi, J.W., 2007.** *Fusarium culmorum*: infection process, mechanisms of mycotoxin production and their role in pathogenesis in wheat. *Crop Protection* 26: 877-885.
- Weise, M.V. 1987.** Compendium of wheat diseases. Third printing 1998, APS Press: 42-43.
- Whipps, J. M. et Mark P. M. 2009.** Biological control agents in plant disease control. *In* : Walters, D. Disease control in crops, biological and environmentally friendly approaches. Crop and Soil Systems Research group. Edinburgh, UK, pp. 27-61.
- Windels, C.E. 1991.** Current status of *Fusarium* taxonomy. *Phytopathology* 81:1048-1051.
- Wu, A.B., Li, H.P., Zhaco, C.S. et Liao, Y.C. 2005.** Comparative pathogenicity of *Fusarium graminearum* isolates from China revealed by wheat coleoptile and floret inoculations. *Mycopathologia* 160: 75-83.
- Xu, X.-M., Nicholson, P., Thomset, M. A., Simpson, D., Cooke, B. M., Doohan, F. M., Brennan, J., Monaghan, S., Moretti, A., Mule, G., Hornok, L., Beki, E., Tatnell, J., Ritieni, A. et Edwards S. G. 2008.** Relationship between the fungal complex causing *Fusarium* head blight of wheat and environmental conditions. *Phytopathology* 98 : 69-78.
- Yli-Mattila, T., Paavanen-Huhtala, S., Parikka, P., Konstantinova, P. et Gagkaeva T. 2004.** Molecular and morphological diversity of *Fusarium* species in Finland and northwestern Russia. *European Journal of Plant Pathology* 110: 573-585.
- Yli-Mattila, T., Ward, T. J., O'Donnell, K., Proctor, R. H., Burkin, A. A , Kononenko, G. P., Gavrilova, O. P., Aoki, T., McCormick S. P. et Gagkaeva T. Y. 2010.** *Fusarium sibiricum* sp. nov, a novel type A trichothecene-producing *Fusarium* from northern Asia closely related to *F. sporotrichioides* and *F. langsethiae*. *International Journal of Food Microbiology* 147: 58-68.
- Yu, J.-B., Bai, G.-H., Zhou, W.-C., Dong, Y.-H. et Kolb, F. L. 2008.** Quantitative trait loci for *Fusarium* head blight resistance in recombinant inbred population of Wangshuibai/Wheaton. *Phytopathology* 98 : 87-94.
- Yuen, G. Y. et Schoneweis, S. D. 2007.** Strategies for managing *Fusarium* head blight and deoxynivalenol accumulation in wheat. *International journal of Food Microbiology* 119: 126-130.
- Yves, D., Sylvie R. et Lauzon, M. 2007.** L'épidémiologie de la fusariose chez le blé et l'orge. Bulletin d'information. Grandes cultures N° 04.
- Zeitoun, R. 2011.** Procédé de fractionnement de la matière végétale_ application à la production des polysaccharides du son et de la paille de blé ; thèse de doctorat, université de Toulouse. 264p.
- Zillinsky, F.J. 1983.** Maladies communes des céréales à paille. Guide d'identification CIMMYT. 141 p.

ANNEXES

Annexe 1 : Composition des milieux utilises

- Composition de milieu PDA (Potato Dextrose Agar)

-Pomme de terre : 200g

-Glucose : 20 g

-Agar : 20 g

-Eau distillée stérile : Qsp 1000 ml.

Le milieu est autoclavé à 120°C pendant 20 mn.

- Composition de milieu PDB (Potato Dextrose Broth)

-Pomme de terre : 200g

-Glucose : 20g.

-Eau distillée stérile : Qsp 1000 ml.

Le milieu est autoclavé à 120°C pendant 20 mn.

Remarque : les valeurs présentées avec la couleur rouge dans tous les tableaux des annexes sont significatives et la valeurs en noir ne sont pas significatives.

Annexe 2 : Analyses statistiques pour la croissance mycélienne des isolats dans différentes températures.

Tableau 1. Analyse de la variance des espèces pour le test des températures

Effet	SC	DDL	MC	F	P
O. origine	282063,0	1	282063,0	4196,816	0,000000
Température	2721,7	3	907,2	13,499	0,000000
Espèce	68345,9	6	11391,0	169,487	0,000000
Temp*espèce	10932,4	18	607,4	9,037	0,000000
Erreur	19087,3	284	67,2		

Tableau 2. Classement des espèces selon le test LSD de Fisher au seuil de 5%

Complexe fongique pourriture racinaire et fusariose de l'épi

Espèce	Croissance moyenne	1	2	3	4
<i>F. torulosum</i>	30,41667	****			
<i>F. solani</i>	31,37500	****			
<i>F. verticillioides</i>	34,75000	****	****		
<i>M. nivale</i>	40,00000		****		
<i>F. poae</i>	65,41667			****	
<i>F. graminearum</i>	65,44444			****	
<i>F. culmorum</i>	71,70098				****

Tableau 3. Analyse de la variance des isolats pour le test des températures

Effet	SC	DDL	MC	F	P
O. origine	1254382	1	1254382	140124,3	0,00
Température	22900	3	7633	852,7	0,00
Isolat	77052	25	3082	344,3	0,00
Temp*isolat	19452	75	259	29,0	0,00
Erreur	1862	208	9		

Tableau 4. Classement des températures selon le test LSD de Fisher au seuil de 5%

Température	Diamètre moyen	1	2	3	4
15°C	52,70513	****			
20°C	57,46154		****		
30°C	70,12821			****	
25°C	73,33333				****

Tableau 5. Classement des températures pour *F. culmorum*

Température	Diamètre moyen	1	2	3	4
15°C	59,70588	****			
20°C	61,00000		****		
30°C	81,17647			****	
25°C	84,92157				****

Tableau 6. Classement des températures pour *F. graminearum*

Température	Diamètre moyen	1	2	3	4
15°C	53,00000	****			
30°C	59,22222		****		
20°C	71,55556			****	
25°C	78,00000				****

Tableau 7. Classement des températures pour *F. solani*

Température	Diamètre moyen	1	2	3
15°C	25,50000		****	
20°C	31,16667	****		
25°C	31,33333	****		
30°C	37,50000			****

Tableau 8. Classement des températures pour *F. verticillioides*

Température	Diamètre moyen	1	2	3	4
15°C	22,33333	****			
20°C	27,00000		****		
25°C	43,33333			****	
30°C	46,33333				****

Température	Diamètre moyen	1	2	3
15°C	20,00000		****	
20°C	29,00000	****		
25°C	31,66667	****		
30°C	41,00000			****

Tableau 9. Classement des températures pour *F. torulosum*Tableau 10. Classement des températures pour *F. poae*

Température	Diamètre moyen	1	2	3
25°C	52,33333		****	
15°C	62,66667			****
30°C	70,33333	****		
20°C	76,33333	****		

Tableau 11. Classement des températures pour *M. nivale*

Température	Diamètre moyen	1	2	3
30°C	33,00000		****	
25°C	39,00000	****		
15°C	40,33333	****		
20°C	47,66667			****

Annexe 3 : Analyses statistiques pour l'effet des isolats sur la croissance du coléoptile in vitro

Tableau 1. Analyse de la variance des espèces pour la croissance du coléoptile

Complexe fongique pourriture racinaire et fusariose de l'épi

Effet	SC	DDL	MC	F	P
O. Origine	368,5575	1	368,5575	197,7986	0,000000
Température	45,4351	3	15,1450	8,1281	0,000033
Espèce	152,7514	6	25,4586	13,6632	0,000000
Temp*espèce	98,6865	18	5,4824	2,9424	0,000078
Erreur	529,1763	284	1,8633		

Tableau 2. Classement des espèces selon le test LSD de Fisher au seuil de 5%

Espèce	Croissance de coléoptile	1	2
<i>F. graminearum</i>	95,17	****	
<i>F. culmorum</i>	92,68	****	
<i>F. poae</i>	92,67	****	
<i>F. verticillioides</i>	90,95	****	
<i>F. torulosum</i>	81,42		****
<i>M. nivale</i>	81,36		****
<i>F. solani</i>	78,41		****

Tableau 3. Analyse de la variance des isolats pour la croissance du coléoptile.

Effet	SC	DDL	MC	F	P
O. Origine	525,9808	1	525,9808	1569,942	0,00
Température	134,4150	3	44,8050	133,733	0,00
Isolat	371,1484	25	14,8459	44,312	0,00
Température*Isolat	189,7792	75	4,5304	13,522	0,00
Erreur	69,6867	208	0,3350		

Isolat	% de retard	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
FS.01.11	59,2857	**													
MN.01.11	81,3690		**												
FT.01.11	81,4286		**												
FC.08.11	84,8810			**											
FC.06.11	86,6071			**	**										
FC.02.11	86,9048			**	**	**									
FC.03.11	89,8214				**	**	**								
FC.11.11	90,1190					**	**	**							
FS.02.11	90,3571						**	**	**						
FV.01.11	90,9524						**	**	**	**					
FC.05.11	92,0833						**	**	**	**	**				
FC.01.11	92,1429						**	**	**	**	**				
FP.01.11	92,6786						**	**	**	**	**	**			
FG.02.11	92,9762						**	**	**	**	**	**			
FC.12.11	93,3333							**	**	**	**	**			
FC.10.11	93,5119								**	**	**	**			
FC.07.11	93,9286									**	**	**			
FG.01.11	94,1667									**	**	**			
FC.09.11	94,5238										**	**	**		
FC.13.11	94,8214										**	**	**		
FC.16.11	94,9405										**	**	**		
FC.17.11	95,7143											**	**	**	
FC.04.11	95,8929											**	**	**	
FC.15.11	97,7976												**	**	**
FC.14.11	98,6310													**	**
FG.03.11	100,000														**

Tableau 4. Classement des isolats (pourcentage de retard de la croissance du coléoptile par rapport au témoin) selon le test LSD au seuil de 5%.

Température	% de retard de la croissance de coléoptile	1	2	3	4
30°C	82,95788	****			
15°C	91,40110		****		
25°C	93,27839			****	
20°C	95,26557				****

Tableau 5. Classement des températures pour toutes les espèces selon le test LSD au seuil de 5%.

Tableau 6. Classement des températures pour *F. culmorum*

Température	% moyen de retard de la croissance de coléoptile	1	2	3
30°C	82,82913		****	
15°C	90,53221			****
20°C	98,44538	****		
25°C	98,93557	****		

Tableau 7. Classement des températures pour *F. graminearum*

Température	% de retard de la croissance de coléoptile moyen	1	2
30°C	92,93651	****	
25°C	93,17460	****	
15°C	97,69841		****
20°C	99,04762		****

Tableau 8. Classement des températures pour *F. solani*

Température	% de retard de la croissance de coléoptile moyen	1	2
20°C	70,47619	****	
25°C	71,19048	****	
30°C	71,78571	****	
15°C	85,83333		****

Tableau 9. Classement des températures pour *F. verticillioides*

Température	% de retard de la croissance de coléoptile moyen	1	2
25°C	87,38095	****	
30°C	90,00000	****	
20°C	90,23810	****	
15°C	96,19048		****

Tableau 10. Classement des températures pour *F. torulosum*

Température	% de retard de la croissance de coléoptile moyen	1	2
25°C	71,19048	****	
30°C	76,42857	****	
15°C	88,80952		****
20°C	89,28571		****

Tableau 11. Classement des températures pour *F. poae*

Température	% de retard de la croissance de coléoptile moyen	1	2	3
30°C	85,7143	****		
25°C	88,0952	****	****	
15°C	96,9048		****	****
20°C	100,0000			****

Tableau 12. Classement des températures pour *M. nivale*

Température	% de retard de la croissance de coléoptile moyen	1	2
30°C	74,28571	****	
25°C	74,76190	****	
20°C	85,71429	****	****
15°C	90,71429		****

Annexe 4 : analyses statistiques pour l'effet des isolats sur l'expression de la maladie sur collet

Effet	SC	DDL	MC	F	P
Ord. Origine	11517,55	1	11517,55	49,03678	0,000000
Espèce	20040,35	7	2862,91	12,18903	0,000000
Erreur	17145,93	73	234,88		

Tableau 1. Analyse de la variance des espèces pour l'indice d'attaque sur collet

Espèce	Indice moyen	1	2	3
Témoin	0,000000	****		
<i>F. verticilloides</i>	0,200000	****		
<i>F. poae</i>	0,200000	****		
<i>F. solani</i>	0,250000	****		
<i>F. torulosum</i>	0,366667	****		
<i>M. nivale</i>	0,600000	****		
<i>F. culmorum</i>	1,150980		****	
<i>F. graminearum</i>	1,744444			****

Tableau 2. Classement des espèces selon le test LSD de Fisher au seuil de 5%

Effet	SC	DDL	MC	F	P
Ord. Origine	79,01235	1	79,01235	1194,030	0,00
Isolat	29,89432	26	1,14978	17,375	0,00
Erreur	3,57333	54	0,06617		

Tableau 3. Analyse de la variance des isolats pour le test d'inoculation sur collet

Isolat	Indice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Témoin	0,000000	***											
FS.02.11	0,166667	***											
FV.01.1	0,200000	***	***										
FP.01.11	0,200000	***	***										
FS.01.11	0,333333	***	***	***									
FT.01.1	0,366667	***	***	***	***								
FC.01.1	0,600000		***	***	***	***							
MN.01.1	0,600000		***	***	***	***							
FC.02.1	0,666667			***	***	***	***						
FC.03.1	0,766667				***	***	***	***					
FC.08.1	0,900000					***	***	***	***				
FG.03.1	0,900000					***	***	***	***				
FC.05.1	1,000000					***	***	***	***	***			
FC.12.1	1,000000					***	***	***	***	***			
FC.09.1	1,066667						***	***	***	***			
FC.14.1	1,066667						***	***	***	***			
FC.15.1	1,133333							***	***	***	***		
FC.07.1	1,166667							***	***	***	***		
FC.04.1	1,200000								***	***	***		
FC.11.1	1,200000								***	***	***		
FC.13.1	1,233333								***	***	***		
FC.16.1	1,266667								***	***	***		
FC.17.1	1,366667									***	***		
FC.06.1	1,500000										***	***	
FG.02.1	1,833333											***	
FC.10.1	2,433333												***
FG.01.1	2,500000												***

Tableau 4. Classement des isolats pour le test sur collet selon le test LSD de au seuil de 5%.

Tableau 5. Analyse de la variance de l'indice d'attaque sur collet pour *F. culmorum*

Effet	SC	DDL	MC	F	P
O. Origine	67,56255	1	67,56255	888,0644	0,000000
Isolat	7,94078	16	0,49630	6,5235	0,000002
Erreur	2,58667	34	0,07608		

Tableau 6. Analyse de la variance de l'indice d'attaque sur collet pour *F. graminearum*

Effet	SC	DDL	MC	F	P
O. Origine	27,38778	1	27,38778	254,1134	0,000004
Isolat	3,87556	2	1,93778	17,9794	0,002924
Erreur	0,64667	6	0,10778		

Tableau 7. Analyse de la variance de l'indice d'attaque sur collet pour *F. solani*

Effet	SC	DDL	MC	F	P
O. Origine	0,375000	1	0,375000	8,653846	0,042316
Isolat	0,041667	1	0,041667	0,961538	0,382319
Erreur	0,173333	4	0,043333		

Annexe 5 : analyses statistiques pour l'effet des isolats sur l'expression de la maladie sur épi

Tableau 1. Analyse de la variance des espèces pour le test d'inoculation sur épi

Effet	SC	DDL	MC	F	P
O. Origine	32,2808	1	32,28075	15,37243	0,000210
Isolat	145,0459	7	20,72084	9,86748	0,000000
Erreur	140,6941	67	2,09991		

Tableau 2. Classement des espèces pour l'indice d'attaque sur épi selon le test LSD de Fisher au seuil de 5%

Espèces	Indice moyen	1	2
Témoin	0,000000	****	
<i>F. verticillioides</i>	0,266667	****	
<i>F. poae</i>	0,333333	****	
<i>M. nivale</i>	0,600000	****	
<i>F. graminearum</i>	0,700000	****	
<i>F. solani</i>	0,816667	****	
<i>F. torulosum</i>	1,800000	****	****
<i>F. culmorum</i>	3,451111		****

Tableau 3. Analyse de la variance des isolats pour l'indice d'attaque sur épi

Effet	SC	DDL	MC	F	P
O. Origine	410,6700	1	410,6700	3662,337	0,00
Isolat	280,1333	24	11,6722	104,092	0,00
Erreur	5,6067	50	0,1121		

Isolat	Indice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Témoin	0,000000	****										
FG.03.11	0,233333	****	****									
FV.01.11	0,266667	****	****									
FP.01.11	0,333333	****	****									
FG.02.11	0,366667	****	****	****								
MN.01.11	0,600000		****	****								
FC.04.11	0,633333		****	****								
FS.01.11	0,733333		****	****	****							
FS.02.11	0,900000			****	****							
FC.03.11	1,266667				****	****						
FG.01.11	1,500000					****	****					
FT.01.11	1,800000					****	****					
FC.06.11	1,900000						****					
FC.01.11	2,566667							****				
FC.09.11	2,733333							****	****			
FC.10.11	2,733333							****	****			
FC.02.11	2,866667							****	****			
FC.05.11	2,866667							****	****			
FC.16.11	3,200000								****			
FC.14.11	3,266667								****	****		
FC.15.11	3,800000									****		
FC.11.11	5,533333										****	
FC.12.11	5,833333										****	
FC.17.11	6,000000										****	
FC.13.11	6,566667											****

Tableau 4. Classement des isolats selon le test LSD au seuil de 5%.

Tableau 5. Analyse de la variance de l'indice d'attaque sur épi pour *F. culmorum*

Effet	SC	DDL	MC	F	P
O. Origine	66167,60	1	66167,60	3710,475	0,00
Isolat	16313,47	14	1165,25	65,344	0,00
Erreur	534,98	30	17,83		

Tableau 6. Analyse de la variance de l'indice d'attaque sur épi pour *F. graminearum*

Effet	SC	DDL	MC	F	P
O. Origine	544,4444	1	544,4444	33,35294	0,001177
Isolat	358,8477	2	179,4239	10,99160	0,009857
Erreur	97,9424	6	16,3237		

Tableau 7. Analyse de la variance de l'indice d'attaque sur épi pour *F. solani*

Effet	SC	DDL	MC	F	P
O. Origine	494,0329	1	494,0329	126,3684	0,000357
Isolat	5,1440	1	5,1440	1,3158	0,315296
Erreur	15,6379	4	3,9095		

Annexe 6 : Analyses statistiques pour le poids de mille grains (PMG)

Tableau 1. Analyse de la variance des espèces pour le PMG

Effet	SC	DDL	MC	F	P
O. Origine	15759,46	1	15759,46	309,0462	0,000000
Isolat	8242,24	7	1177,46	23,0903	0,000000
Erreur	3416,59	67	50,99		

Tableau 2. Classement des espèces pour le pourcentage de réduction du PMG selon le test LSD de Fisher au seuil de 5%.

Espèces	Indice moyen	1	2	3	4
Témoin	0,000000				****
<i>F. graminearum</i>	12,25556		****		
<i>F. poae</i>	21,66667	****	****		
<i>F. verticillioides</i>	23,66667	****			
<i>F. solani</i>	24,81667	****			
<i>F. torulosum</i>	26,66667	****			
<i>M. nivale</i>	30,00000	****		****	
<i>F. culmorum</i>	36,97778			****	

Tableau 3. Analyse de la variance des isolats pour le PMG

Effet	SC	DDL	MC	F	P
O. Origine	66257,77	1	66257,77	5235,175	0,00
Isolat	11026,02	24	459,42	36,300	0,00
Erreur	632,81	50	12,66		

Isolat	% moyen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Témoin	0,00000	****											
FG.02.11	5,66667	****	****										
FG.01.11	11,16667		****										
FS.02.11	17,80000			****									
FG.03.11	19,93333			****	****								
FP.01.11	21,66667			****	****	****							
FC.05.11	21,66667			****	****	****							
FV.01.11	23,66667				****	****	****						
FT.01.11	26,66667					****	****	****					
FC.04.11	27,33333					****	****	****					
FC.01.11	28,93333						****	****					
FC.14.11	29,86667							****					
MN.01.11	30,00000							****	****				
FS.01.11	31,83333							****	****	****			
FC.16.11	35,80000								****	****	****		
FC.02.11	35,80000								****	****	****		
FC.11.11	37,16667									****	****	****	
FC.09.11	38,66667										****	****	
FC.06.11	38,83333										****	****	
FC.13.11	40,33333										****	****	****
FC.15.11	41,50000										****	****	****
FC.10.11	43,00000											****	****
FC.12.11	44,83333												****
FC.17.11	45,10000												****
FC.03.11	45,83333												****

Tableau 4. Classement des isolats pour le pourcentage de réduction de PMG selon le test LSD de Fisher au seuil de 5%.

Annexe 7 : Corrélations entre la croissance mycélienne des isolats et leur effet sur la croissance du coléoptile *in vitro*, dans différentes températures (15, 20, 25 et 30°C).

Tableau 1. Corrélation entre la croissance mycélienne des 17 isolats appartenant à l'espèce *F. culmorum* et leur effet sur la croissance du coléoptile *in vitro*, dans différentes températures (15, 20, 25 et 30°C).

Variables	Croissance mycélienne	% de retard de la croissance de coléoptile
Croissance mycélienne	1,00	-0,09
% de retard de la croissance de coléoptile	-0,09	1,00

Tableau 2. Corrélation entre la croissance mycélienne des isolats appartenant à l'espèce *F. graminearum* et leur effet sur la croissance du coléoptile *in vitro*, dans différentes températures (15, 20, 25 et 30°C).

Variables	Croissance mycélienne	% de retard de la croissance de coléoptile
Croissance mycélienne	1,00	0,35
% de retard de la croissance de coléoptile	0,35	1,00

Tableau 3. Corrélation entre la croissance mycélienne des isolats appartenant à l'espèce *F. solani* et leur effet sur la croissance de coléoptile *in vitro*, dans différentes températures (15, 20, 25 et 30°C).

Variables	Croissance mycélienne	% de retard de la croissance de coléoptile
Croissance mycélienne	1,00	-0,08
% de retard de la croissance de coléoptile	-0,08	1,00

Tableau 4. Corrélation entre la croissance mycélienne de l'isolat appartenant à l'espèce *F. verticillioides* et son effet sur la croissance du coléoptile *in vitro*, dans différentes températures (15, 20, 25 et 30°C).

Variables	Croissance mycélienne	% de retard de la croissance de coléoptile
Croissance mycélienne	1,00	-0,67
% de retard de la croissance de coléoptile	-0,67	1,00

Tableau 5. Corrélation entre la croissance mycélienne de l'isolats appartenant à l'espèce *F. torulosum* et son effet sur la croissance du coléoptile *in vitro*, dans différentes températures (15, 20, 25 et 30°C).

Variables	Croissance mycélienne	% de retard de la croissance de coléoptile
Croissance mycélienne	1,00	-0,59
% de retard de la croissance de coléoptile	-0,59	1,00

Variables	Croissance mycélienne	% de retard de la croissance de coléoptile
Croissance mycélienne	1,00	0,27
% de retard de la croissance de coléoptile	0,27	1,00

Tableau 6. Corrélation entre la croissance mycélienne de l'isolat appartenant à l'espèce *F. poae* et son effet sur la croissance du coléoptile *in vitro*, dans différentes températures (15, 20, 25 et 30°C).

Tableau 7. Corrélation entre la croissance mycélienne de l'isolats appartenant à l'espèce *M. nivale* et son effet sur la croissance du coléoptile *in vitro*, dans différentes températures (15, 20, 25 et 30°C).

Variables	Croissance mycélienne	% de retard de la croissance de coléoptile
Croissance mycélienne	1,00	0,42
% de retard de la croissance de coléoptile	0,42	1,00

Annexe 8 : Corrélations entre le pourcentage de retard de la croissance de coléoptile *in vitro*, l'indice de maladie sur collet et l'indice de maladie sur les épis

Tableau 1. Corrélation entre le pourcentage de retard de la croissance du coléoptile *in vitro*, l'indice de maladie sur collet et l'indice de maladie sur les épis pour les isolats appartenant à l'espèce *F. culmorum* :

Variables	% de retard de la croissance de coléoptile	Indice de maladie sur collet	Indice de maladie sur épi
% de retard de la croissance de coléoptile	1,00	0,11	-0,41
Indice de maladie sur collet	0,11	1,00	0,05
Indice de maladie sur épi	-0,41	0,05	1,00

Variables	% de retard de la croissance de coléoptile	Indice de maladie sur collet	Indice de maladie sur épi
% de retard de la croissance de coléoptile	1,00	- 0,09	0,37
Indice de maladie sur collet	-0,09	1,00	0,65
Indice de maladie sur épi	0,37	0,65	1,00

Tableau 2. Corrélation entre le pourcentage de retard de la croissance du coléoptile *in vitro*, l'indice de maladie sur collet et l'indice de maladie sur les épis pour les isolats appartenant à l'espèce *F. graminearum* :

Tableau 3. Corrélation entre le pourcentage de retard de la croissance de coléoptile in vitro, l'indice de maladie sur collet et l'indice de maladie sur les épis pour les isolats appartenant à l'espèce *F. solani* :

Variables	% de retard de la croissance de coléoptile	Indice de maladie sur collet	Indice de maladie sur épi
% de retard de la croissance de coléoptile	1,00	-0,31	0,72
Indice de maladie sur collet	-0,31	1,00	-0,24
Indice de maladie sur épi	0,72	-0,24	1,00

Annexe 9: Corrélation entre l'agressivité sur l'épi et le pourcentage de réduction du poids de mille graines par rapport au témoin non inoculé

Tableau 1. Corrélation entre l'agressivité des isolats sur l'épi et le pourcentage de réduction du poids de mille graines par rapport au témoin non inoculé

Variables	Pourcentage de l'indice de maladie	% de réduction de poids de mille graines
Pourcentage de l'indice de maladie	1,00	0,62
% de réduction de poids de mille graines	0,62	1,00

Tableau 2. Corrélation entre l'agressivité des isolats sur l'épi et le pourcentage de réduction du poids de mille graines par rapport au témoin non inoculé pour les isolats appartenant à l'espèce *F. culmorum*.

Variables	Pourcentage de l'indice de maladie	% de réduction de poids de mille graines
Pourcentage de l'indice de maladie	1,00	0,34
% de réduction de poids de mille graines	0,34	1,00

Annexe 10: analyses statistiques pour la confrontation directe.

Tableau 1. Analyse de la variance de diamètre moyen des colonies du *Fusarium* spp. et de *M. nivale*, cas de la confrontation directe.

Complexe fongique pourriture racinaire et fusariose de l'épi

Effet	SC	DDL	MC	F	P
O. Origine	375457,1	1	375457,1	5074,527	0,000000
<i>Trichoderma</i>	395,9	1	395,9	5,351	0,028268
<i>Fusarium</i>	1321,2	6	220,2	2,976	0,022399
<i>Trichoderma*Fusarium</i>	298,4	6	49,7	0,672	0,672883
Erreur	2071,17	28	74,0		

Tableau 2. Classement des groupes de *Fusarium* selon le test LSD au seuil de 5%.

Isolat	% de retard moyen	1	2
FP.01.11	82,2917		****
FT.01.11	93,0303	****	
FG.01.11	93,6613	****	
FS.02.11	95,9948	****	
FC.13.11	96,8627	****	
MN.01.11	100,0000	****	
FV.01.11	100,0000	****	

Tableau 3. Classement des groupes de *Trichoderma* selon le test LSD au seuil de 5%.

Trichoderma	% de retard moyen	1	2
Tn3	91,47834	****	
Ta13	97,61905		****

Tableau 4. Classement des groupes de *Trichoderma*Fusarium* selon le test LSD au seuil de 5%.

Trichoderma	Fusarium	% de retard moyen	1	2
Tn3	FP.01.11	81,2500	****	
Ta13	FP.01.11	83,3333	****	
Tn3	FT.01.11	86,0606	****	****
Tn3	FG.01.11	87,3226	****	****
Tn3	FS.02.11	91,9897	****	****
Tn3	FC.13.11	93,7255	****	****
Ta13	FC.13.11	100,0000		****
Ta13	FV.01.11	100,0000		****
Ta13	FS.02.11	100,0000		****
Tn3	FV.01.11	100,0000		****
Ta13	FG.01.11	100,0000		****
Ta13	MN.01.11	100,0000		****
Ta13	FT.01.11	100,0000		****
Tn3	MN.01.11	100,0000		****

Annexe 11: analyses statistiques de la confrontation à distance

Tableau 1. Analyse de la variance de diamètre moyen des colonies du *Fusarium* spp. et de *M. nivale*, cas de la confrontation à distance.

Effet	SC	DDL	MC	F	P
O. origine	38537,93	1	38537,93	490,1550	0,000000
<i>Trichoderma</i>	221,20	1	221,20	2,8134	0,104609
<i>Fusarium</i>	9893,31	6	1648,88	20,9718	0,000000
<i>Trichoderma</i> * <i>Fusarium</i>	1665,49	6	277,58	3,5305	0,009958
Erreur	2201,47	28	78,62		

Tableau 2. Classement des groupes de *Fusarium* selon le test LSD au seuil de 5%.

Fusarium	%ge d'inhibition moyen	1	2	3	4	5
FT.01.11	6,52778					****
FS.02.11	18,48485	****				
FV.01.11	19,73214	****				
FG.01.11	32,88982		****			
FC.13.11	35,00000		****	****		
FP.01.11	44,66450			****	****	
MN.01.11	54,74081				****	

Tableau 3. Classement des groupes de *Trichoderma* selon le test LSD au seuil de 5%.

Trichoderma	% d'inhibition moyen	1
Ta13	27,99648	****
Tn3	32,58635	****

Tableau 4. Classement des groupes de *Trichoderma***Fusarium* selon le test LSD au seuil de 5%

Trichoderma	Fusarium	% moyen	1	2	3	4	5	6	7
Tn3	FT.01.11	0,00000	****						
Ta13	FT.01.11	13,05556	****	****					
Tn3	FV.01.11	15,00000		****	****				
Ta13	FS.02.11	15,75758		****	****				
Tn3	FS.02.11	21,21212		****	****				
Ta13	FV.01.11	24,46429		****	****	****			
Ta13	FG.01.11	26,82073		****	****	****	****		
Ta13	FC.13.11	29,58333			****	****	****		
Tn3	FG.01.11	38,95892				****	****	****	
Tn3	FC.13.11	40,41667					****	****	
Ta13	MN.01.11	41,48148					****	****	
Tn3	FP.01.11	44,51659						****	
Ta13	FP.01.11	44,81241						****	
Tn3	MN.01.11	68,00014							****