



République Algérienne Démocratique et Populaire



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université Amar Telidji- Laghouat

FACULTÉ DES SCIENCES

DÉPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : **METTACHE Cheima**

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

FILIERE : SCIENCES AGRONOMIQUES

OPTION : PROTECTION DES VEGETAUX

Thème

**Recherche des maladies fongiques dans le maïs
grains**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	qualité
Benchettouh Ahmed	MCA	Président
Allali Khadidja	MCA	Examineur
Touati-Hattab Sihem	MCB	Encadreur
Mimouni Afaf	Doctorante	Co- encadreur

Année universitaire 2024/2025

Remerciements

Je remercie en premier lieu Allah Tout-Puissant de m'avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrante, Madame Touati Sihem, enseignante à l'Université de Laghouat, pour son encadrement scientifique rigoureux, ses conseils précieux et sa disponibilité constante. Son expertise et sa bienveillance ont été essentielles à la réalisation de ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent également aux honorables membres du jury :

- Mr. Benchettouh Ahmed, Enseignant à l'Université de Laghouat
- Mme . Allali khadidja Enseignante à l'Université de Laghouat

pour avoir accepté de juger ce travail, pour le temps précieux qu'ils y consacreront et pour l'enrichissement qu'apporteront leurs remarques constructives.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance particulière à Madame Mimouni Afaf, doctorante à l'Université de Laghouat, pour son aide précieuse et son soutien au laboratoire, qui ont grandement facilité mes recherches expérimentales.

Un merci sincère à Mlle. Hizia Berrah, également doctorante à l'Université de Laghouat, pour son assistance et ses conseils avisés lors de la phase de rédaction de ce mémoire.

Enfin, je ne saurais oublier de remercier ma chère famille, en particulier mes parents, pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements incessants et leur amour. À mes frères et sœurs, ainsi qu'à mes amis proches, pour leur présence, leur patience et leur soutien moral tout au long de ce parcours universitaire.

Merci à tous.

Dédicace

Avec tout mon amour et ma plus profonde gratitude, je dédie ce travail :

À mes très chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs innombrables sacrifices et leur soutien indéfectible. Votre foi en moi a été ma plus grande source de motivation et sans vous, rien de tout cela n'aurait été possible.

À mes chers frères, Karim, Farouk et Mohamed Sedik, pour leur présence constante, leur compréhension et les encouragements qu'ils m'ont toujours apportés.

À toute ma famille et mes amis qui me portent dans leur cœur, pour leur affection et leur soutien précieux tout au long de cette aventure.

Résumé

Le maïs (*Zea mays L.*) est une céréale majeure cultivée dans le monde entier, occupant une place essentielle dans l'alimentation humaine, animale et dans l'industrie agroalimentaire. En Algérie, sa culture se développe de plus en plus, en particulier dans les régions du sud comme Ghardaïa et Laghouat. Toutefois, ce produit est fréquemment exposé à des agents pathogènes, notamment des champignons, responsables de dégradations importantes, surtout en phase de stockage.

Dans cette optique, notre travail vise à étudier la contamination fongique des grains de maïs issus de six échantillons provenant de différentes variétés locales récoltées dans les deux wilayas précitées. Les grains ont été soumis à une observation macroscopique, puis des prélèvements ont été effectués par grattage des zones suspectes. Les spores ont ensuite été observées au microscope, et les champignons ont été isolés sur milieu PDA pour une identification morphologique.

Les résultats ont révélé une diversité fongique significative, avec une dominance du genre *Fusarium* (49,98%), suivi de *Curvularia spicifera* (20,58%), *Alternaria sp.* (13,72%), *Penicillium sp.* (5,88%), *Aspergillus niger* et *Cladosporium sp.* (4,90% chacun). Afin d'évaluer l'effet de ces champignons sur la plante hôte, un test de pathogénicité a été réalisé en inoculant dix isolats sur des jeunes plants de maïs cultivés en pots. Plusieurs isolats, notamment ceux appartenant au genre *Fusarium*, ont induit des symptômes typiques d'infection fongique, tels que le flétrissement, les lésions foliaires et la nécrose racinaire.

Ces résultats mettent en évidence l'importance d'un contrôle rigoureux de la qualité sanitaire des grains de maïs, particulièrement en période post-récolte. Il est ainsi recommandé de renforcer les pratiques de stockage, d'effectuer des suivis réguliers, et de promouvoir l'utilisation de semences saines et résistantes.

Mots-clés : Maïs, contamination fongique, pathogénicité, identification morphologique.

Abstract

Maize (*Zea mays* L.) is one of the most widely cultivated cereals worldwide, playing a critical role in food security, animal feed, and agro-industrial production. In Algeria, maize cultivation is gradually increasing, particularly in southern regions such as Ghardaïa and Laghouat. However, maize grains are susceptible to fungal infections, especially during storage, which can significantly reduce their quality and economic value.

The present study aims to investigate fungal contamination in maize grains and evaluate the pathogenic potential of the isolated fungi. Six representative samples were collected from different local maize varieties. The grains underwent macroscopic examination followed by scraping of visibly infected areas. Fungal spores were observed under a microscope, and isolates were cultured on Potato Dextrose Agar (PDA) medium for morphological identification.

The results indicated a considerable fungal diversity, with *Fusarium* being the most prevalent genus (49.98%), followed by *Curvularia spicifera* (20.58%), *Alternaria sp.* (13.72%), *Penicillium sp.* (5.88%), *Aspergillus niger* and *Cladosporium sp.* (4.90% each). A pathogenicity test was carried out using ten fungal isolates inoculated onto maize seedlings grown in pots. Several isolates, particularly those of *Fusarium*, induced noticeable symptoms such as leaf spots, plant wilting, and root necrosis.

These findings underscore the need for strict phytosanitary monitoring of stored maize grains and support the implementation of preventive strategies such as improved storage practices, regular inspection, and the use of resistant cultivars.

Keywords: Maize, fungal contamination, pathogenicity, morphological identification.

الملخص

تعدّ الذرة (*Zea mays L*) من أهم المحاصيل الزراعية ذات الأهمية الاقتصادية والغذائية الكبيرة في العالم. غير أن هذا المحصول يُصاب بعدة أمراض فطرية تؤثر سلبيًا على نموه وجودة حبوبه، خاصة أثناء وبعد الحصاد، مما يؤدي إلى خسائر معتبرة في الإنتاج. تهدف هذه الدراسة إلى تحديد الفطريات المرتبطة بالذرة، مع التركيز على جنس *Fusarium*، بالإضافة إلى تقييم قدرتها المرضية على النبات.

تم جمع عينات من الحبوب والأوراق من عدة مناطق بولايته الأوغاوط وغرداية، ثم تم عزل وتنقية الفطريات على وسط PDA، مع التعرف عليها اعتمادًا على الخصائص المورفولوجية والمجهريّة. كشفت النتائج عن تنوع فطري معتبر، تمثل أساسًا في الأنواع التالية: *Fusarium spp.*, *Curvularia spicifera*, *Alternaria sp.*, *Aspergillus niger*,

Cladosporium sp. و *Penicillium sp.*

تم بعد ذلك قياس سرعة النمو للعزلات، وتقييم قدرتها المرضية من خلال اختبار Pathogénicité داخل البيت البلاستيكي على نباتات الذرة. أظهرت جميع العزلات قدرة مرضية بدرجات متفاوتة، حيث تميزت بعض العزلات كـ *Curvularia spicifera* بتأثير واضح على النباتات، في حين أظهرت عزلات أخرى من *Fusarium* تأثيرًا أقل وضوحًا. كما تم قياس مؤشر الشدة (PIS) وإجراء تحليل ANOVA لتحديد الفروقات المعنوية بين العزلات.

تُبرز نتائج هذه الدراسة أهمية المتابعة الدقيقة للفطريات المرافقة للذرة، خاصة تلك ذات القدرة المرضية، من أجل تحسين برامج الوقاية والمكافحة في سلاسل الإنتاج والتخزين.

الكلمات المفتاحية: الذرة، الفطريات، *Fusarium*, *Curvularia* اختبار المرضية، العزل الفطري، الأمراض النباتية.

Tableaux des matières

Remerciements	
Dédicace	
Résumé	
Tableaux des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction	01
Chapitre I: Revue Bibliographique	
I.LE MAÏS	04
I.1. Généralités	04
I.2 Définition botanique et Taxonomie	06
I.3 Développement du maïs	07
I.4. Situation de la culture du maïs	09
I.4.1. Dans le monde	09
I.4.2 En Algérie	11
I.5 Les principales contraintes de la culture du maïs	12
I.5.1 Les maladies fongiques transmissibles par semences	13
1. L'Anthracnose	13
2. Pourriture des épis	14
3. Brûlure des feuilles du maïs	15
4. Charbon commun	17
5. Tache foliaire de Curvularia	19
6. Le genre <i>Fusarium</i>	23
I.6 Moyens de prévention et de lutte contre les champignons et les mycotoxines dans le maïs.	30
I.6.1 Stratégies en amont : La génétique et la bio-ingénierie	31
I.6.2 Gestion de l'environnement au champ : Précision et innovation	31
I.6.3 Gestion post-récolte : Au-delà du simple stockage	32
I.6.4. Innovation et recherche continue	33
Chapitre II : Matériel & Méthodes	
1. Matériel et Méthodes	36
1.1. Matériel végétal	36
1.2. Matériel fongique	36

Tableaux des matières

2. Méthodes Isolement de la mycoflore associée aux feuilles et grains de maïs	37
2.1 Purification par culture monospore	38
2.2 Identification morphologique des isolats de <i>Fusarium</i> obtenus	38
2.3 Fréquence des genres fongiques	39
2.4 Mesure de la croissance mycélienne des isolats obtenus sur PDA à 22 °C	39
3. Etude de la pathogénicité des isolats de <i>Fusarium sp</i> et <i>curvularia sp</i>	40
3.1 Préparation du sol	40
3.2 Dispositif expérimental	40
3.3 Évaluation de l'agressivité des isolats de <i>Fusarium spp.</i> et <i>curvularia spp.</i> sur la partie aérienne des plants de maïs	41
3.4 Évaluation de l'agressivité des isolats de <i>Fusarium spp.</i> et <i>curvularia spp.</i> sur la partie basale des plants de blé .	42
4. Analyses statistiques	44
Chapitre III : Résultats et Discussion	
1. RESULTATS	46
1.1 Analyse de la mycoflore associée aux maïs	46
1.1.1 Taux de contamination des grains de maïs et Fréquence de la flore fongique	46
1.1.2 Description morphologique des espèces obtenues des isolements	48
1.1.3 Mesure de la croissance	63
1.2 Évaluation de la pathogénicité des isolats fongiques	65
Conclusion	76
Références Bibliographiques	79

Liste des tableaux

Numéro	Titre	Page
Tableau 01	Différents stades du grain de maïs	09
Tableau 02	Maladies et agents pathogènes fongiques du maïs en fonction des sites d'infection (Samsudin, 2015 ; Brown et <i>al.</i> , 2017).	12
Tableau 03	liste des échantillons de grains et plants de maïs utilisés	36
Tableau 04	Liste des 10 isolats de <i>Fusarium</i> spp. utilisés dans le test de pathogénicité	37
Tableau 05	Echelle de notation pour l'évaluation de la résistance aux maladies (Michel, 2001)	42
Tableau 06	Taux de contamination des grains de maïs par les différentes espèces fongiques isolées.	47
Tableau 07	Évolution du diamètre moyen (mm) des colonies fongiques durant 10 jours d'incubation à 22°C	63
Tableau 08	Identification des 10 isolats de <i>Fusarium</i> spp. isolés en 2025 et utilisés dans le test de pathogénicité.	65
Tableau 09	TPIS moyen (%) des isolats et leur regroupement statistique (Tukey, $\alpha = 0,05$).	68

Liste des figures

Numéro	Titre	Page
Figure 01	Histoire de la culture du maïs	05
Figure 02	Structure de la plante du maïs avec les inflorescences mâles et femelles	06
Figure 03	Structure du grain de maïs (Sáenz Rodríguez et Cassab, 2021).	07
Figure 04	les différents stades de développement du grain de maïs (Nielsen, 2001)	08
Figure 05	Principaux producteurs de maïs au monde en 2018-2019 (données en milliers de tonnes)	10
Figure 06	Évolution de la production et des importations de maïs en Algérie de 2021 à 2023	11
Figure 07	Symptômes d'antracnose observés sur les tiges de maïs	14
Figure 08	Symptômes de pourriture des épis de maïs causés par <i>Aspergillus sp</i>	16
Figure 09	Symptômes de brûlure foliaire causés par <i>Bipolaris maydis</i> sur le maïs	18
Figure 10	Symptômes du charbon commun du maïs causés par <i>Ustilago maydis</i>	20
Figure 11	Symptômes de taches foliaires causées par <i>Curvularia lunata</i> sur le maïs	22
Figure 12	Les symptômes de la pourriture de la tige causée par <i>Fusarium</i> , à gauche, Pourriture de la gaine du maïs à droite Pourriture des tissus internes de la tige provoquant une décoloration rose et dessèchement des tissus de la tige et l'épi.	26
Figure 13	Cycle de vie généralisé de <i>Fusarium spp.</i> , montrant les phases sexué et asexué, adapté de Buerstmayr et <i>al.</i> (2020) et Ma et <i>al.</i> (2013).	28
Figure 14	La préparation de la couche d'inoculum.	43
Figure 15	Taux de contamination des grains de maïs par genre fongique.	46
Figure 16	Aspect cultural des espèces fongiques isolées à partir des échantillons de maïs , après 7-10 jours d' incubation à l' obscurité sur milieu PDA à 22 °C	54
Figure 17	Aspect cultural des espèces fongiques isolées à partir des échantillons de maïs , après 7-10 jours d' incubation à l' obscurité sur milieu PDA à 22 °C	55
Figure 18	Aspect microscopique de l'espèce de <i>Fusarium verticillioides</i>	56
Figure 19	Aspect microscopique de l'espèce de <i>Fusarium proliferatum</i>	56
Figure 20	Aspect microscopique de l'espèce de <i>Alternaria sp. et Cladosporium</i>	57

Liste des figures

Figure 21	Aspect microscopique de l'espèce de <i>Fusarium sporotrichioides</i> et <i>F.hostae</i> .	58
Figure 22	Aspect microscopique de l'espèce de <i>F. subglutinans</i>	59
Figure 23	Aspect microscopique de l'espèce de <i>Aspergillus sp</i>	60
Figure 24	Aspect microscopique de l'espèce de <i>Curvularia spicifera</i>	61
Figure 25	Aspect microscopique de l'espèce de <i>Fusarium poae</i>	62
Figure 26	Courbe de croissance mycélienne des différents isolats fongiques sur 10 jours.	64
Figure 27	Les différents degrés d'agressivité de <i>Fusarium spp.</i> et <i>Culvularia specifira</i> observés sur les racines du maïs après 15 jours d'inoculation par couche d'inoculum.	66
Figure 28	Indice de sévérité (PIS) des isolats fongiques testés sur le maïs.	67
Figure 29	Longueur moyenne des feuilles et des racines (\pm écart-type) chez les plants de maïs inoculés avec différents isolats fongiques	69
Figure 30	Symptômes causés par <i>Curvularia spicifera</i> sur les plants de maïs.	71

Introduction

Introduction

Introduction

Le maïs (*Zea mays L.*), culture emblématique de l'agriculture moderne, se positionne comme l'une des céréales les plus cultivées et consommées à l'échelle planétaire (FAO, 2023). Son rôle est multidimensionnel, servant de base alimentaire essentielle pour une large part de la population mondiale et constituant une source primordiale d'aliments pour le bétail [Pingali, 2001]. Au-delà de ces usages fondamentaux, le maïs contribue significativement à l'industrie, notamment dans la production de biocarburants, d'amidon, de sirop de glucose, et de divers produits dérivés (National Research Council, 2010). Cette importance stratégique confère à sa production une valeur économique et sociale inestimable, justifiant ainsi l'intérêt accru pour l'optimisation de son rendement et la préservation de sa qualité.

Cependant, la culture du maïs est constamment menacée par un éventail de facteurs biotiques et abiotiques, parmi lesquels les maladies fongiques se distinguent par leur impact dévastateur (Agrios, 2005). Ces maladies, causées par des champignons phytopathogènes, sont responsables de pertes de rendement considérables, qui peuvent atteindre jusqu'à 100% dans les cas d'infestations sévères et non maîtrisées (Strange & Scott, 2005). L'étendue des dégâts ne se limite pas à la quantité produite ; la qualité des grains est également gravement compromise. En effet, plusieurs espèces fongiques sont capables de synthétiser des mycotoxines, des métabolites secondaires toxiques qui représentent un risque majeur pour la santé humaine et animale lors de la consommation de maïs contaminé (Bennett & Klich, 2003). Ces toxines peuvent entraîner des problèmes de santé variés, allant de troubles gastro-intestinaux à des effets immunosuppresseurs, cancérogènes ou tératogènes, et sont soumises à des réglementations strictes sur le plan commercial international (Council for Agricultural Science and Technology, 2003).

Face à cette problématique complexe et persistante, la recherche et l'identification précises des agents pathogènes fongiques sont des étapes cruciales pour l'élaboration de stratégies de lutte efficaces et durables (Lucas et al., 1992). Le diagnostic des maladies fongiques du maïs est souvent un défi en raison de la similitude des symptômes causés par différents pathogènes, de la variabilité génétique des champignons, et de leur capacité

Introduction

d'adaptation aux conditions environnementales et aux pratiques culturelles (White, 1999). Une connaissance approfondie des espèces fongiques prévalentes dans les zones de culture est donc indispensable pour cibler les interventions phytosanitaires et minimiser l'utilisation de pesticides, favorisant ainsi une agriculture plus respectueuse de l'environnement et de la santé (IPM, 2022).

Dans ce contexte, la présente étude s'assigne pour objectif principal la recherche et la caractérisation des maladies fongiques affectant le maïs grain. Ce travail exploratoire vise à identifier les principales espèces fongiques associées aux symptômes observés sur le maïs. À travers une méthodologie rigoureuse, incluant la collecte d'échantillons, l'isolement et la culture des champignons phytopathogènes en laboratoire, ainsi que l'identification morphologique des isolats. Les retombées attendues de cette recherche devraient non seulement enrichir les bases de données scientifiques sur la pathologie du maïs, mais également fournir des informations pratiques et des recommandations stratégiques aux agriculteurs et aux décideurs pour une meilleure gestion phytosanitaire, contribuant ainsi à la sécurisation de la production maïsicole et au développement d'une agriculture durable (Smith & Jones, 2021).

La présente étude comprend les parties suivantes :

- Analyse de la mycoflore totale associée aux grains et aux feuilles de maïs.
- Caractérisation culturale et morphologique des isolats obtenus.
- Étude de la pathogénicité de quelques isolats de *Fusarium* spp. et *curvularia specifira* par deux méthodes d'inoculation : inoculation de la partie aérienne et des racines.

Chapitre I

Revue Bibliographique

I. LE MAÏS

I.1. Généralités

Le maïs (*Zea mays* subsp. *mays*, couramment appelé **blé d'Inde** au Canada, largement cultivée comme céréale pour ses grains riches en amidon, mais aussi comme plante fourragère.

L'histoire du maïs commence il y a 9.000 ans, dans une haute vallée du Mexique, où s'écoule le fleuve Rio Balsas. Une plante locale, la téosinte, est cultivée sur les flancs de cette vallée par les premières civilisations amérindiennes, à 1.500 m d'altitude (Gay, 1999). L'évolution de la téosinte, l'ancêtre du maïs, s'est faite à la fois de manière naturelle par des mutations génétiques, mais surtout par l'Homme grâce à la sélection massale qui a sélectionné les mutations favorables. En effet, cette période historique s'inscrit dans la domestication des plantes (Le Guyader, 2017).

Un très grand nombre de preuves issues de la biologie moléculaire accréditent aujourd'hui la théorie selon laquelle le maïs cultivé provient de la domestication de la téosinte dans les basses terres du Mexique^[4], et plus précisément de la sous-espèce *Zea mays* subsp. *parviglumis* (Le Guyader, 2017 et Wade, 2023).

En 2023, une nouvelle étude génétique portant sur plus de 1 000 variétés de maïs et des espèces voisines montre que 15 à 25 % des gènes de toutes les variétés de maïs existantes ne proviennent pas de la sous-espèce *parviglumis* (originaire des basses terres du Mexique) mais d'une autre (originaire des hautes terres), *mexicana*, qui s'est hybridée avec le maïs environ 4 000 ans après la première domestication¹ (Fell, 2023 ; Yang et al. 2023 et Wade, 2023).

Le maïs va acquérir une place centrale dans l'alimentation des peuples de l'Amérique Centrale (Olmèques, Mayas, Aztèques) et des Andes (Mochicas, Nazcas, Incas). À partir du V^e millénaire avant notre ère, le maïs va ensuite rapidement s'étendre sur toute la zone tropicale et équatoriale de l'Amérique centrale et de l'Amérique du Sud, avec des variétés qui sont encore présentes aujourd'hui. Le maïs a été découvert par les Européens pour la première fois en 1492 par Christophe Colomb. La culture du maïs se développe davantage au début du

XVII^e siècle sur de plus grandes surfaces, et s'étend sur tout le pourtour méditerranéen, ainsi que dans les pays d'Europe de l'Ouest.

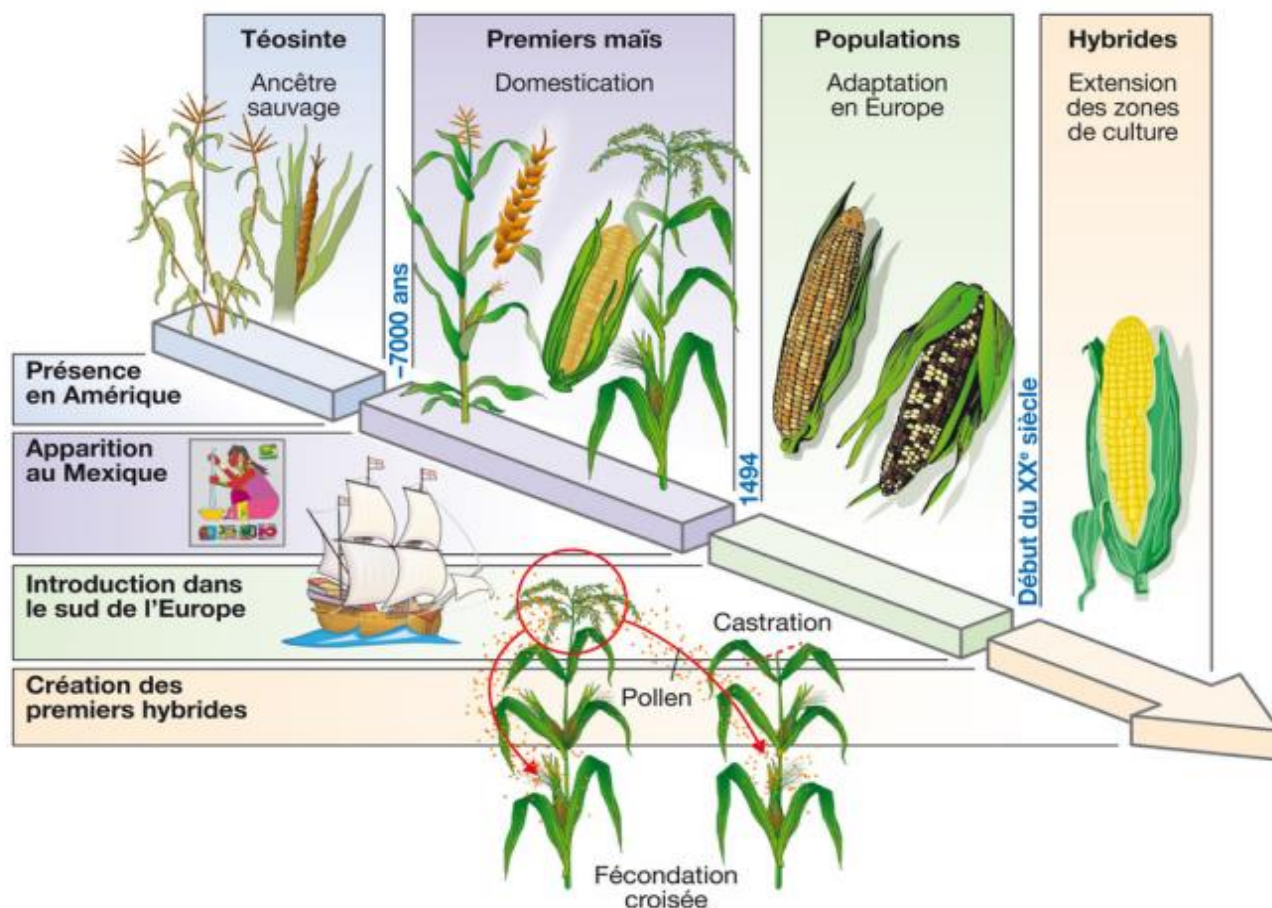


Figure1. Histoire de la culture du maïs

Source : <https://www.semae-pedagogie.org/sujet/mais-origine-caracteristiques/>

D'après Chevalier 1932 La culture du maïs serait assez ancienne en Afrique du Nord, au Sahara et au Soudan et remonterait au 16^{ème} siècle.

On ne connaît rien de précis sur l'origine de la culture du Maïs en Algérie. Il semble que cette culture y aurait été introduite d'Espagne (par les Arabes et les Maures) et non d'Asie (avant la période colombienne) comme pourrait le laisser supposer certaines hypothèses relatives à une culture antérieure de cette céréale en Turquie. Car la dispersion du maïs en Afrique du Nord aurait dû suivre bien longtemps avant sa connaissance historique européenne

les invasions arabes. La culture du maïs peut être envisagée en Algérie à quatre points de vue : pour la production de grains vert consommés comme légume d'été. Aussi pour l'obtention de fourrage utilisable directement en vert ou après ensilage et enfin pour la production d'alcool (Laumont et Laby, 1950).

I.2 Définition botanique et Taxonomie

Le maïs (*Zea mays L.*) est une plante monocotylédone annuelle appartenant à la tribu des Andropogoneae de la sous-famille des Panicoideae, de la famille des Poaceae (Renoux, 2014). Actuellement, le genre *Zea* comprend cinq espèces, qui présentent majoritairement un nombre de chromosomes $2n = 20$ avec une taille de génome d'environ 2400 Mb (Cai, 2006), *Zea mays L.* est la seule espèce cultivée de ce genre d'importance considérable dans l'économie mondiale (Renoux, 2014). Il existe également quatre parents sauvages, tous originaires de l'Amérique tropicale, appelés téosintes (Brink et Belay, 2006).

Zea mays est une plante allogame monoïque caractérisée par des feuilles allongées, une tige pleine et des inflorescences séparées : un panicule mâle au sommet, et un épi femelle latéral elle se reproduit par fécondation croisée contrairement à la plupart des *Poaceae* (Simon, 2005 et OECD, 2002).

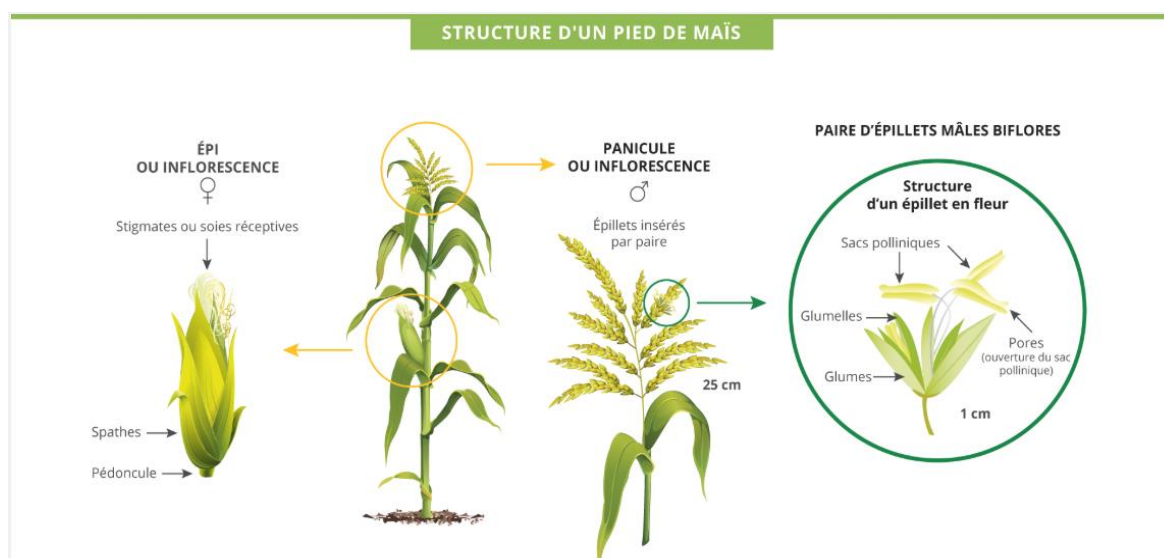


Figure 2. Structure de la plante du maïs avec les inflorescences mâles et femelles

Source : <https://www.semae-pedagogie.org/sujet/mais-origine-caracteristiques/>

RAM : méristème apical racinaire ; SAM : méristème apical des pousses)

Cette illustration montre l'organisation morphologique de la plante de maïs (*Zea mays*), avec la séparation nette entre les inflorescences mâles (panicule au sommet) et femelles (épi latéral). Cette disposition reflète la nature monoïque de l'espèce et joue un rôle essentiel dans la reproduction croisée.

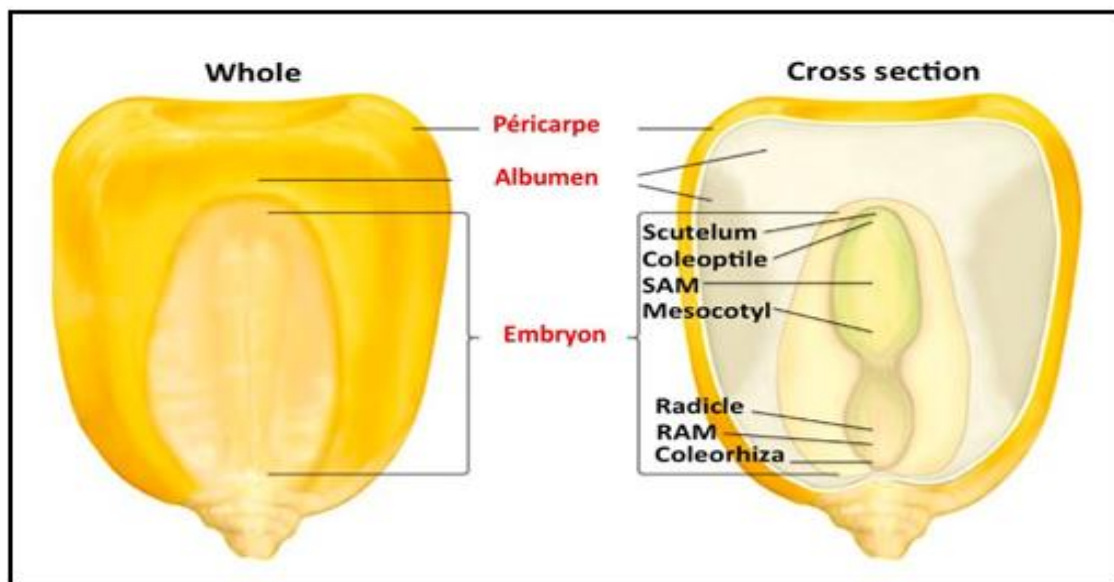


Figure 3. Structure du grain de maïs (Sáenz Rodríguez et Cassab, 2021).

Cette figure représente une coupe longitudinale du grain de maïs, mettant en évidence ses principales structures internes telles que l'embryon, l'albumen, le péricarpe, ainsi que les méristèmes SAM et RAM. Ces éléments sont essentiels pour la germination et le développement de la plante.

RAM : méristème apical racinaire ; SAM : méristème apical des pousses)

I.3 Développement du maïs

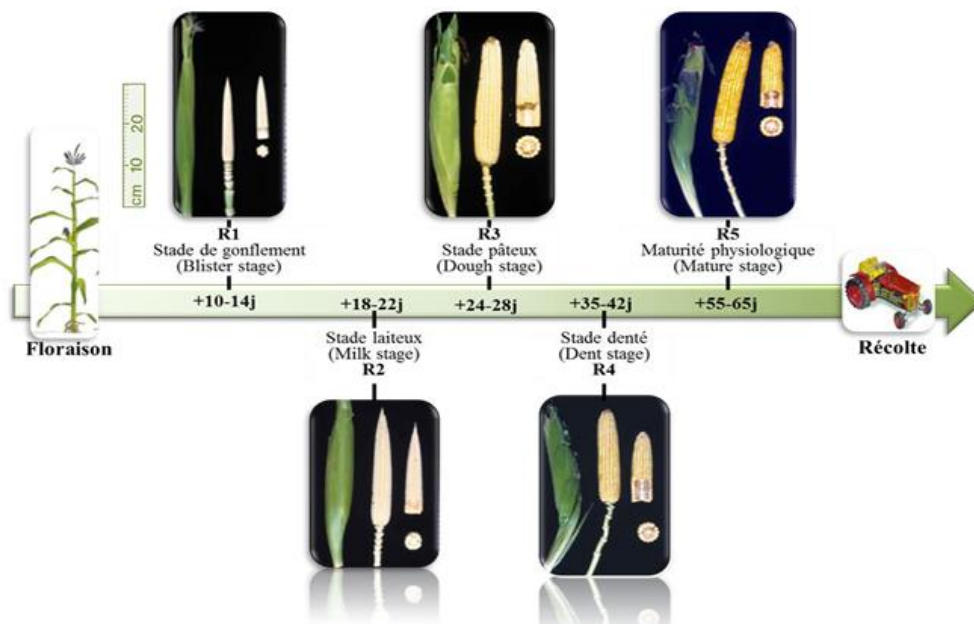
Chaque plante développe en moyenne entre 20 et 21 feuilles. Les soies apparaissent à 65 jours après émergence (sortie de terre) et les grains deviennent matures aux alentours de 125 jours. On distingue deux types de stade qui vont concerner soit le développement végétatif soit la reproduction du maïs.

➤ Stades végétatifs

Les stades végétatifs sont désignés V(n), n représentant le dernier stade foliaire. Ils sont encadrés par le premier stade VE (emergence), stade auquel le cotylédon sort de terre et le stade VT (tasseling), synonyme de l'apparition de la panicule.

Tous les pieds de maïs suivent le même développement bien que des variations, au cours des différents stades, interviennent suivant les hybrides, les saisons, les dates de semis et de récolte ou encore les localisations géographiques. En Algérie, le semis du maïs se fait généralement en été, entre les mois de juin et juillet, avec des semis qui peuvent parfois s'étendre jusqu'en août dans les régions du Sud pour une floraison en Septembre-Octobre. Entre ces deux étapes, la plante va développer ses feuilles et racines, sa tige et ses inflorescences mâles et femelles.

60 à 95 jours après le semis, la panicule (inflorescence mâle) apparaît en haut de la plante, suivie, dans un délai de 5 à 8 jours, de l'émergence des soies (inflorescences femelles) au sommet de l'épi.



➤ Stades reproductifs

Les stades reproductifs commencent dès la fécondation et concernent uniquement le développement des grains qui achèvent leur maturation le plus généralement en octobre/novembre en Algérie.

Les stades reproductifs ne concernent que le développement du grain et sont au nombre de six, de R1 à R6. (Tableau 1).

Tableau 01. Différents stades du grain de maïs

R	Stage	Stade	Quand?
R1	silking	Émergence des soies	65 jours après sortie de terre du cotylédon
R2	blister	gonflement	10-14 jours après émergence des soies
R3	milk	laiteux	18-22 jours après émergence des soies
R4	dough	pâteux	24-28 jours après émergence des soies
R5	dent	denté	35-42 jours après émergence des soies
R6	physiological maturity	maturité	55-65 jours après émergence des soies

Source : <https://www.cropscience.bayer.ca/fr-CA/articles/2021/determining-corn-growth-stages>

I.4. Situation de la culture du maïs

I.4.1. Dans le monde

Le maïs joue un rôle économique crucial au niveau mondial, étant une culture majeure pour l'alimentation humaine et animale, ainsi qu'une matière première pour diverses industries. Il est cultivé sur de vastes superficies et contribue de manière significative à la sécurité alimentaire et aux revenus agricoles dans de nombreuses régions, notamment en Afrique subsaharienne.

Dans le monde, les zones à haut rendement restent relativement limitées : elles se situent principalement aux Etats-Unis et en Europe de l'Ouest. Dans ces régions, le maïs est destiné essentiellement à l'alimentation animale et aux industries de transformation. Le maïs est aussi

cultivé en Asie, en Afrique et en Amérique latine, où il sert également pour l'alimentation humaine.

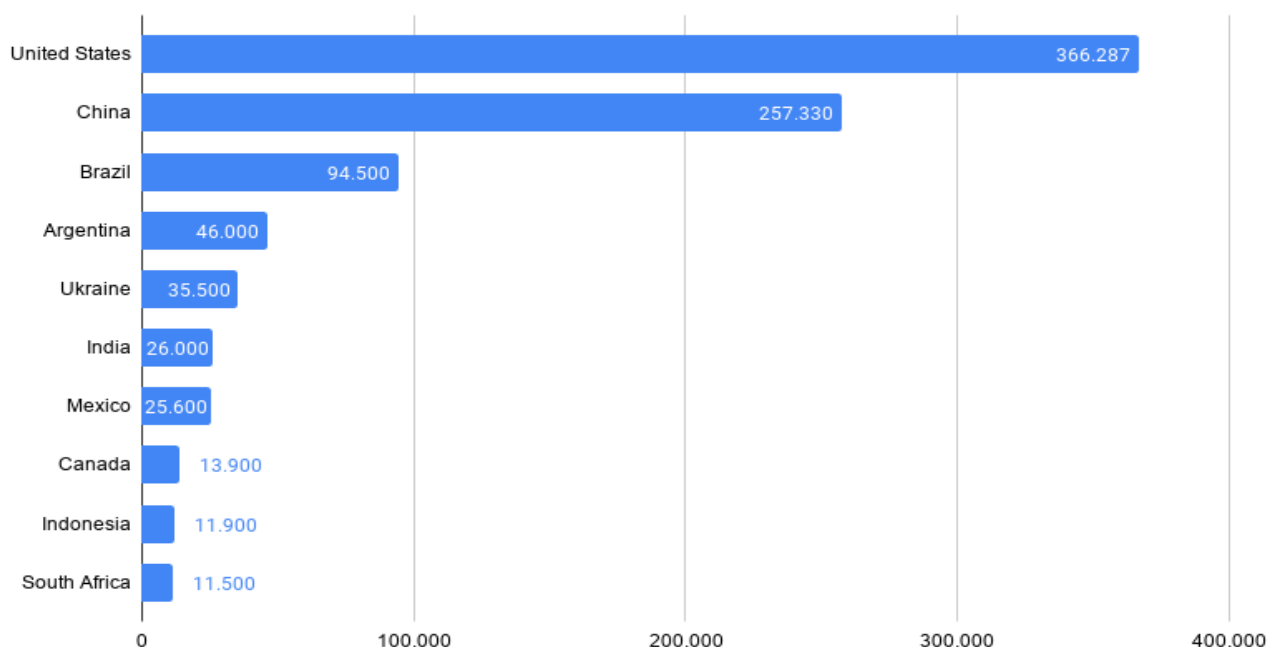


Figure 5. Principaux producteurs de maïs au monde en 2018-2019 (données en milliers de tonnes)

Source : Statista <https://www.mccormick.it/fr> (14 mai 2020)

La production mondiale de maïs (*Zea mays .L*) a connu une croissance notable ces dernières années, atteignant environ 1,241 milliard de tonnes en 2023. Cette progression est en grande partie soutenue par les États-Unis, qui demeurent le principal producteur mondial avec près de 389 millions de tonnes, soit plus de 30 % de la production globale, suivis de la Chine (289 millions de tonnes) et du Brésil (131 millions de tonnes) (**ScienceAgri, 2023**). La répartition géographique de la production montre que les Amériques dominent largement avec plus de 50 % de la production mondiale, devant l'Asie (32,5 %) et l'Europe (9,6 %) (**ScienceAgri, 2023**).

Selon le Conseil international des céréales (IGC), cette dynamique positive devrait se maintenir, avec des prévisions de production record pour la campagne 2023-2024, estimées à 1,234 milliard de tonnes (**World Grain, 2024**). Le maïs est principalement cultivé pour

l'alimentation animale, mais il joue aussi un rôle stratégique dans les secteurs agroalimentaire, énergétique (via l'éthanol) et industriel. Cette importance économique et agroécologique justifie l'attention portée à cette culture dans les stratégies agricoles mondiales.

I.4.2 En Algérie

En Algérie, la production de maïs reste relativement limitée malgré les efforts engagés ces dernières années pour en accroître le rendement et réduire la dépendance aux importations. En 2023, la wilaya d'El-Méniaâ s'est distinguée comme principal bassin de production, enregistrant une récolte de plus de 3,5 millions de quintaux de maïs fourrager cultivés sur près de 7 000 hectares répartis sur 67 exploitations agricoles (APS, 2023).

Toutefois, cette production locale est essentiellement orientée vers l'ensilage destiné à l'alimentation animale.

En effet, en 2021, environ 92 % des 163 000 tonnes produites dans la région étaient utilisées à cet effet (Les Enjeux Éco, 2023). Pour encourager la culture du maïs grain, les autorités algériennes ont mis en place un plan de valorisation de 220 000 hectares d'ici 2028 dans les régions du Sud, et ont relevé en 2023 le prix d'achat du quintal de maïs de 4 500 à 5 000 dinars, afin d'attirer davantage d'investisseurs (Afrive, 2023). Malgré ces initiatives, l'Algérie reste fortement dépendante des importations, avec environ 3,5 millions de tonnes de maïs importées en 2022-2023, principalement d'Argentine et du Brésil (Algérie Eco, 2024). Cela illustre les défis structurels auxquels est confrontée la filière maïs en Algérie, notamment en termes de disponibilité en eau, d'accès aux semences performantes et d'accompagnement technique des agriculteurs.

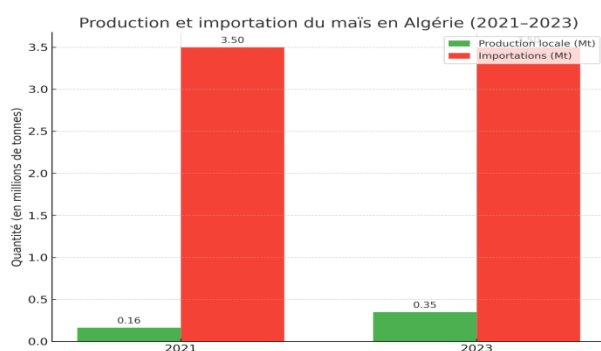


Figure 6. Évolution de la production et des importations de maïs en Algérie de 2021 à 2023

I.5 Les principales contraintes de la culture du maïs

La culture du maïs est attaquée par plus de 365 agents pathogènes dont environ 110 maladies principalement causées par des pathogènes fongiques (Shabana et *al.*, 2022). Le Tableau 2 illustre les principaux agents pathogènes qui peuvent attaquer le maïs avec les maladies qu'ils causent et leurs sites d'infection.

Tableau 02. Maladies et agents pathogènes fongiques du maïs en fonction des sites d'infection (Samsudin, 2015 ; Brown et *al.*, 2017).

Sites d'infection	Maladies	Agents responsables
Semences	Pourriture des semences	<i>Fusarium avenaceum</i> (Fr.) Sacc. <i>Fusarium culmorum</i> (Wm.G. Sm.) Sacc. <i>Fusarium graminearum</i> Schwabe <i>Fusarium verticillioides</i> (Sacc.) Kuntze
Semis	Brûlure des semis	<i>Penicillium spp.</i> <i>Phomopsis</i> (Sacc.) Bubák <i>Pythium ultimum</i> Trow <i>Rhizoctonia solani</i> J.G. Kuhn
Racine	« Helminthosporium root rot » Piétin brun Pourriture des racines	<i>Exserohilum pedicellatum</i> (A.W. Henry) K.J. Leonard & Suggs <i>Pythium ultimum</i> <i>Fusarium spp.</i>
Tige	Pourriture des tiges	<i>Fusarium graminearum</i> <i>Colletotrichum graminicola</i> (Ces.) G.W. Wilson <i>Pythium Pringsh.</i> <i>Rhizoctonia solani</i>
Feuille	Anthraxose Tâche des feuilles Strie foliaire	<i>Colletotrichum graminicola</i> (Ces.) G.W. Wilson <i>Curvularia spp.</i> <i>Alternaria alternata</i> (Fr.) Keissl. <i>Stenocarpella macrospora</i> (Earle) B. Sutton
Épi	Pourriture sèche de l'épi Moisissures vertes Fusariose de l'épi	<i>Stenocarpella maydis</i> (Berk.) B. Sutton <i>Penicillium spp.</i> <i>Fusarium spp.</i>

I.5.1 Les maladies fongiques transmissibles par semences

Plusieurs maladies fongiques peuvent être transmises par les semences de maïs, affectant la germination, la croissance et la qualité de la récolte. Parmi les plus courantes, on trouve les fusarioses, la carie commune, et la septoriose des glumes. Ces maladies peuvent entraîner une fonte de semis, des pertes de rendement, et la production de mycotoxines potentiellement dangereuses.

Le maïs est sujet à 28 maladies au stade plantule, dont 11 maladies sont transmises par semence. Parmi ces maladies, la pourriture des semences, la brûlure des semis, la tâche des feuilles causée par *Bipolaris* et *Curvularia*, ...etc. sont importantes (Debnath et *al.*, 2012).

➤ **Maladies des plantules Les pourritures de semences, brûlures des plantules (fonte des semis) et pourriture des racines**

Plusieurs champignons peuvent être à l'origine de ces maladies. Le plus souvent, les pathogènes en cause sont *Pythium*, *Fusarium*, *Gibberella*, *Trichoderma* et *Penicillium*, mais il peut aussi s'agir d'autres champignons, notamment *Diplodia* et *Rhizoctonia*.

1. L'Anthracnose

✓ **Agent pathogène** : *Colletotrichum graminicola* (Ces.) G.W. Wilson

L'anthracnose est une maladie fongique du maïs causée par *Colletotrichum graminicola*, capable d'affecter la plante à différents stades et de causer des pertes de rendement significatives.

✓ **Symptômes sur Maïs**

✓ **Symptômes foliaires (Anthracnose foliaire) :**

Les premières marques apparaissent sur les feuilles inférieures sous forme de petites taches ovales à irrégulières, gorgées d'eau. Elles virent rapidement au bronze ou marron clair avec des bords souvent pourpres. En s'agrandissant, ces lésions fusionnent, causant le flétrissement et le dessèchement des feuilles. Par temps humide, de petits points noirs brillants (acervules), qui sont les structures de sporulation du

champignon, peuvent être visibles au centre des lésions, souvent alignés le long des nervures. (White, 1999).

✓ Symptômes sur les tiges (Anthracnose de la tige ou pourriture noire de la tige) :

L'infection des tiges survient souvent plus tard dans la saison. On observe des lésions noires et luisantes sur la surface externe de la tige, généralement au-dessus des nœuds. Ces lésions s'étendent et peuvent entraîner une pourriture interne des tissus, qui deviennent noirs et spongieux. La moelle de la tige peut se décomposer, rendant la tige creuse. Les plantes affectées peuvent se briser facilement, menant à la verse. (Robertson et al., 2007; Smeltzer & Payne, 1998).

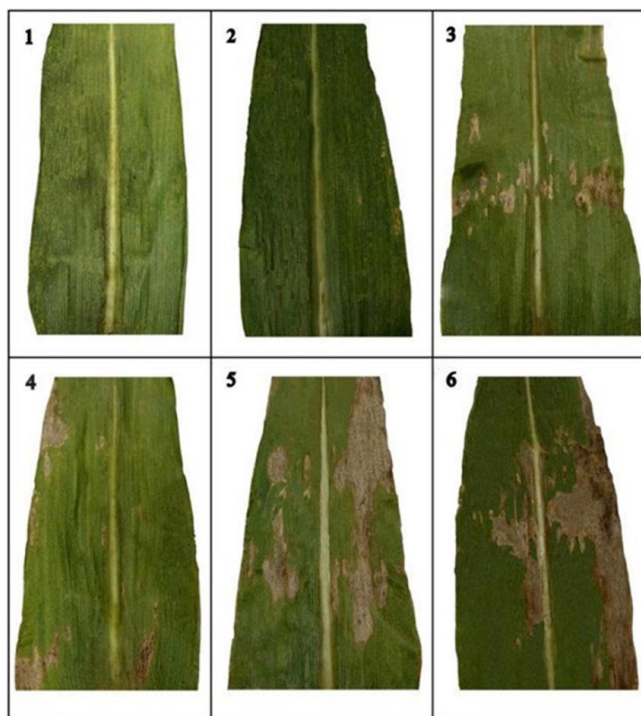


Figure 7 : Symptômes d'anthracnose observés sur les tiges de maïs

✓ **Cycle de Vie et Conditions Favorables :**

Le champignon survit d'une saison à l'autre dans les résidus de culture infectés à la surface du sol. Les spores sont dispersées par le vent et les éclaboussures d'eau. L'infection est favorisée par des périodes chaudes et humides, des précipitations fréquentes, une humidité élevée et des températures entre 20°C et 30°C. Le stress hydrique ou nutritionnel des plantes augmente leur sensibilité. (Payne & White, 1999).

2. Pourriture des épis

✓ **Agent pathogène : *Aspergillus* spp.**

La pourriture des épis du maïs due à *Aspergillus* spp., en particulier *Aspergillus flavus*, est une maladie d'une importance majeure, principalement en raison de la production d'aflatoxines, des mycotoxines hautement toxiques pour l'homme et l'animal.

✓ **Symptômes sur Maïs (généralement visibles sur les épis matures ou en fin de maturation).**

La caractéristique la plus distinctive est la présence d'une moisissure poudreuse de couleur vert olive à vert-jaunâtre qui se développe sur les grains de l'épi. Cette moisissure commence souvent à l'extrémité de l'épi ou sur des grains endommagés, puis peut s'étendre progressivement vers la base en cas d'infection sévère. Les grains infectés peuvent apparaître décolorés, flétris, ou présenter des stries noires. L'ensemble de l'épi peut paraître flétri et léger si l'infection est avancée. (Agri-Réseau)

Il est important de distinguer cette pourriture d'autres moisissures de l'épi. Par exemple, la pourriture fusarienne de l'épi (par *Fusarium* spp.) produit souvent une moisissure blanche, rosâtre ou rougeâtre. (Plantix, Agri-Réseau).



Figure 8 : Symptômes de pourriture des épis de maïs causés par *Aspergillus sp*

✓ **Conditions Favorables au Développement et à l'Infection :**

- Températures élevées et sécheresse : Le développement d'*Aspergillus flavus* et la production d'aflatoxines sont fortement favorisés par des températures très chaudes (optimum > 34°C) et des conditions de sécheresse ou de stress hydrique pendant la pollinisation et le remplissage du grain. (KWS, Agri-Réseau, Perspectives Agricoles, 2016).
- Dommages aux épis : Toute blessure aux épis, causée par des insectes (pyrale du maïs, sésamie), des oiseaux, la grêle ou des fissures de croissance, crée des portes d'entrée pour le champignon. (Perspectives Agricoles, 2016).
- Humidité élevée en fin de cycle : Bien que l'infection soit favorisée par la chaleur et la sécheresse, une humidité élevée de l'air ou des pluies en fin de cycle peuvent favoriser la sporulation et la propagation. (Agri-Réseau).
- Résidus de culture : Le champignon survit dans les résidus de maïs et le sol, constituant une source d'inoculum pour la saison suivante. (Agri-Réseau)
- Production d'Aflatoxines (Mycotoxines) : La principale préoccupation liée à l'infection par *Aspergillus flavus* est la production d'aflatoxines, notamment l'aflatoxine B1, G1, B2 et G2. Ces mycotoxines sont parmi les plus puissantes substances naturelles connues pour leur toxicité. (KWS, LG Seeds Belgium, 2025).

3. Brûlure des feuilles du maïs

- ✓ **Agent pathogène : *Bipolaris maydis* (Y. Nisik. & C. Miyake) Shoemaker (teleomorphe:**

La brûlure des feuilles du maïs, également connue sous le nom de "*Helminthosporiose* du maïs" ou "southern corn leaf blight" (SCLB) en anglais, est une maladie fongique qui peut causer des pertes de rendement significatives, surtout lorsque les variétés sensibles sont cultivées et que les conditions sont favorables à la maladie.

- ✓ **Symptômes sur Maïs**

Les symptômes de la brûlure des feuilles du maïs sont distinctifs et varient légèrement en fonction de la race de l'agent pathogène et de la génétique de l'hôte.

Les lésions apparaissent d'abord sous forme de petites taches ovales ou fusiformes, de couleur brun pâle à bronzée, généralement sur les feuilles inférieures. Ces lésions sont souvent délimitées par les nervures foliaires et peuvent s'étendre rapidement, devenant plus grandes et plus allongées (typiquement 2 à 6 mm de large et jusqu'à 25 mm de long). Au fur et à mesure que la maladie progresse, les lésions peuvent fusionner pour former de grandes plages nécrotiques irrégulières, donnant à la feuille un aspect "brûlé" ou desséché. La couleur des lésions peut varier, devenant plus sombre, allant du brun au gris-vert, en fonction de la race du champignon et de l'humidité. Dans des conditions humides, une sporulation fongique grisâtre ou foncée peut être visible sur les lésions, surtout sur la face inférieure des feuilles. En cas d'infection sévère, les feuilles peuvent flétrir et mourir prématurément, ce qui réduit la surface photosynthétique de la plante. (White, 1999; CIMMYT, Robertson, 2011).



Figure 9. Symptômes de brûlure foliaire causés par *Bipolaris maydis* sur le maïs

Bipolaris maydis est un champignon ascomycète. Sa forme téléomorphe (sexuée) est *Cochliobolus heterostrophus*. Il est caractérisé par la production de conidies (spores asexuées) multiseptées, souvent courbées ou en forme de bateau. (Agrios, 2005; Farr & Rossman, 2017).

✓ **Cycle de vie conditions favorables :**

- **Survie :** Le champignon hiverne sous forme de mycélium ou de conidies dans les résidus de maïs infectés à la surface du sol ou enfouis. Il peut également survivre sur les semences, bien que ce soit moins courant comme source primaire d'inoculum. (White, 1999).
- **Dispersion :** Les spores sont dispersées principalement par le vent et les éclaboussures d'eau (pluie, irrigation). (Robertson, 2011).
- **Infection :** L'infection est favorisée par des périodes de temps chaud et humide, avec des températures optimales situées entre 20°C et 32°C. L'humidité élevée, les rosées prolongées et les pluies fréquentes sont cruciales pour la germination des spores et la pénétration dans les tissus foliaires. (CIMMYT)
- **Multiplication :** Le cycle de vie est relativement court (quelques jours dans des conditions optimales), permettant une multiplication rapide du champignon et une propagation rapide de la maladie.

4. Charbon commun

✓ **Agent pathogène : *Ustilago maydis* (DC.) Corda**

Le charbon commun du maïs est une maladie fongique répandue causée par *Ustilago maydis*, un champignon basidiomycète. Cette maladie est facilement reconnaissable par les galles charbonneuses qu'elle produit sur diverses parties de la plante, affectant le rendement et la qualité du grain.

✓ **Symptômes sur Maïs**

La caractéristique la plus distinctive du charbon commun est la formation de grosses galles charbonneuses (tumeurs) sur les tissus jeunes et en croissance active de la plante. Ces galles sont généralement de couleur argentée ou verdâtre au début, avec une membrane externe lisse et brillante. Elles peuvent apparaître sur :

- Les épis : C'est l'emplacement le plus courant et le plus préjudiciable. Les galles peuvent remplacer des grains individuels ou des sections entières de l'épi, ou même l'épi entier. Elles peuvent atteindre une taille considérable (jusqu'à 15 cm de diamètre).
- Les panicules (inflorescence mâle) : Les galles sont souvent plus petites, mais elles déforment la panicule, qui ne produit alors pas de pollen.
- Les feuilles : Les galles sur les feuilles sont généralement petites (quelques millimètres à quelques centimètres), dures et brunâtres, mais peuvent parfois s'agrandir.
- Les tiges et les nœuds : Des galles peuvent se former sur la tige principale ou sur les talles, provoquant des déformations ou des ruptures.
- Les talles et les jeunes plantules : Si l'infection survient très tôt, des galles peuvent se développer sur les jeunes plantules, entraînant un rabougrissement ou la mort de la plante.

À maturité, la membrane externe des galles se rompt, libérant une masse de spores noires et poudreuses (téliosporés), d'où le nom de "charbon". La rupture des galles peut se produire à n'importe quel stade de leur développement. (White, 1999; Pataky & Snetselaar, 2017; Extension, University of Nebraska–Lincoln, 2020).



Figure 10. Symptômes du charbon commun du maïs causés par *Ustilago maydis* (2020)

Ustilago maydis est un champignon basidiomycète de l'ordre des Ustilaginales. Il s'agit d'un parasite obligatoire, ce qui signifie qu'il a besoin d'une plante vivante pour se développer et compléter son cycle de vie. Il est connu pour sa capacité à induire la formation de galles hypertrophiques. (Agrios, 2005; Kronstad & Stranberg, 2008).

✓ **Cycle de Vie et Conditions Favorables :**

- **Survie :** Le champignon survit d'une saison à l'autre sous forme de téliosporés (spores de repos) dans le sol ou sur les résidus de maïs. Ces spores peuvent rester viables pendant plusieurs années. (White, 1999).
- **Dispersion :** Les téliosporés sont principalement dispersés par le vent, mais aussi par les éclaboussures d'eau et les outils agricoles. (Extension, University of Nebraska–Lincoln, 2020).
- **Infection :** Contrairement à de nombreux agents pathogènes fongiques, *Ustilago maydis* ne nécessite pas de blessure pour infecter la plante, mais toute blessure (causée

par la grêle, les insectes, les outils agricoles, ou même une croissance rapide qui provoque des fissures) augmente considérablement les chances d'infection. L'infection se produit lorsque les téliospores germent et produisent des sporidies qui pénètrent les tissus jeunes et en croissance du maïs. (Pataky & Snetselaar, 2017).

- Conditions environnementales : Le développement du charbon commun est favorisé par des températures modérées (entre 20°C et 30°C). Des conditions sèches et ensoleillées avec de faibles pluies après la germination du maïs, suivies par des périodes de chaleur et d'humidité pendant la croissance végétative, sont idéales pour l'infection. Les stress hydriques ou les apports excessifs d'azote peuvent également rendre la plante plus sensible. (White, 1999; Extension, University of Nebraska–Lincoln, 2020).

5. Tache foliaire de *Curvularia*

✓ Agent pathogène : *Curvularia lunata* (Wakker) Boedijn

La tache foliaire de *Curvularia*, causée par le champignon *Curvularia lunata*, est une maladie foliaire émergente du maïs qui peut entraîner des pertes de rendement, en particulier dans les régions chaudes et humides. Bien qu'elle ait été longtemps considérée comme mineure, son importance a augmenté dans certaines zones de production.

✓ Symptômes sur Maïs

Les symptômes de la tache foliaire de *Curvularia* sont principalement observés sur les feuilles du maïs.

Les lésions apparaissent initialement comme de très petites taches rondes à ovales, de couleur beige à marron clair, souvent avec une bordure brun foncé. Elles peuvent être entourées d'un halo jaune distinct lorsque la feuille est tenue à la lumière. Les lésions s'agrandissent progressivement, mais restent généralement de petite taille (1,5 à 3 mm de diamètre). Elles peuvent être dispersées sur la feuille ou devenir si nombreuses qu'elles se chevauchent, couvrant de grandes sections de la feuille et donnant un aspect de brûlure si l'infection est sévère. Les symptômes peuvent apparaître à tout stade de croissance de la

plante, mais sont fréquemment observés sur le feuillage du milieu à la partie supérieure de la canopée. (University of Kentucky Extension, University of Delaware , Bayer Crop Science, 2025).

- Différenciation avec d'autres taches foliaires :

Il est important de ne pas la confondre avec d'autres maladies foliaires du maïs comme la tache oculaire (*Kabatiella zae*), qui produit également de petites lésions avec un halo jaune mais préfère des conditions plus fraîches et humides. La tache foliaire de *Curvularia* est caractérisée par son centre beige/marron et son halo jaune distinct, ainsi que par les conditions chaudes et humides qu'elle préfère. (Bayer Crop Science, 2025).

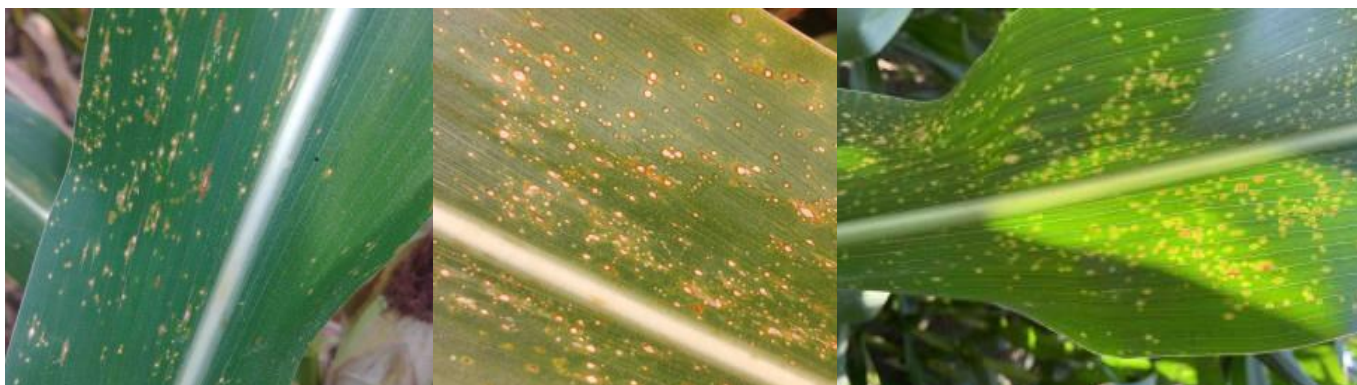


Figure 11. Symptômes de taches foliaires causées par *Curvularia lunata* sur le maïs

Curvularia lunata est un champignon ascomycète. Sa forme téléomorphe (sexuée) est *Cochliobolus lunatus*. Ce champignon est un moisissure démacée (produisant des spores de couleur foncée) et est un agent pathogène opportuniste, capable d'infecter diverses espèces végétales, dont le maïs. (Thermo Fisher Scientific, Wikipedia).

✓ **Cycle de Vie et Conditions Favorables :**

- **Survie :** Le champignon survit sous forme de mycélium ou de conidies (spores asexuées) dans les résidus de maïs infectés et le sol. Il peut également être transmis par les semences. (ResearchGate, ZeriMar Laboratoire).
- **Dispersion :** Les spores sont dispersées principalement par les éclaboussures de pluie et le vent. (Bayer Crop Science, 2025).

- Infection : L'infection se produit lorsque les spores germent en présence d'humidité foliaire et pénètrent les tissus de la feuille.
- Conditions environnementales : *Curvularia lunata* prospère dans des conditions chaudes et humides. Des températures optimales pour son développement se situent généralement entre 20°C et 30°C. Les périodes prolongées d'humidité foliaire, dues à la pluie, la rosée ou l'irrigation, favorisent la germination des spores et l'infection. Les champs de maïs en monoculture et ceux utilisant des pratiques de travail du sol réduit (conservation tillage) sont plus susceptibles d'avoir des niveaux d'inoculum plus élevés. (ResearchGate, ZeriMar Laboratoire, Bayer Crop Science, 2025).
- Facteurs de stress : Les plantes soumises à un stress (sécheresse, faible fertilité) peuvent être plus vulnérables à l'infection. (ResearchGate)(**Labrie, 2020**).

6. Le genre *Fusarium*

✓ Généralités sur la Fusariose

La fusariose est un terme générique désignant un groupe de maladies des plantes causées par des espèces de champignons appartenant au genre *Fusarium*. Ce genre est vaste et comprend des milliers d'espèces et de souches, dont un grand nombre sont des phytopathogènes majeurs, tandis que d'autres sont des saprophytes (vivant sur la matière organique en décomposition) ou des endophytes (vivant à l'intérieur des plantes sans leur nuire apparemment).

La fusariose est l'une des maladies fongiques les plus répandues et destructrices, affectant une très large gamme de cultures agricoles à l'échelle mondiale, y compris les céréales (blé, maïs, orge, riz), les légumes, les fruits, les plantes ornementales et les cultures horticoles (Leslie et Summerell, 2006).

✓ **La Fusariose du Maïs**

✓ **Agents causals et épidémiologie de la Fusariose du maïs**

La fusariose du maïs n'est pas causée par un unique agent pathogène, mais par un complexe d'espèces de *Fusarium*. Les principales espèces incriminées, dont la répartition et la prévalence peuvent varier selon les régions et les conditions climatiques, sont :

- *Fusarium verticillioides* (anciennement *F. moniliforme*) : C'est l'espèce la plus fréquemment isolée du maïs. Elle est mondialement répandue et est principalement associée à la pourriture des épis et des tiges, ainsi qu'à la production de fumonisines (Munkvold et Stahr, 2017).
- *Fusarium proliferatum* : Souvent présente en co-infection avec *F. verticillioides*, elle contribue également à la pourriture des épis et est un producteur de fumonisines (Leslie et Summerell, 2006).
- *Fusarium graminearum* (syn. *Gibberella zaeae*, sa forme téléomorphe) : Cette espèce est particulièrement virulente et est responsable de la pourriture rose ou rougeâtre des épis. Elle est redoutable pour sa capacité à produire des mycotoxines telles que le désoxynivalénol (DON), la zearalénone et les nivalénols (Goswami et Kistler, 2004). Sa présence est souvent favorisée par des conditions froides et humides pendant la floraison.
- *Fusarium subglutinans* et *Fusarium avenaceum* : Ces espèces peuvent également être impliquées, bien que moins fréquemment, dans l'infection des épis et la production de mycotoxines secondaires (Champeil et al., 2004).

Ces champignons sont des saprophytes facultatifs, ce qui signifie qu'ils peuvent survivre dans le sol, sur les résidus de culture infectés (stover, rafles), et dans les semences. Les spores (conidies et ascospores) sont disséminées principalement par le vent et les éclaboussures de pluie. L'infection des plantes peut se produire à différents stades de développement :

- Au niveau des racines et de la base de la tige : Les spores présentes dans le sol peuvent infecter les racines et le collet, provoquant une pourriture qui affecte l'absorption de l'eau et des nutriments (White, 1999).

- Au niveau des soies et des épis : C'est le mode d'infection le plus critique pour la contamination des grains. Les spores peuvent atterrir sur les soies pendant la pollinisation et les germes mycéliens peuvent progresser le long des soies jusqu'aux grains en développement (Logrieco et al., 2002). Les blessures causées par les insectes (comme la pyrale du maïs, *Ostrinia nubilalis*), la grêle ou les dommages mécaniques offrent des points d'entrée supplémentaires pour le champignon (Dowd et al., 2004).
- Par les stomates : Moins fréquemment, le champignon peut pénétrer les tissus végétaux par les ouvertures naturelles.

Les conditions climatiques jouent un rôle prépondérant dans le développement de l'épidémie. Des températures modérées à chaudes (20-30°C) et une humidité élevée ou des périodes de pluies intenses, particulièrement pendant la floraison et le remplissage des grains, sont extrêmement favorables à l'infection et à la prolifération du champignon, ainsi qu'à la production de mycotoxines (Miller, 2001).

✓ **Symptomatologie et Impact sur le Rendement**

La fusariose du maïs peut se manifester par une gamme de symptômes affectant diverses parties de la plante, dont la sévérité dépendra de l'espèce de *Fusarium*, de la sensibilité de la variété de maïs, du stade d'infection et des conditions environnementales.



Figure 12. Les symptômes de la pourriture de la tige causée par *Fusarium*, à gauche, Pourriture de la gaine du maïs à droite Pourriture des tissus internes de la tige provoquant une décoloration rose et dessèchement des tissus de la tige et l'épi.

Source : <https://www.syngenta.ca/fr/pests/disease/gibberella-ear-rot/corn>

<https://cipf.be/fr/mais/maladies/fusariose-fusarium-s>

✓ Symptômes sur les Racines et les Tiges

L'infection par *Fusarium* peut entraîner une pourriture des racines et une pourriture de la tige (stalk rot). Les racines infectées peuvent présenter une décoloration brun-rougeâtre et une détérioration. Au niveau de la tige, des lésions brunâtres à violacées peuvent apparaître à la base ou aux nœuds, entraînant un ramollissement des tissus internes qui deviennent spongieux et décolorés.

Ceci affaiblit la plante, la rendant plus sujette à la verse avant la récolte, ce qui complique la moisson et peut entraîner des pertes importantes de rendement (Duvick, 2001). Dans les cas graves, le blocage du système vasculaire peut provoquer un flétrissement prématuré des feuilles et un avortement des grains.

- **Symptômes sur les Épis et les Grains**

La pourriture des épis (ear rot) est la manifestation la plus économiquement dommageable de la fusariose. Les symptômes varient selon l'espèce de *Fusarium* :

- Pourriture à *Fusarium verticillioides* et *F. proliferatum* : Elle se caractérise souvent par une moisissure blanche, rosée ou saumon, souvent localisée à la pointe de l'épi ou sporadiquement sur les grains individuels ("starburst" pattern). Les grains infectés peuvent devenir ternes, fripés, décolorés et légers. La moisissure peut s'étendre sur les soies et les rafles (White, 1999).
- Pourriture à *Fusarium graminearum* : Connu sous le nom de "*Gibberella* ear rot", ce type de pourriture est généralement plus agressif. Il se manifeste par une moisissure rose à rouge-orangé vif qui commence souvent à la pointe de l'épi et progresse vers le bas. Les grains infectés adhèrent fermement à la rafle et peuvent être complètement recouverts de moisissure. L'infection peut également se propager du pédoncule de l'épi (Logrieco et al., 2002).

L'impact sur le rendement se manifeste par :

- Réduction du poids des grains : Les grains infectés sont souvent plus légers et plus petits, diminuant le poids total de la récolte (Duvick, 2001).
- Perte de qualité marchande : Les grains moisissés sont impropres à la vente et à la consommation, entraînant des déclassements et des refus de lots.
- Pertes lors de la récolte : La verse des plantes et la fragilité des épis infectés peuvent augmenter les pertes au champ lors de la moisson mécanique.

- ✓ **Cycle de vie du *Fusarium***

Le cycle de vie de *Fusarium spp.* comprend plusieurs étapes : survie dans le sol ou les résidus végétaux sous forme de spores ou de mycélium, germination des spores en conditions favorables, infection des plantes hôtes par pénétration directe ou via les blessures, colonisation des tissus, et production de nouvelles spores permettant la dispersion du champignon. Ce cycle explique la persistance et la propagation rapide de ces agents pathogènes dans les cultures.

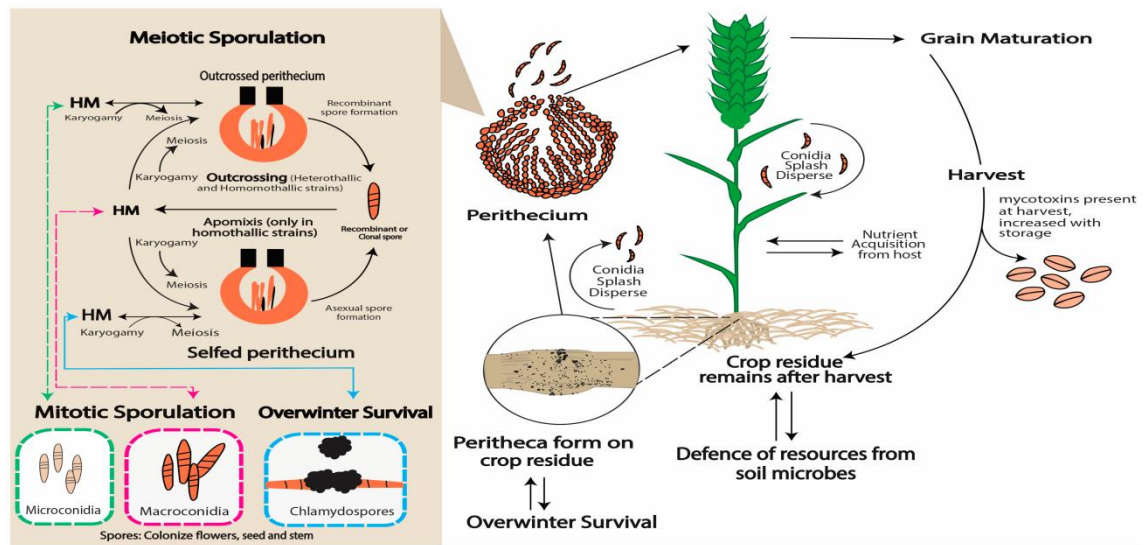


Figure 13 : Cycle de vie généralisé de *Fusarium* spp., montrant les phases sexuée et asexuée, adapté de Buerstmayr et al. (2020) et Ma et al. (2013).

✓ Les Mycotoxines

L'aspect le plus critique de la fusariose du maïs réside dans la capacité des espèces de *Fusarium* à produire des mycotoxines, des métabolites secondaires toxiques. Ces composés sont stables et persistent dans les grains même après récolte et transformation, représentant un risque sérieux pour la santé humaine et animale. Les principales mycotoxines associées à la fusariose du maïs sont :

- **Les Fumonisines (FBs)**

Produites principalement par *F. verticillioides* et *F. proliferatum*, les fumonisines sont les mycotoxines les plus fréquemment détectées dans le maïs à l'échelle mondiale. Les plus importantes sont la fumonisine B1 (FB1), la FB2 et la FB3. Elles sont classées par l'Agence Internationale de Recherche sur le Cancer (CIRC) comme potentiellement cancérogènes pour l'homme (Groupe 2B) (IARC, 2002). Chez les animaux, elles sont associées à plusieurs pathologies graves :

- Leucoencéphalomalacie équine (LEM) : Une maladie neurologique mortelle chez les chevaux et les ânes (Marasas et *al.*, 2001).
- Œdème pulmonaire porcin (PPE) : Une affection respiratoire aiguë chez les porcs (Colvin et *al.*, 1993).
- Toxicité hépatique et rénale : Chez diverses espèces animales, y compris la volaille.

Des niveaux élevés de fumonisines dans l'alimentation humaine ont été corrélés à une incidence accrue de cancer de l'œsophage dans certaines régions du monde (Gelderblom et *al.*, 2007).

- **Le Désoxynivalénol (DON)**

Également appelé vomitoxine, le DON est principalement produit par *F. graminearum*. C'est l'une des mycotoxines les plus répandues dans les céréales. Sa consommation, même à des niveaux relativement faibles, peut entraîner des effets indésirables chez les animaux et les humains :

- Refus d'alimentation et vomissements : Particulièrement chez les porcs, d'où son nom de "vomitoxine" (Rotter et *al.*, 1996).
- Immunosuppression : Le DON peut affecter le système immunitaire, augmentant la susceptibilité aux infections.
- Troubles gastro-intestinaux : Douleurs abdominales, diarrhée et malabsorption chez l'homme (Pestka, 2007).
- **La Zearalénone (ZEA)**

Produite également par *F. graminearum*, la zearalénone est une mycotoxine non stéroïdienne qui possède une activité œstrogénique. Sa structure est similaire à celle des œstrogènes, lui permettant de se lier aux récepteurs des œstrogènes et d'induire des effets hyperœstrogéniques chez les animaux, en particulier les porcs (Kuiper-Goodman et *al.*, 1987) :

- Infertilité et troubles de la reproduction : Chez les truies, elle peut provoquer des œdèmes vulvaires, une augmentation du volume de l'utérus, des kystes ovariens et des avortements (Eriksen et Nordstoga, 1996).

- Effets sur la volaille : Réduction de la ponte et de la fertilité.

La présence simultanée de plusieurs mycotoxines (co-contamination) dans un même échantillon de maïs est fréquente et peut entraîner des effets synergiques ou additifs, rendant la gestion du risque encore plus complexe (Speijers et Speijers, 2004). Des réglementations strictes concernant les teneurs maximales en mycotoxines dans les denrées alimentaires et les aliments pour animaux sont en place dans de nombreux pays, y compris en Algérie (exemple : Arrêté interministériel du 27 octobre 2013 fixant les teneurs maximales en certaines substances indésirables dans les denrées alimentaires, Journal Officiel, 2013).

✓ **Nombreux insectes et ravageurs, sont des ennemis de la culture du maïs:**

- Les fourmis : s'attaquent surtout aux germes des semences au niveau du sol, pouvant influencer négativement le taux de levée.
- les chenilles : les larves de la pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis*), du légionnaire d'automne (*Spodoptera frugiperda* S.) causent des dégâts au niveau des épis en consommant les grains, le cornet et feuilles (IRDA, 2009), (*Agrotis* sp) sectionne les jeunes tiges (Pierre, 1999).
- Les aphides vert foncé et les punaises fulgorides (*Peregrinus maidis* Ashmead) s'attaquent aux verticilles .
- Les puceron du maïs (*Rhopalosiphum maidis*) secrétant le miellat qui représente un danger pour la fécondation; (Carvil,2016)

Bien que les champignons soient les agents pathogènes les plus fréquemment rencontrés dans les cultures de maïs, plusieurs maladies bactériennes peuvent également causer des pertes importantes. L'une des principales est la flétrissure bactérienne causée par *Pantoea stewartii* subsp. *stewartii*, transmise par le chrysomèle du maïs (*Chaetocnema pulicaria*). Elle entraîne un flétrissement systémique des feuilles, un rabougrissement des plantes, et peut compromettre gravement le rendement (Roper, 2011).

Une autre maladie émergente est la strie bactérienne (*Xanthomonas vasicola* pv. *vasculorum*), qui provoque des lésions allongées et imbibées d'eau sur les feuilles, pouvant évoluer en

nécroses. Elle a été signalée dans plusieurs régions productrices de maïs et représente une menace croissante pour la santé des cultures (Langemeier et al., 2020). La prévention repose essentiellement sur l'utilisation de semences saines, la rotation culturale, et la gestion des résidus végétaux.

I.6 Moyens de prévention et de lutte contre les champignons et les mycotoxines dans le maïs

La maîtrise de la contamination par les champignons et les mycotoxines dans le maïs est un enjeu majeur, non seulement pour la sécurité alimentaire et animale, mais aussi pour l'économie agricole. Au-delà des bonnes pratiques déjà évoquées, des recherches et des applications plus poussées sont développées pour offrir une protection robuste et durable.

1.6.1 Stratégies en amont : La génétique et la bio-ingénierie

La sélection variétale est au cœur de la prévention. Les efforts portent sur plusieurs axes :

- **Résistance génétique intrinsèque :**
 - **Résistance aux maladies fongiques :** Développer des variétés de maïs qui possèdent des gènes de résistance naturelle à des espèces spécifiques de champignons pathogènes comme *Fusarium verticillioides* (producteur de fumonisines) ou *Aspergillus flavus* (producteur d'aflatoxines). Cela inclut la recherche de gènes qui codent pour des protéines antifongiques ou des mécanismes de défense plus efficaces (Munkvold, 2003).
 - **Résistance à la pénétration des insectes :** Améliorer la dureté de l'enveloppe du grain (péricarpe) ou la compacité des spathes (feuilles enveloppant l'épi) pour limiter les dommages causés par les insectes. Moins de dégâts = moins de portes d'entrée pour les spores fongiques (Blandino et al., 2012).
- **Tolérance à la production de mycotoxines :** Certaines variétés peuvent être infectées par le champignon mais produisent significativement moins de mycotoxines. La recherche vise à comprendre et à exploiter ces mécanismes de tolérance (Payne, 1992).

- **Ingénierie génétique (OGM)** : Bien que controversée dans certaines régions, l'ingénierie génétique offre des pistes pour introduire des gènes de résistance à des insectes spécifiques (maïs Bt, résistant aux lépidoptères comme la pyrale) ou même des gènes qui interfèrent directement avec la voie de biosynthèse des mycotoxines chez le champignon. Les variétés Bt, en réduisant les blessures dues aux insectes, diminuent indirectement l'incidence des mycotoxines, notamment les fumonisines (Blandino et *al.*, 2012).

I.6.2 Gestion de l'environnement au champ : Précision et innovation

- **Modélisation et systèmes d'aide à la décision (SAD)** : L'utilisation de modèles prédictifs basés sur les conditions météorologiques (température, humidité, pluviométrie) permet d'estimer le risque d'infection fongique et de production de mycotoxines. Ces modèles aident les agriculteurs à prendre des décisions éclairées concernant les dates de semis, d'irrigation, de récolte, ou l'application de traitements (Xu et *al.*, 2019). Des plateformes agronomiques utilisent ces données pour donner des alertes personnalisées.
- **Bio-contrôle au champ** : L'application d'agents de bio-contrôle directement au champ est une stratégie prometteuse.
- **Souches atoxigènes** : L'utilisation de souches non toxigènes d'*Aspergillus flavus* (qui ne produisent pas d'aflatoxines) est une méthode bien établie dans certaines régions (comme les États-Unis et l'Afrique). Ces souches sont épanouies dans les champs et entrent en compétition avec les souches toxigènes, réduisant significativement la contamination des cultures. Des produits comme Aflasafe™ (pour l'Afrique) ou Afla-Guard® (pour les USA) sont des exemples réussis (Palumbo et *al.*, 2010; Bandyopadhyay et *al.*, 2016).
- **Autres micro-organismes** : Des recherches sont menées sur l'utilisation de bactéries (*Bacillus subtilis*, *Pseudomonas fluorescens*) ou d'autres champignons (comme *Trichoderma*) qui peuvent inhiber la croissance des champignons producteurs de mycotoxines ou dégrader les mycotoxines directement dans le sol ou sur la plante (Jouany, 2007).

- Fongicides : Bien que leur utilisation soit souvent limitée pour des raisons économiques et environnementales, certains fongicides peuvent être appliqués en prévention au champ pour réduire l'incidence de certaines maladies fongiques si les conditions de risque sont élevées. Leur efficacité contre la production de mycotoxines spécifiques peut varier (Munkvold, 2003).

I.6.3 Gestion post-récolte : Au-delà du simple stockage

- **Séparation des grains contaminés** : Des technologies avancées, comme le tri optique, peuvent être utilisées pour identifier et éliminer les grains endommagés, décolorés ou présentant des signes de moisissure. Cette méthode est très efficace pour réduire la charge mycotoxinique globale d'un lot (Whitaker et *al.*, 2003).
- **Techniques de séchage avancées** : En plus du séchage rapide, des techniques comme le séchage à basse température et faible débit d'air peuvent être utilisées pour minimiser les risques de fissuration des grains tout en réduisant l'humidité efficacement. La surveillance en temps réel de l'humidité et de la température est cruciale (CAST, 2003).
- **Atmosphères contrôlées et gaz inertes** : Le stockage du maïs sous atmosphère modifiée (réduction de l'oxygène, augmentation du CO₂) ou sous gaz inertes (azote) peut inhiber la croissance de la plupart des champignons de stockage et des insectes. C'est une technique coûteuse mais très efficace pour des stocks de grande valeur (Hell et *al.*, 2000).
- **Détoxification physique** :
 - **Lavage et décorticage** : Pour certains produits transformés, un lavage ou un décorticage peut aider à éliminer une partie des mycotoxines qui se trouvent en surface ou dans les couches externes du grain.
 - **Chaleur et traitement thermique** : Bien que la chaleur puisse dégrader certaines mycotoxines (notamment les fumonisines lors de la cuisson), elle n'est pas efficace pour toutes (comme les aflatoxines) et peut altérer les qualités nutritionnelles du maïs (CAST, 2003).

- **Additifs de stockage** : L'utilisation de substances comme l'acide propionique ou ses sels peut inhiber la croissance des moisissures pendant le stockage, particulièrement dans les conditions où l'humidité n'est pas idéalement basse. Ces acides gras volatils agissent comme des fongistats (CAST, 2003).

I.6.4. Innovation et recherche continue

- Développement de capteurs rapides : La mise au point de capteurs portables et rapides pour détecter les mycotoxines sur le terrain ou au point de réception permettrait une prise de décision quasi-immédiate concernant la gestion des lots de maïs.
- Approches "Omics" : L'utilisation de la génomique, la transcriptomique, la protéomique et la métabolomique aide à comprendre les interactions complexes entre le maïs, le champignon et la production de mycotoxines, ouvrant la voie à de nouvelles stratégies de lutte (Desjardins, 2006).
- Gestion des résidus : La recherche explore des moyens de décomposer rapidement les résidus de maïs infestés après la récolte pour réduire l'inoculum fongique dans le champ pour la saison suivante.

En résumé, une gestion efficace des mycotoxines dans le maïs exige une coordination et une intégration de toutes les stratégies à chaque étape de la chaîne d'approvisionnement. Cela inclut la recherche scientifique, la formation des agriculteurs, la mise en place de réglementations strictes, et la sensibilisation des consommateurs. C'est un effort collectif qui permet de garantir un maïs sûr et de qualité.

Chapitre II

Matériel & Méthodes

1. Matériel et Méthodes

1.1. Matériel végétal

Quatre échantillons de grains de maïs collectés dans des régions Sud de l'Algérie ainsi que des échantillons de plants de maïs malades ont été utilisés dans la présente étude. Ce matériel végétal a été sélectionné en raison de sa disponibilité locale et de son intérêt agronomique dans les régions semi-arides et sahariennes.

Les informations concernant les grains de maïs objet d'analyse sont représentées au niveau du tableau 03 . Ces échantillons proviennent de la récolte de l'année 2023 et ont été stockés à 4° C jusqu'à la réalisation des analyses de la mycoflore associée.

La variété **352**, de type **jaune triple hybride**, commercialisée par la société **Shanen Seeds Company** a été retenue pour la réalisation des tests pathologiques.

Tableau:03 : liste des échantillons de grains et plants de maïs utilisés

N° d'échantillons	Variétés de Maïs	Organe	Origines	recolte
1	Haïtèque	Grains	Ghardaïa (Hassi Lefhal)	2024
2	Haiteque	Grains	Egypt	2021
3	Haïtèque – RedMed	Grains	Ain Madhi	2024
4	Variété italienne	Grains	Tadjmout	2024
5	Variété Italienne	Feuilles	Tadjmout	2022
6	Haiteque	Feuilles	Laghouat	2024

1.2. Matériel fongique

Dix isolats appartenant au genre *Fusarium* et *curvularia* obtenus lors de l'analyse des échantillons du maïs cités précédemment (Tableau. 4) ont été utilisés dans le test de pathogénicité.

Tableau: 04 : Liste des 10 isolats de *Fusarium* spp. utilisés dans le test de pathogénicité

Code expérimental	Organe	Année d'isolement	Variété	Année d'isolement
IS1M4F	Grains	2025	Variété italienne	2025
IS2M1F	Grains	2025	Haïtèque	2025
IS3M1F	Grains	2025	Haïtèque	2025
IS4M4F	Grains	2025	Variété italienne	2025
IS5M6C	Feuille	2025	Haïtèque	2025
IS6M1F	Grains	2025	Haïtèque	2025
IS7M1C	Feuille	2025	Haïtèque	2025
IS8M3F	Grains	2025	Haïtèque – RedMed	2025
IS9M4F	Grains	2025	Variété italienne	2025
IS10M2F	Grains	2025	Haiteque	2025

2. Méthodes Isolement de la mycoflore associée aux feuilles et grains de maïs

Un sous échantillon de 100 graines de maïs pour chaque lot a été désinfecté avec l'hypochlorite de sodium (NaClO) à 2 % pendant 5 min, puis rincé trois fois à l'eau distillée stérile (5 min), puis séché sur un papier absorbant stérile. Par la suite dans chaque boîte de Pétri stérile contenant du DCPA (Annexe....), 10 grains désinfectés ont été déposés de manière équidistante à l'aide de pinces stériles. Pour chaque variété de maïs, 10 boîtes ont été préparées. Les boîtes ont été étiquetées et incubées à 22 ± 2 °C dans un incubateur, pendant six jours en conditions d'obscurité totale et continue.

Durant l'incubation, la croissance des colonies fongiques a été surveillée quotidiennement afin de repérer les espèces dominantes et vérifier l'absence de contaminations.

Pour les feuilles présentant des symptômes ont été mises sur un milieu PDA (Potato Dextrose Agar), milieu standard riche en glucides favorisant la croissance de nombreuses espèces fongiques, en particulier les genres *Aspergillus*, *Penicillium* et *Fusarium*. Les échantillons de plants de maïs malades ont été analysés selon la même méthode décrite préalablement.

Après incubation, les cultures obtenues sont purifiées par des repiquages successifs et par culture monospore. Selon Samson et *al.*, 2004, Les colonies présentant des morphologies différentes ont été soigneusement prélevées à l'aide d'une anse stérile et transférées sur de nouvelles boîtes de PDA pour éliminer toute contamination croisée.

Cette opération, appelée repiquage successif, a été répétée 2 à 3 fois jusqu'à obtention de colonies homogènes, bien isolées et pures.

2.1 Purification par culture monospore

La monospore a été réalisée selon la technique décrite par Rapilly (1968), où une suspension de spores a été préparée à partir d'une culture fongique âgée de 7 jours. Un fragment de 1 cm de diamètre de chaque isolat est mis dans un tube à essai contenant 5 à 10 ml d'eau distillée stérile, l'ensemble est mélangé à l'aide d'un vortex.

La suspension est diluée afin d'obtenir une concentration finale de 1×10^3 conidie /ml. Ensuite, à l'aide d'une micropipette, une goutte de la suspension a été étalée de manière uniforme dans une boîte de Petri contenant le milieu PDA. Après 24 h d'incubation à une température comprise entre 20-22°C et à l'obscurité, les conidies en germination sont prélevées et repiquer dans des boîtes de Petri contenant le milieu PDA et mises en incubation dans les mêmes conditions.

2.2 Identification morphologique des isolats de *Fusarium* obtenus

Les isolats appartenant au genre *Fusarium* ont été identifiés selon les critères morphologiques et culturels établis par Nelson et al. (1983), Burgess et al. (1994) et Leslie et Summerell (2006).

➤ Les critères culturels

Les caractères culturels utilisés dans la description et l'identification des isolats fongiques sont les suivants :

- l'aspect du mycélium
- La couleur des colonies
- La vitesse de croissance

- La pigmentation au niveau de l'agar sur milieu PDA
- La présence ou l'absence des sporodochies
 - **Les critères morphologiques**
- L'absence ou la présence des microconidies
- La forme des macroconidies et leur taille
- L'absence ou la présence des chlamydospores et leurs dispositions

Par la suite, nous avons utilisé les ouvrages suivants : Champion (1997), Warham et al. (1997), Burgess et al. (1994), et Leslie et Summerell (2006).

2.3 Fréquence des genres fongiques

Le pourcentage d'apparition de chaque champignon a été calculé comme suit :

$$\% \text{ d'apparition NAC/NTATC} \times 100$$

Dont : NAC = Nombre d'Apparition du Champignon ; NTATC = Nombre Total d'Apparition de Tous les Champignons (Dedi et Diomande, 2018).

Le taux de contamination des grains de maïs sont exprimés en pourcentage de grains infectés dans chaque échantillon de la façon suivante:

$$\text{Taux de contamination}(\%) = \frac{\text{nombre de grains infectés par un genre ou espèce}}{\text{nombre total des grains}} \times 100$$

2.4 Mesure de la croissance mycélienne des isolats obtenus sur PDA à 22 °C

Ce test a été réalisé afin de mesurer la croissance mycélienne des isolats de *Fusarium* et *Curvularia* et de déterminer l'optimale de leur croissance dans une durée de temps de 12 jours.

Des explants mycéliens (6 mm de diamètre) provenant de cultures âgées de 7 jour de chaque isolat ont été déposés dans des boites contenant le milieu PDA et incubés aux températures 22°C à l'obscurité. 2 répétitions ont été réalisées pour chaque isolat. Des

mesures quotidiennes de la croissance mycélienne ont été prises après 24 h, 48 h, 72 h, 96 h et 120 h jusqu'à 12 jours d'incubation.

3. Etude de la pathogénicité des isolats de *Fusarium sp* et *curvularia sp*

Les tests de pathogénicité ont été réalisés par inoculation de la variété 352 selon deux techniques d'inoculations différentes, l'inoculation par pulvérisation d'une suspension de spores, l'inoculation par la méthode de la couche d'inoculum. Les informations relatives aux espèces de *Fusarium* et *curvularia* utilisés dans ces tests sont mentionnées au niveau du tableau 05

3.1 Préparation du sol

Le sol utilisé provient d'un champ de blé d'El Assafia. Ce dernier est stérilisé à 100° C pendant 2 à 3 h dans une étuve. Des pots en plastique de 15 cm de diamètre ont été utilisés, ensuite un mélange de 2/3 de sol avec 1/3 de terreau commercialisé (stérile) avait été préparé et distribué dans ces pots.

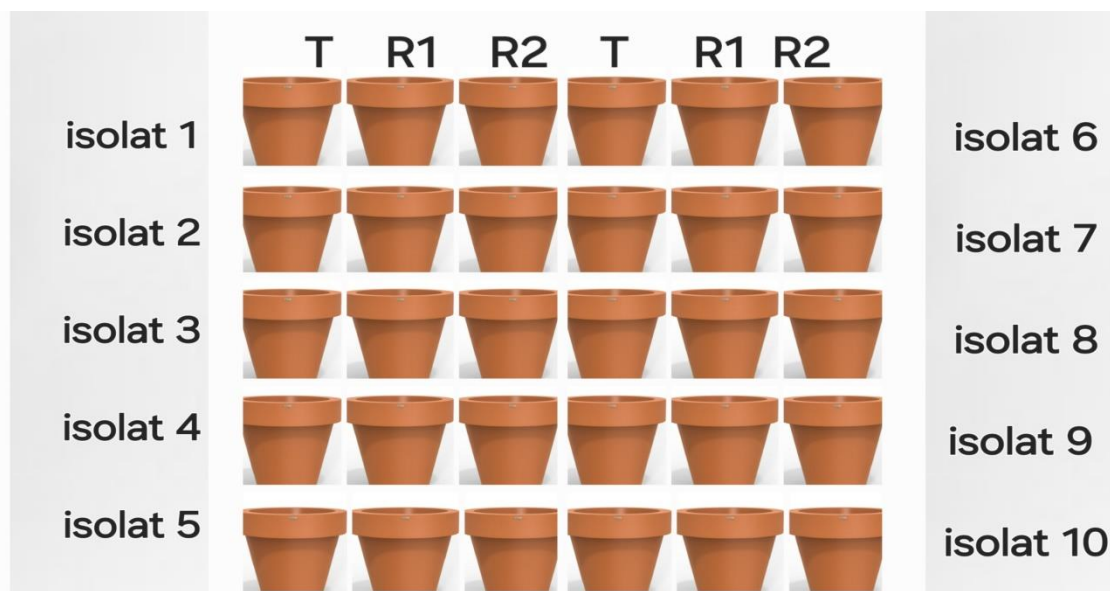


Figure 13 : Schéma de dispositif expérimental de l'essai de l'évaluation de la pathogénicité de *Fusarium sp.* et *Curvularia sp.* adopté aux deux méthodes d'inoculation

3.2 Dispositif expérimental

Pour chaque isolat 2 répétitions ont été faites, 2 pots pour chaque répétition, et chaque pot contient 2 plantules pour les deux méthodes d'inoculation, La figure représente le dispositif expérimental suivi pour ces deux méthodes d'inoculation.

3.3 Évaluation de l'agressivité des isolats de *Fusarium spp.* et *curvularia spp.* sur la partie aérienne des plants de maïs

Dans cet essai, 10 isolats ont été utilisés. Chaque isolat a été cultivé parallèlement sur 5 boîtes contenant du milieu PDA pendant 10 jours et à 25 °C. Les spores ont été récupérées par grattage et filtration des cultures. Ensuite, les suspensions sporales obtenues ont été ajustées sur cellule de Malassaz à la concentration de 10^6 spores/ ml (Akinsanmi et *al.*, 2004).

Les inoculations ont débuté lorsque les plantes avaient atteint le stade début tallage, par pulvérisation jusqu'au ruissellement de l'inoculum sur les épis. Cette opération a été effectuée à l'aide d'un pulvérisateur donnant un jet homogène et continu. Une fois inoculées, les plantes ont été couvertes par des sachets en plastique pendant 48 h pour le maintien d'une humidité relative supérieure à 90%. Le témoin consistait de pots où aucune inoculation artificielle n'a été effectuée.

L'évaluation de la pathogénicité se fait par la notation des symptômes visibles sur les feuilles et sur tout le plant. Pour ces «notations visuelles», on utilise une échelle standardisée (Tableau.06).

Tableau 05: Echelle de notation pour l'évaluation de la résistance aux maladies (Michel, 2001)

Note	% surface	Symptômes
1	0	pas de symptômes
2	2,5	quelques symptômes
3	10	1/10 de la feuille/épi couvert de symptômes
4	25	1/4 de la feuille/épi couvert de symptômes
5	50	1/2 de la feuille/épi couvert de symptômes
6	75	1/4 de la feuille/épi exempt de symptômes
7	90	1/10 de la feuille/épi exempt de symptômes
8	97,5	traces de la feuille/épi sans symptômes
9	100	feuille/épi complètement couverts de symptômes

3.4 Évaluation de l'agressivité des isolats de *Fusarium* spp. et *curvularia* spp. sur la partie basale des plants de blé (méthode de la couche d'inoculum)

Selon le protocole d'Okello et al. (2019), chaque isolat été cultivé sur milieu PDA, puis 10 explants mycéliens (8 mm de diamètre) ont été transférés dans un flacon de 250 ml contenant un mélange : sable/farine de maïs pré-autoclavé à 120 °C pendant 20 minutes (54 g de sable, 6 g de farine de maïs et 10 ml d'eau distillée). Les flacons contenant l'inoculum ont été mélangés tous les 2 jours en agitant manuellement le flacon pour assurer une colonisation uniforme du mélange sable/farine de maïs.



Figure14 . une des etapes de la préparation de la couche d'inoculum.

Un mélange sable/farine de maïs sans l'agent pathogène a été utilisé comme témoin.

Les flacons ont été incubés à 20-22°C pendant 14 jours. À la plantation, les pots en plastique (10 cm) ont d'abord été remplis de 80 g de sol, suivis de 40 g d'inoculum puis de 40 g de sol avant de planter les graines. Dans chaque pot, cinq graines ont été plantées et recouvertes de 40 g supplémentaires de sol .

Notation des symptômes La notation des résultats se fait 15 jours après l'inoculation, et la sévérité de la pourriture des racines causée par les isolats sur les semis de maïs a été évaluée selon une échelle de notation de 1 à 5 décrite par Acharya et al. (2015), dans laquelle

- 1 = germination et semis sains sans colonisation racinaire visible
- 2 = germination et 1 à 19 % de la racine présentant des lésions
- 3 = germination et 20 à 74 % de la racine présentant des lésions
- 4 = germination et 75 % ou plus de la racine présentant des lésions
- 5 = colonisation complète des graines et fonte de semis

Pour l'analyse de la sévérité de la pourriture des tiges et la pourriture des racines, l'échelle a été convertie en pourcentage d'indice de sévérité (PIS) (Wheeler, 1969).

$$\text{PIS} = \frac{\sum \text{De toutes les notations numériques} \times 100}{\text{Nombre total d'observations} \times \text{score maximal sur l'échelle}}$$

4. Analyses statistiques

Une analyse de la variance à un seul facteur, par le logiciel stat box végétal 6.9 a été effectuée pour interpréter les résultats des tests de pathogénicité, les différences entre les isolats pour les paramètres étudiés ont été comparées à l'aide du test Tukey au seuil de 5 %.

Chapitre III

Résultats et Discussion

1. RESULTATS

1.1 Analyse de la mycoflore associée aux maïs

1.1.1 Taux de contamination des grains de maïs et Fréquence de la flore fongique

Des isollements ont été réalisés à partir des échantillons provenant de différentes régions du sud de l'Algérie, dans le but d'identifier les genres et les espèces fongiques associés aux grains de maïs. Ainsi 102 isolats fongiques réparties entre 6 genres ont été identifiées à des taux variables dans les échantillons.

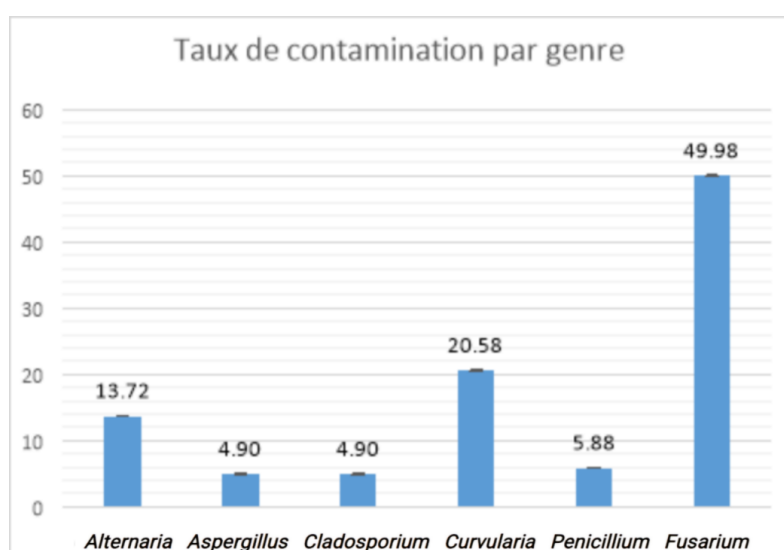


Figure 15 : Taux de contamination des grains de maïs par genre fongique.

Le graphique met en évidence la dominance nette du genre *Fusarium*, responsable de près de 50 % des contaminations recensées dans les échantillons analysés. Il est suivi par *Curvularia spicifera* (20,58 %) et *Alternaria sp.* (13,72 %). Les autres genres comme *Penicillium*, *Cladosporium* et *Aspergillus niger* apparaissent à des fréquences plus réduites, inférieures à 6 %.

Le tableau présente la distribution des genres fongiques selon les variétés de maïs analysées. Le genre *Fusarium* est dominant dans toutes les variétés, en particulier chez V4 avec 18 isolats, suivi de V3 avec 13 isolats.

Le genre *Curvularia spicifera* est également bien représenté, notamment chez V1 avec 9 isolats. En revanche, *Penicillium sp.* n'a été détecté que chez V2, tandis que *Aspergillus niger* apparaît faiblement dans l'ensemble des variétés.

Ces résultats suggèrent que le genre *Fusarium* constitue le principal agent fongique associé aux graines de maïs dans les conditions de l'étude.

➤ **Taux de contamination par espèce fongique**

Outre la répartition par genre, une identification plus approfondie a permis de distinguer plusieurs espèces au sein des genres isolés, notamment dans le genre *Fusarium*. Le tableau suivant présente les taux de contamination associés à chaque espèce identifiée.

Tableau 06: Taux de contamination des grains de maïs par les différentes espèces fongiques isolées.

Espèces	Taux de contamination
<i>Alternaria sp.</i>	13,72%
<i>Aspergillus niger</i>	4,90%
<i>Cladosporium sp.</i>	4,90%
<i>Curvularia spicifera</i>	20,58%
<i>Penicillium sp.</i>	5,88%
<i>Fusarium verticillioides</i>	5,88%
<i>Fusarium sporotrichioides</i>	19,60%
<i>Fusarium poae</i>	7,84%
<i>Fusarium proliferatum</i>	5,88%
<i>Fusarium subglutinans</i>	8,82%
<i>F.hostae</i>	1,96%

L'espèce la plus fréquemment rencontrée est *Curvularia spicifera* (20,58 %), suivie de *Fusarium sporotrichioides* (19,60 %) et *Alternaria sp.* (13,72 %). Les autres espèces de *Fusarium* sont présentes à des taux variables allant de 1,96 % à 8,82 %. La dominance de plusieurs espèces de *Fusarium* confirme la prédominance de ce genre dans les échantillons étudiés.

1.1.2 Description morphologique des espèces obtenues des isolements

Suite à l'isolement des champignons à partir des grains de maïs, plusieurs colonies présentant des aspects morphologiques distincts ont été obtenues sur milieu PDA. Afin d'identifier les espèces présentes, une observation détaillée de leurs caractéristiques macroscopiques (couleur, texture, forme) ainsi que microscopiques (type de conidies, phialides, etc.) a été réalisée. Cette étude a permis de regrouper les isolats selon leurs similarités morphologiques en vue d'une identification préliminaire.

Fusarium verticillioides

Fusarium verticillioides est un champignon filamenteux omniprésent, particulièrement reconnu pour son association avec le maïs. En culture, ses colonies affichent typiquement une texture duveteuse à floconneuse, évoluant souvent du blanc ou crème vers des teintes roses, violettes, voire pourpres foncées ou bleu-noir, avec une coloration parfois plus intense sur la face inférieure. Ces pigments peuvent également diffuser dans le milieu de culture.

Microscopiquement, ce champignon se caractérise par des hyphes septées et la présence de conidiophores souvent disposés en verticilles, qui donnent son nom à l'espèce. Sa morphologie est dominée par des microconidies abondantes, généralement unicellulaires, de forme ellipsoïdale à cylindrique, produites en chaînes distinctives ou en "fausses têtes". Moins fréquemment observées mais néanmoins importantes, les macroconidies sont pluricellulaires (souvent 3 à 5 septes), fusiformes, légèrement incurvées et présentent une cellule basale pédicellée caractéristique.

Ce sont ces traits morphologiques qui permettent d'identifier *F. verticillioides*, un pathogène agricole significatif et un producteur de mycotoxines.

Fusarium proliferatum

Fusarium proliferatum Le mycélium aérien finement floconneux à touffu, abondant, de couleur blanche, mais peut devenir violet avec l'âge (Howard, 2002). Les colonies peuvent atteindre 65 mm à 70 mm en 7 jours sur le milieu PDA. Des sporodochies peuvent être présentes sous forme d'entités discrètes ou presque confluentes sur des parties de la colonie. Un pigment diffusible de couleur violette est généralement produit. Des sclérotas de couleur bleue-noire peuvent se développer chez certaines souches (Leslie, 2006).

Cette espèce est caractérisée par la présence de rares microconidies, de nombreux monophialides et polyphialides et absence totale de chlamydospores. Les phialides sont en forme de bougie au début, mais deviennent en forme de boule après quelques jours.

Les microconidies ($510 \times 2,5-3 \mu\text{m}$) sont hyalines, larges, à paroi lisse, de forme variable, elles sont principalement pyramidales ou clavées à base aplatie mais aussi gonflées, piriformes, globuleuses-apiculées. Les macroconidies ($25-52,5 \times 2,5-5$) sont souvent formées, contenant de 3 à 5 loges.

Des sporodochies hyalines peuvent apparaître, en particulier dans les cultures de plus de 14 jours (Howard, 2002 ; Leslie, 2006).

Alternaria spp.

Alternaria spp. La colonie, blanc-gris au départ, devient rapidement foncée (vert foncé à noire) au recto comme au verso. La texture est duveteuse à laineuse. Les colonies mycéliennes sont vertes à marron foncé. Le mycélium aérien est ras et renferme une multitude de spores.

Les conidiophores sont bruns, ils supportent un grand nombre de spores, produites le plus souvent isolées. Plusieurs types de spores sont présents dans la même culture : - spores de type sphérique découpées par des cloisons en 2 ou 4 loges ; - spores de type elliptique, ressemblant

à des spores de certains *Stemphylium*. L'apex est rétréci et souvent arrondi aux deux extrémités ; - spores de type *Alternaria* typique, munies d'un rétrécissement apical plus ou moins allongé. Cette description correspond à celle du genre *Alternaria* selon la description de Woudenberg et al. (2013).

Fusarium sporotrichioides

Sur un milieu de culture comme le PDA (Potato Dextrose Agar), les isolats de *Fusarium sporotrichioides* développent un mycélium aérien qui est initialement blanchâtre ou légèrement violacé. Avec le temps, ce mycélium évolue vers des teintes plus foncées, allant du rose au rouge brunâtre.

Au niveau microscopique, la reproduction asexuée de *F. sporotrichioides* est caractérisée par la formation de conidies. Les sporodochies, qui sont des amas de conidiophores, produisent également ces spores. Bien que le texte initial mentionne des conidies de couleur "brun clair à brun foncé", il est important de noter que les conidies elles-mêmes sont généralement hyalines (transparentes) à légèrement pigmentées ; ce sont souvent les masses de spores ou le mycélium qui prennent ces couleurs.

Les macroconidies, dont la taille varie de 25 à 40 μm de long sur 3,5 à 5 μm de large, sont des éléments diagnostiques clés. Elles sont typiquement en forme de faucille ou de croissant, possédant le plus souvent 3 septa (cloisons), bien que 5 septa puissent parfois être observés. Leur cellule apicale est courbée et effilée, tandis que la cellule basale est généralement non pédicellée (sans pied). Ces macroconidies se forment directement sur les hyphes ou au sein des sporodochies. Quant aux microconidies, elles sont plus petites, mesurant 5 à 10 μm de long sur 2,5 à 7,5 μm de large. Elles sont unicellulaires et ont une forme ovoïde.

En plus de ces conidies, *F. sporotrichioides* produit aussi des chlamydospores. Ces structures de survie sont généralement sphériques et ont une paroi plus épaisse, leur donnant souvent une apparence plus foncée que les conidies. La légèreté des conidies, qu'elles soient

macro- ou micro-, facilite leur dispersion par le vent, l'eau ou d'autres vecteurs, contribuant ainsi efficacement à la propagation de ce champignon.

Fusarium hostae

Le *Fusarium hostae* est une espèce fongique qui, bien que moins connue que certains de ses congénères pathogènes majeurs, présente des caractéristiques morphologiques distinctes. En culture, ses colonies se développent souvent avec une texture duveteuse à cotonneuse. La coloration est généralement pâle, allant du blanc crème à des nuances légèrement rosées ou jaunâtres. Contrairement à d'autres espèces de *Fusarium* qui produisent des pigments intenses, *F. hostae* a tendance à montrer des couleurs plus subtiles, et la diffusion de pigments dans la gélose est moins fréquente ou moins marquée.

Au microscope, les traits clés incluent des hyphes septées ramifiées. Les conidiophores sont typiquement monophialidiques, c'est-à-dire qu'ils portent des phialides simples. Les microconidies, qui sont les spores les plus abondantes, sont généralement unicellulaires, de forme ellipsoïdale à ovale, et peuvent être produites en "fausses têtes" ou en courtes chaînes. Les macroconidies, bien que présentes, sont souvent moins nombreuses. Elles sont typiquement falciformes (en forme de faucille) ou fusiformes, avec un nombre variable de cloisons (généralement 3 à 5 septes), et possèdent une cellule basale qui peut être légèrement pédicellée. Les chlamydospores, des spores de résistance à paroi épaisse, sont généralement observées, soit en position terminale, soit intercalaire, et peuvent être solitaires ou en amas. Ces détails morphologiques sont cruciaux pour distinguer *F. hostae* des autres espèces au sein du genre complexe *Fusarium*.

F. subglutinans

En culture sur des milieux comme le PDA (Potato Dextrose Agar), les colonies de *F. subglutinans* sont typiquement duveteuses à cotonneuses, souvent assez denses. Leur coloration varie généralement du blanc crème à des nuances de rose pâle, de saumon ou de pêche. Il est fréquent d'observer une coloration plus intense au centre de la colonie ou au verso, ainsi qu'une possible diffusion de pigments rosés ou jaunâtres dans le milieu de culture.

Au niveau microscopique, *F. subglutinans* est caractérisé par des hyphes septées et ramifiées. La production de conidies est abondante. Les microconidies sont les spores prédominantes; elles sont majoritairement unicellulaires, de forme ovoïde à fusiforme, et sont souvent produites en fausses têtes mucilagineuses (agrégats de spores entourés d'une substance visqueuse), ce qui leur confère un aspect "glu", d'où le nom *subglutinans*. Elles peuvent également être observées en courtes chaînes. Les macroconidies sont moins fréquentes mais sont diagnostiques; elles sont généralement falciformes (en forme de faucille), avec 3 à 5 septa (cloisons), et possèdent des extrémités pointues et effilées. Leur cellule basale est souvent faiblement pédicellée ou non pédicellée. Les chlamydo-spores, des spores de résistance à paroi épaisse, sont généralement absentes ou très rares chez cette espèce, ce qui est un critère de distinction important avec d'autres *Fusarium*.

Aspergillus spp.

Les *Aspergillus* sont caractérisés par un appareil végétatif (thalle) formé de filaments mycéliens hyalins. Les conidiophores sont caractérisés par une cellule pied basale et sont renflés à leur extrémité distale en une vésicule sphérique ou ovoïde (Rapert & Fennell, 1965 ; Varga) . Une ou deux rangées de stérigmates (selon les espèces) prennent naissance sur cette vésicule. C'est à partir de ces stérigmates que les spores se forment en de très longues chaînes. Les spores sont claires, plus ou moins colorées ou noirâtres. Elles sont globuleuses à ovoïdes et mesurent de 2,5 à 4. Cette description correspond à celle du genre *Aspergillus* selon Warham et al. (1996) ainsi que Champion (1997).

Les isolats noirs ont été identifiés morphologiquement comme *A. niger* sur la base de l'aspect des colonies noir , de têtes de conidies bisériées (metulae) et de petites conidies. Les isolats d'*A. flavus* ont été identifiés morphologiquement sur la base de la couleur verte olive .

Cladosporium sp

En culture sur des milieux agarisés (comme le PDA ou le Malt Extract Agar), les colonies de *Cladosporium sp.* présentent des caractéristiques distinctives. Elles sont généralement de croissance lente à modérée, avec un aspect velouté à duveteux ou poudreux. La coloration est

un trait marquant : elles sont typiquement vert olive, vert-brun, brun foncé à presque noires sur la face supérieure, tandis que le revers de la colonie est également sombre, souvent noir. Cette pigmentation foncée est due à la présence de mélanine dans leurs parois cellulaires.

Au niveau microscopique, *Cladosporium* se caractérise par des hyphes septées de couleur olive à brune. La structure la plus distinctive est le conidiophore, qui est souvent ramifié, dressé et bien différencié, présentant des renflements (cicatrices conidiales ou geniculations) aux points où les spores se sont détachées. Les conidies (spores asexuées) sont produites en chaînes ramifiées caractéristiques. Elles sont de forme variable : ovoïdes, ellipsoïdales ou citriformes (en forme de citron), généralement unicellulaires ou bicellulaires, mais peuvent parfois avoir jusqu'à quatre septa. Leur paroi est lisse à verruqueuse et elles sont de couleur olive à brune, comme les hyphes. Ces conidies se détachent facilement, ce qui explique la facilité de dispersion des spores de *Cladosporium* dans l'environnement. Les *chlamydospores* sont généralement absentes.

Curvularia Spicifera

Le champignon *Curvularia specifera* a été décrit pour la première fois en 1972 par les mycologues indiens K.V. Seshadri et C.V. Subramanian. Colonies apparaissant vitreuses avec de la poudre de suie de conidies, ou poilues si la sporulation est faible. Conidiophores dressés, non ramifiés, cloisonnés, atteignant 250 μm de long et 4-8 μm de large, régulièrement en zigzag dans la partie apicale, avec des cicatrices plates brun foncé sur les bords. Conidies brunes, cylindriques aux extrémités arrondies. Les conidies sont sombres, ellipsoïdales à arrondies aux extrémités ou parfois légèrement effilées vers la base avec 2-3 septa transversales. La germination des conidies est bipolaire. Cette description correspond à celle de l'espèce *Curvularia spicifera* selon la description de Jeon et al. (2015).

Fusarium poae

Sur milieu PDA, *F. poae* produit un mycélium aérien dense, de couleur blanche à rose, qui peut devenir brun rougeâtre avec l'âge. La couleur du revers de la colonie peut varier du blanc jaune au rouge foncé. Les sporodochies sont rares, les macroconidies (1830 \times 3,5-7 μm)

sont également rares, relativement courtes, typiquement en forme de faucille, ont 3 à 5 septa mais principalement 3-septa avec une cellule apicale courbée et effilée et une cellule basale en forme de pied. Les microconidies ($5-10 \times 2,5-5 \mu\text{m}$) sont abondantes, globuleuses ou ovales à napiforme, parfois avec une papille distincte, de 0-1 septa, formées sur des conidiophores ramifiés qui apparaissent comme une grappe de raisin, les chlamydo-spores se forment rarement.

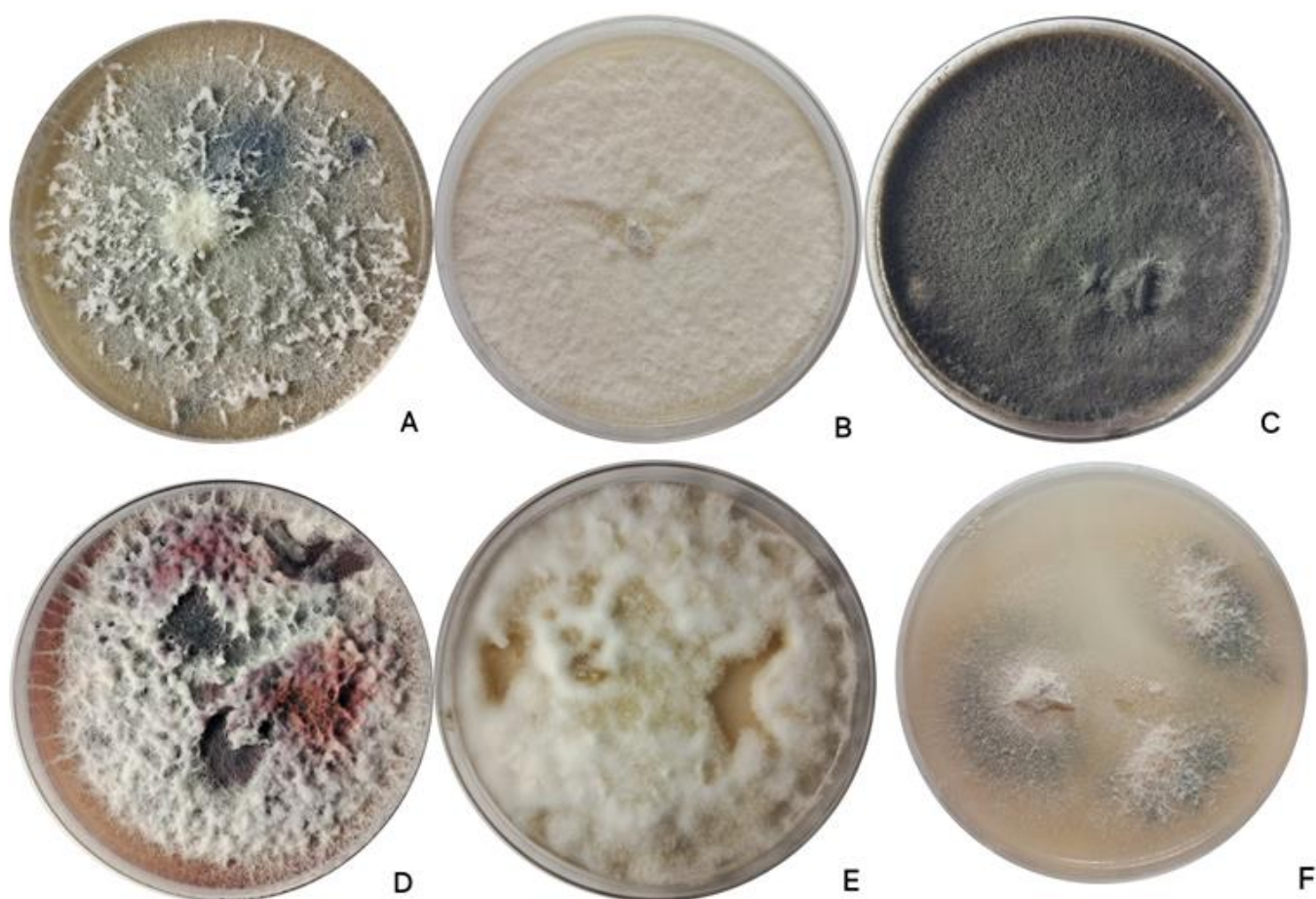


Figure : 16 : Aspect cultural des espèces fongiques isolées à partir des échantillons de maïs , après 7-10 jours d' incubation à l' obscurité sur milieu PDA à 22 °C

A : Fusarium verticillioides ; B : Fusarium proliferatum ; C : Alternaria sp. ;

D : Fusarium sporotrichioides ; E : F.hostae. ; F : F. subglutinans

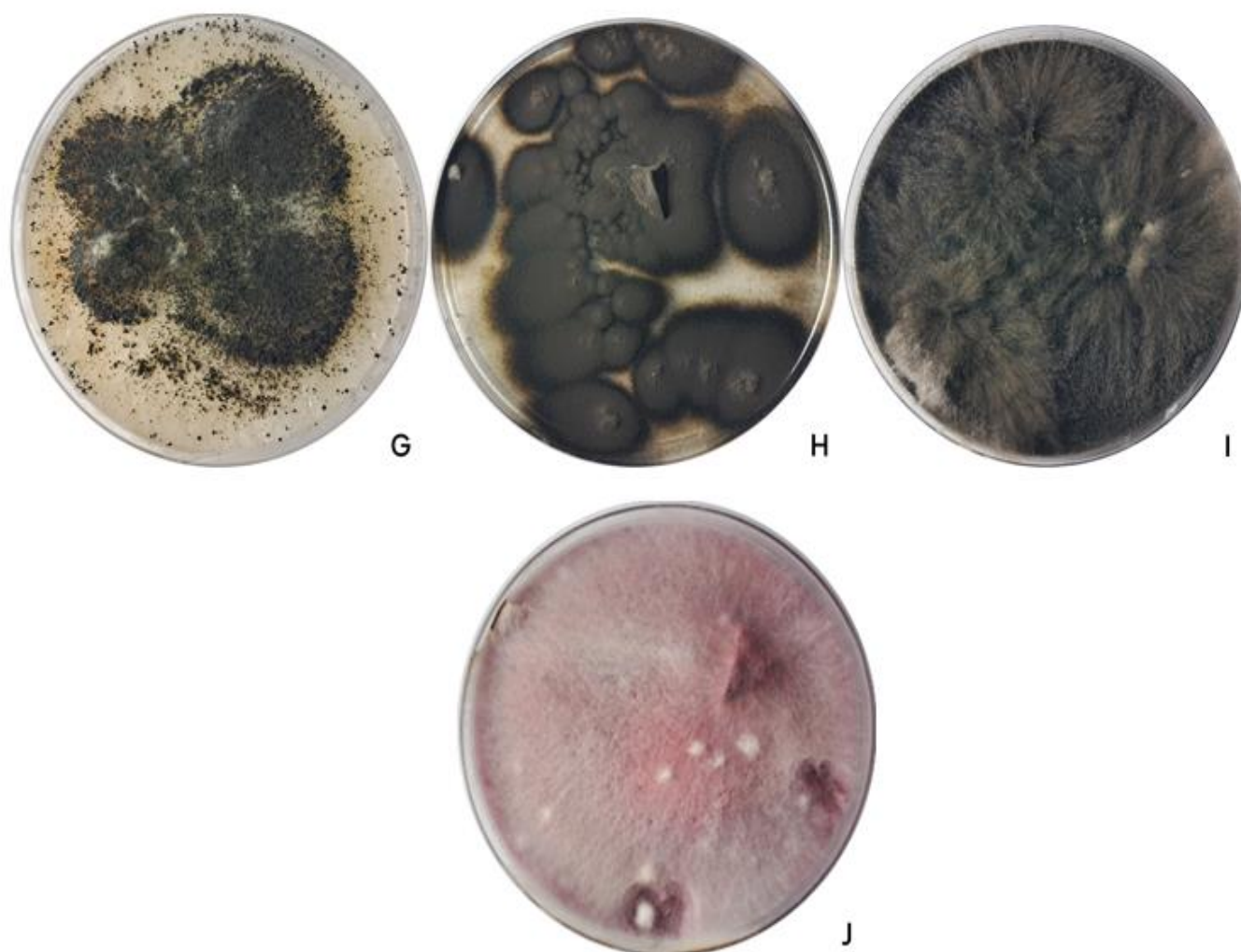


Figure 17 :Aspect cultural des espèces fongiques isolées à partir des échantillons de maïs , après 7-10 jours d' incubation à l' obscurité sur milieu PDA à 22 °C

G : Aspergillus sp. ; H : Cladosporium sp. ; I : Curvularia spicifera. ; J : Fusarium poae



Figure 18 : Aspect microscopique de l'espèce de *Fusarium verticillioides*

a : *Fusarium verticillioides*(grossissement *40)

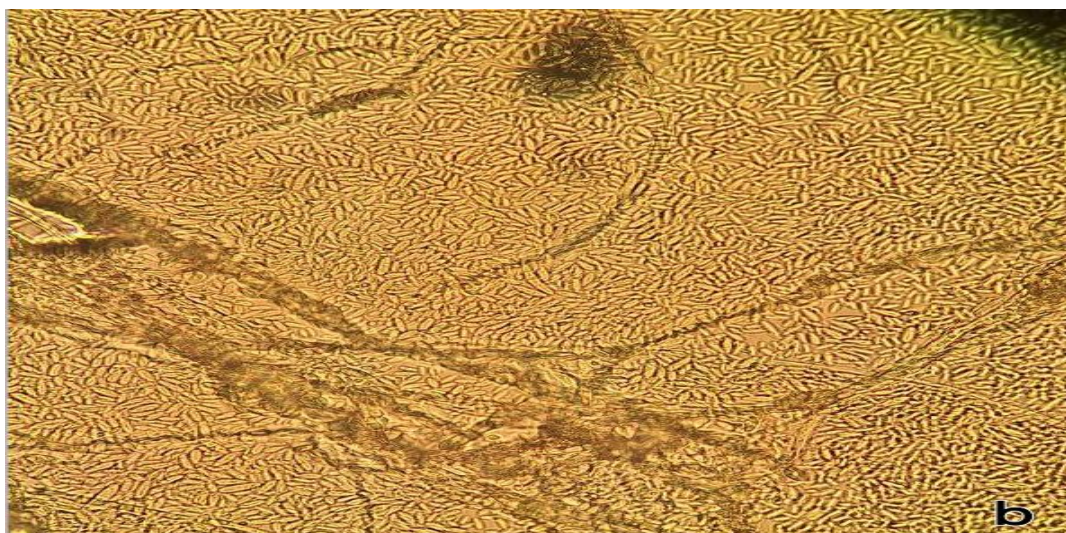


Figure 19: Aspect microscopique de l'espèce de *Fusarium proliferatum*



b : Fusarium proliferatum

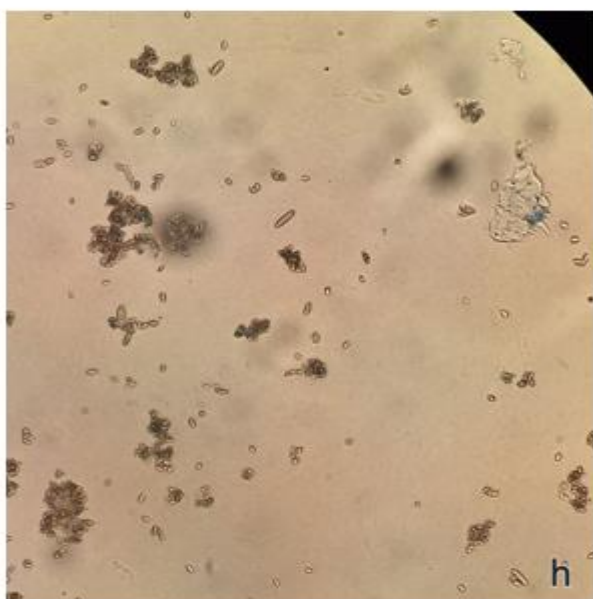


Figure 19: Aspect microscopique de l'espèce de *Alternaria sp. et Cladosporium*

c : Alternaria sp. ; h : Cladosporium spp.

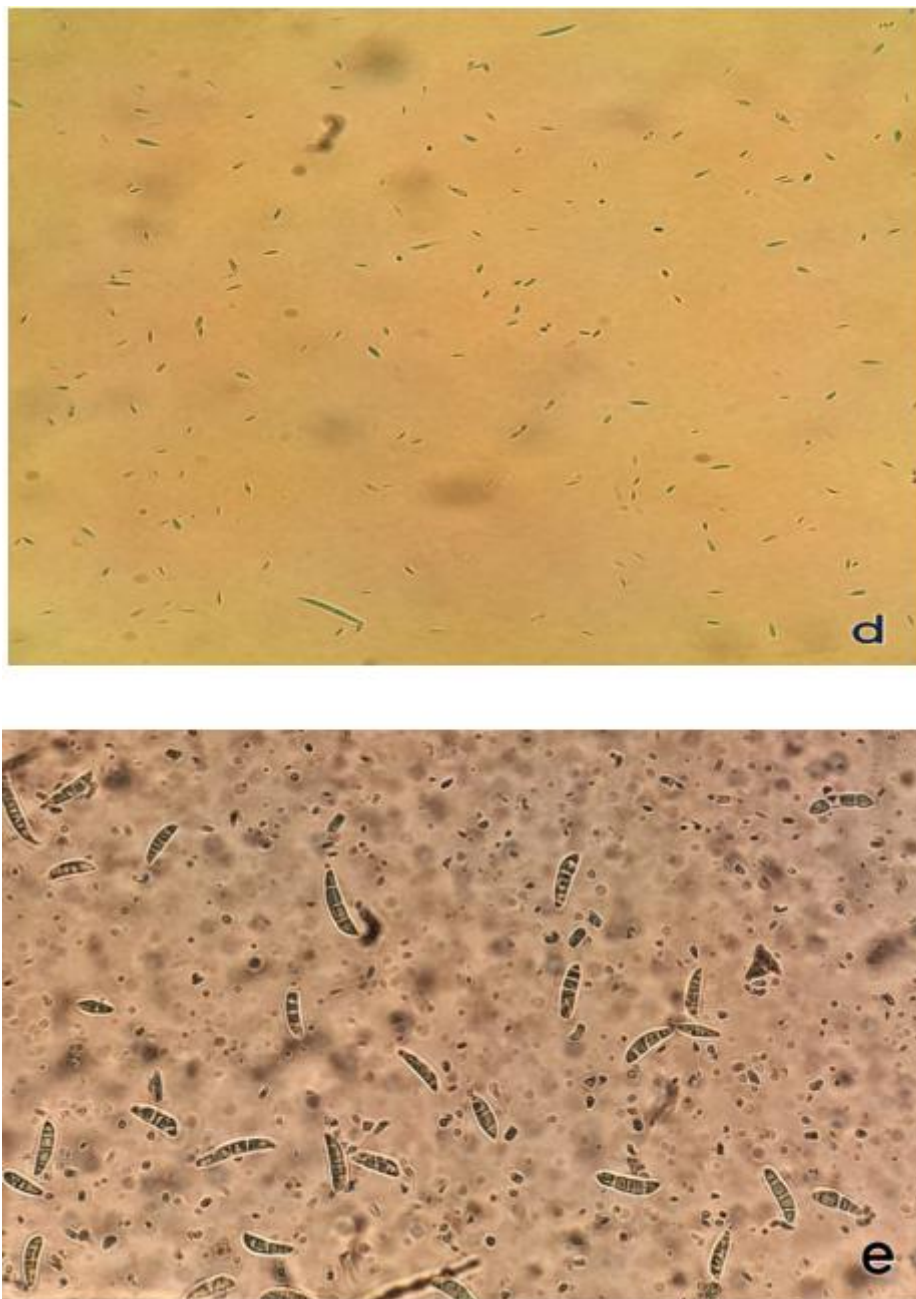


Figure 20 Aspect microscopique de l'espèce de Fusarium sporotrichioides et F.hostae. et

d : Fusarium sporotrichioides ; e : F.hostae.

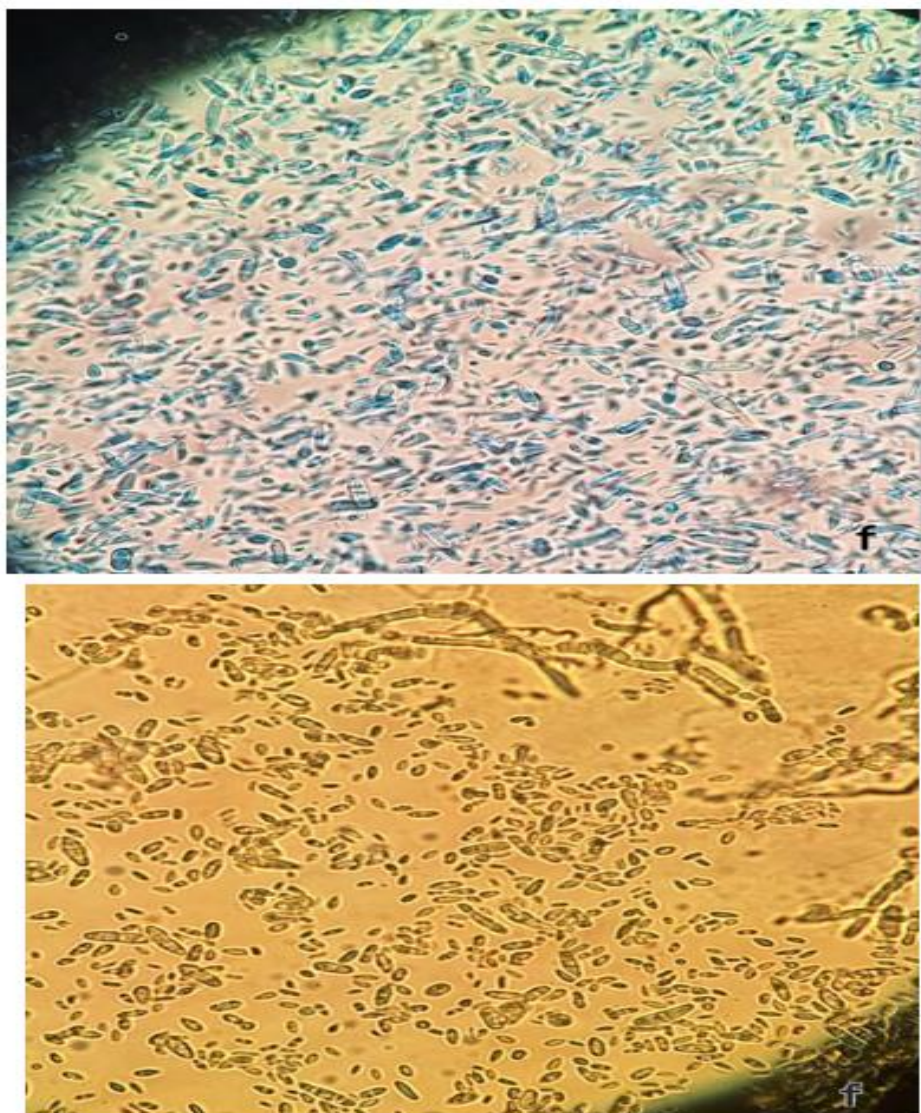


Figure 21 Aspect microscopique de l'espèce de F. subglutinans

f : F. subglutinans

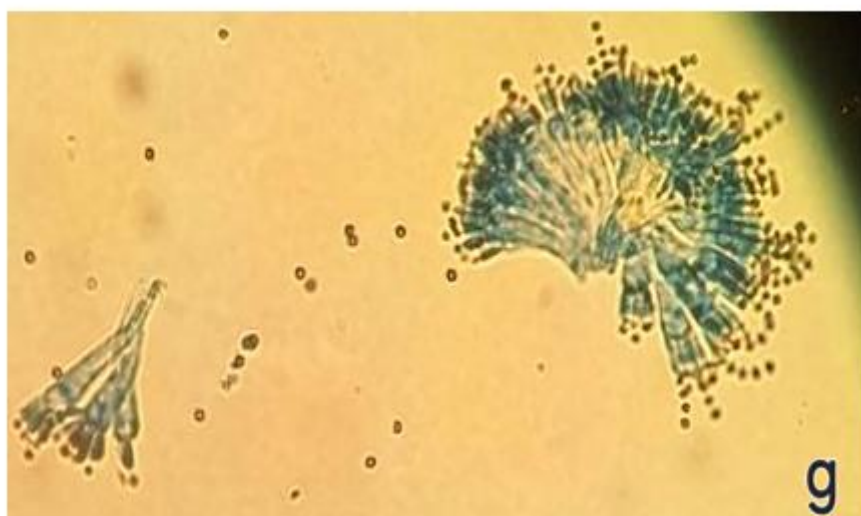
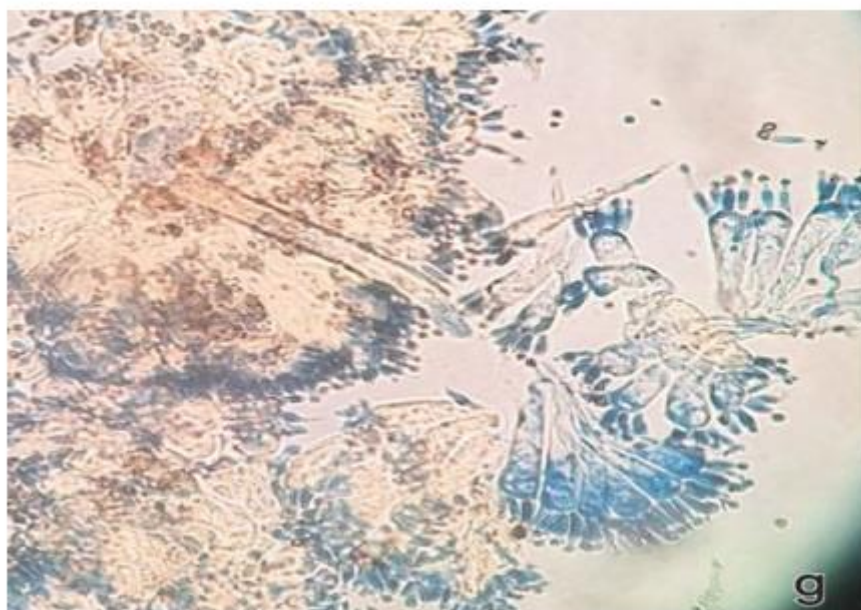


Figure 22 : Aspect microscopique de l'espèce de Aspergillus sp

g: Aspergillus sp



Figure : 23 Aspect microscopique de l'espèce de *Curvularia spicifera*

i: Curvularia spicifera

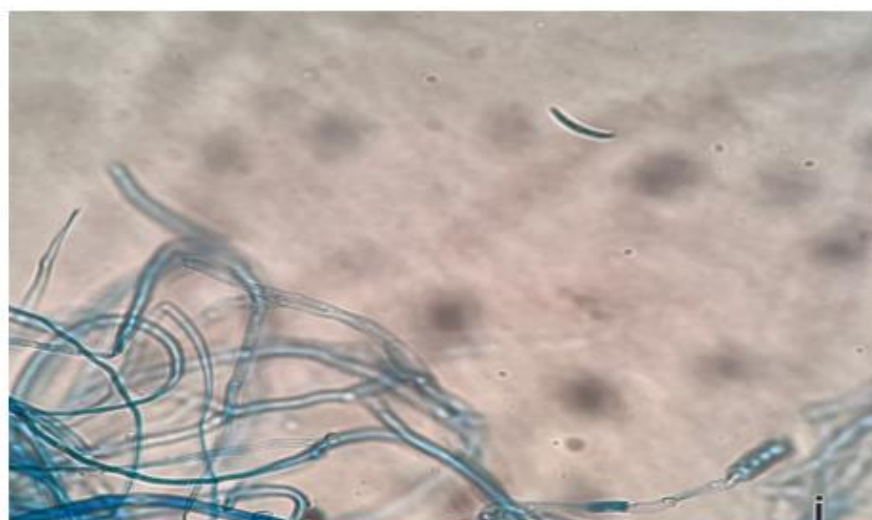


Figure : 24 Aspect microscopique de l'espèce de Fusarium poae

j : Fusarium poae

1.1.3 Mesure de la croissance

La vitesse de croissance est un des critères culturaux pour l'identification biologique.

Les 10 isolats appartenant aux deux espèces des genres *Fusarium*, *Culvularia* ont été incubé à 22°C, des mesures quotidiennes de la croissance mycélienne ont été prises après 24 h, 48 h, 72 h, 96 h et 120 h pendant 10 Jours d'incubation. Les résultats ont révélé une variabilité dans la croissance mycélienne entre les différents isolats de tous genres confondus, et entre les espèces du même genre.

Tableau 07 : Évolution du diamètre moyen (mm) des colonies fongiques durant 10 jours d'incubation à 22°C

Num d'isolat	21-avr.	22-avr.	23-avr.	24-avr.	25-avr.	26-avr.	27-avr.	28-avr.	29-avr.	30-avr.
IS5M6C	2mm	3mm	4mm	6mm	7mm	8mm	10mm	11mm	12mm	14mm
IS11M1F	4mm	7,5mm	10mm	24mm	26mm	28mm	30mm	31mm	32mm	38mm
IS10M2F	2,5mm	10mm	15mm	19mm	20mm	22mm	24mm	26mm	28mm	30mm
IS6M1F	1mm	5mm	10mm	14mm	17mm	19mm	20mm	22mm	23mm	25mm
IS8M3F	0	7mm	13mm	15mm	16mm	18mm	20mm	22mm	24mm	26mm
IS1M4F	1mm	3mm	10mm	13mm	15mm	18mm	20mm	24mm	26mm	30mm
IS9M4F	6mm	10mm	12mm	14mm	17mm	18mm	20mm	25mm	26mm	30mm
IS3M1F	0	4mm	15mm	18mm	20mm	22mm	25mm	28mm	30mm	30mm
IS7M1C	1mm	4mm	6mm	8mm	10mm	15mm	17mm	19mm	20mm	25mm
IS4M4F	7mm	9mm	15mm	25mm	26mm	28mm	30mm	33mm	36mm	40mm

Le suivi de la croissance a permis de tracer un graphique représentant la dynamique de développement de chaque isolat au fil du temps.

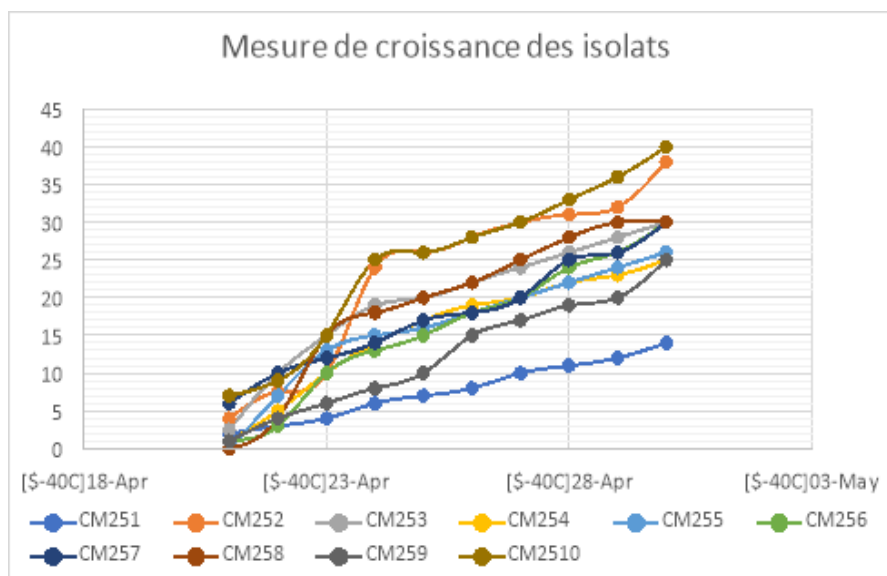


Figure 15 : Courbe de croissance mycélienne des différents isolats fongiques sur 10 jours.

Le suivi de la croissance mycélienne des dix isolats fongiques sur PDA a révélé des vitesses de développement différentes selon les isolats.

Parmi les isolats les plus rapides, ISO10 atteint un diamètre de 40 mm dès le 10^e jour, suivi par ISO2 (38 mm) et ISO8 (30 mm dès le 9^e jour). Ces isolats affichent une croissance soutenue à partir du 3^e ou 4^e jour, traduisant une capacité de développement élevée. D'autres isolats comme ISO1 montrent une croissance lente, n'atteignant que 14 mm à la fin de la période. De même, ISO4 et ISO5 présentent un développement progressif, ne dépassant pas 25-26 mm.

Globalement, la majorité des isolats présentent une croissance régulière avec un plateau apparent à partir du 8^e ou 9^e jour, suggérant une saturation des conditions de croissance en milieu PDA. Ces résultats confirment l'hétérogénéité du comportement mycélien entre les différentes espèces isolées.

1.2 Évaluation de la pathogénicité des isolats fongiques

Tous les isolats se sont montrés pathogènes sur les plants de maïs (Figure27).

Tableau 08 : Identification des 10 isolats de *Fusarium* spp. isolés en 2025 et utilisés dans le test de pathogénicité.

Isolats	Identification
IS1M4F	<i>Fusarium poae</i>
IS2M1F	<i>Fusarium verticillioides</i>
IS3M1F	<i>Fusarium verticillioides</i>
IS4M4F	<i>Fusarium poae</i>
IS5M6C	<i>Curvularia Spicifera</i>
IS6M1F	<i>Fusarium subglutinans</i>
IS7M1C	<i>Curvularia Spicifera</i>
IS8M3F	<i>Fusarium sporotrichioides</i>
IS9M4F	<i>Fusarium poae</i>
IS10M2F	<i>Fusarium verticillioides</i>

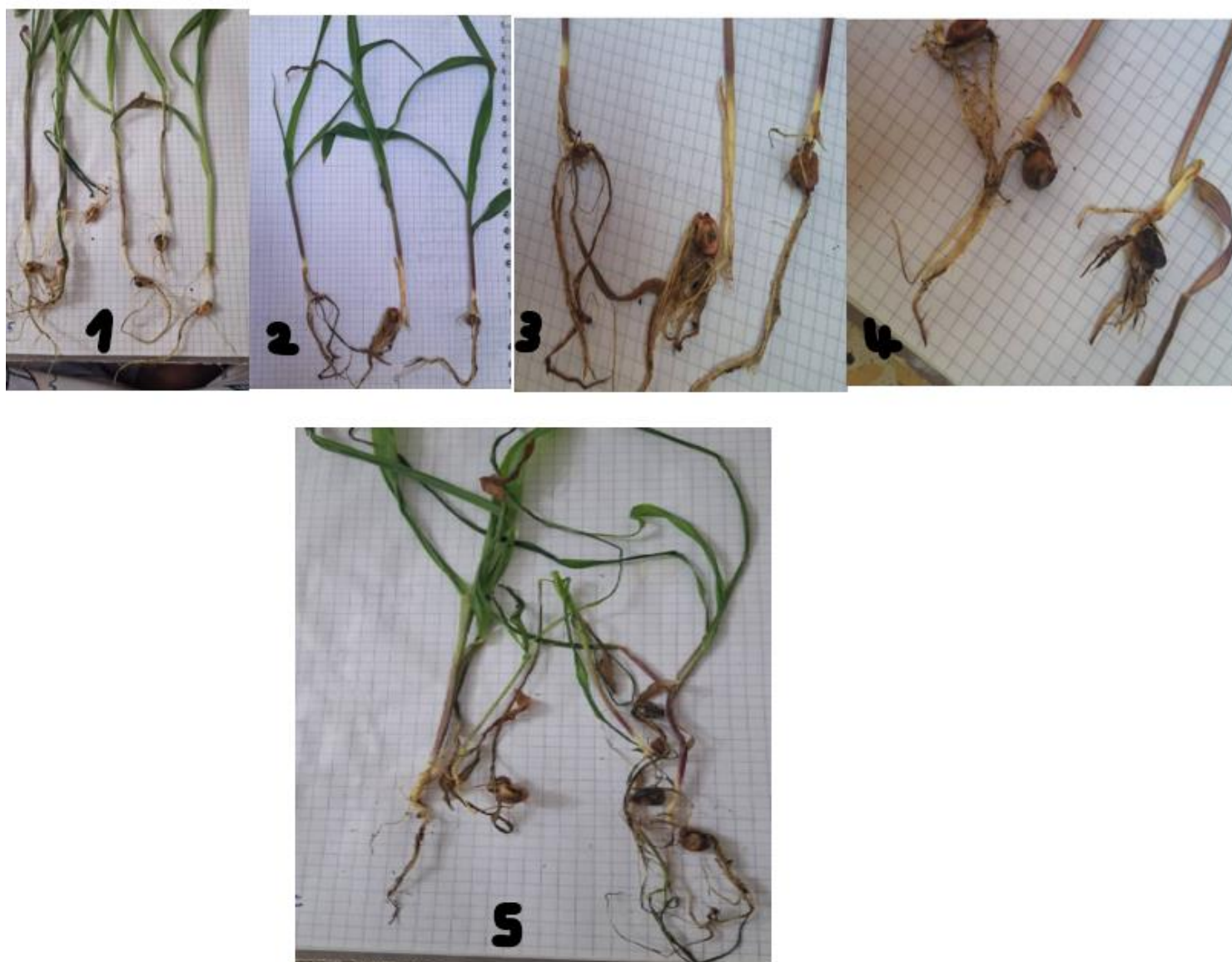


Figure 26 : Les différents degrés d'agressivité de *Fusarium* spp. et *Culvularia specifira* observés sur les racines du maïs après 15 jours d'inoculation par couche d'inoculum.

Le test de pathogénicité a été réalisé sur des plants de maïs en inoculant chacun des dix isolats fongiques sur trois plants distincts. L'apparition des symptômes a été observée pendant une période déterminée, et un indice de sévérité (PIS) a été calculé pour chaque isolat afin d'estimer son pouvoir pathogène.

L'analyse statistique par ANOVA a révélé une différence significative entre les isolats ($p < 0,05$), ce qui justifie la réalisation d'un test de comparaison multiple (test de Tukey) pour regrouper les isolats selon leur niveau de pathogénicité.

Le graphique ci-dessous (Figure 28) illustre les valeurs de l'indice de sévérité pour chaque isolat, tandis que le tableau récapitule les résultats détaillés avec le classement en groupes homogènes.

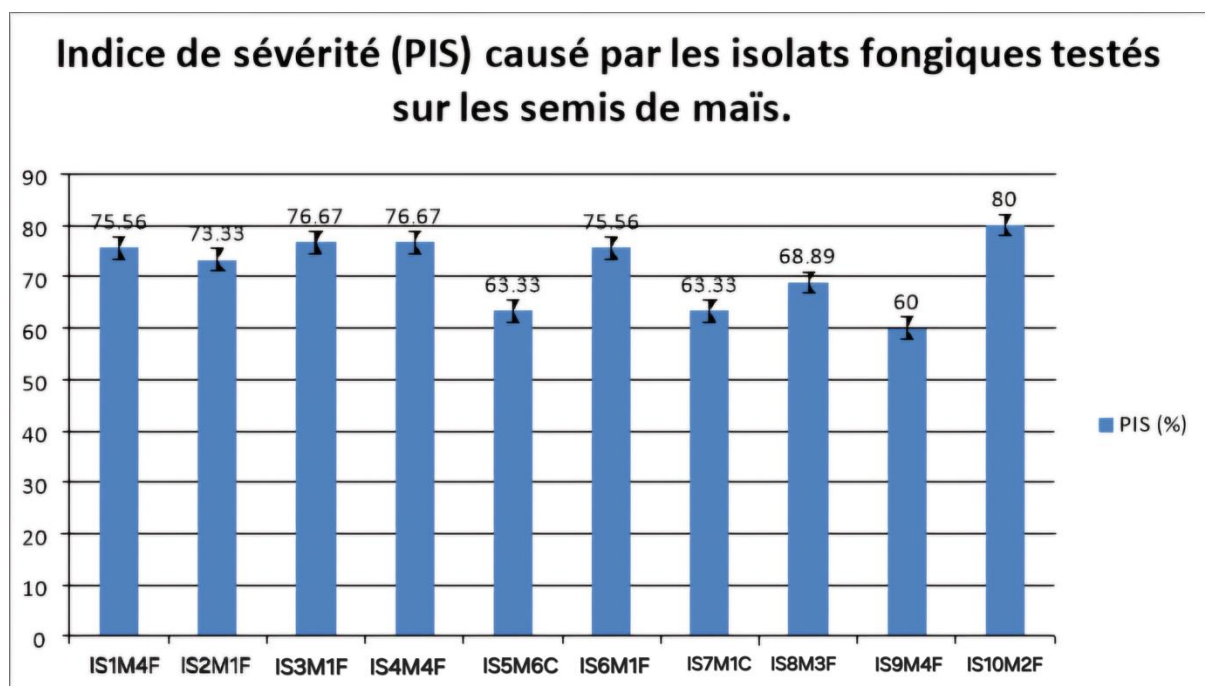


Figure 27 : Indice de sévérité (PIS) des isolats fongiques testés sur le maïs.

Tableau 09 : PIS moyen (%) des isolats et leur regroupement statistique (Tukey, $\alpha = 0,05$).

isolat	Nombre	PIS (%)	groupe homogène
IS1M4F	3	75,56	Ab
IS2M1F	3	73,33	abc
IS3M1F	3	76,67	ab
IS4M4F	3	76,67	ab
IS5M6C	3	63,33	c
IS6M1F	3	75,56	ab
IS7M1C	3	63,33	c
IS8M3F	3	68,89	bc
IS9M4F	3	60	c
IS10M2F	3	80	a

Les résultats obtenus montrent que l'isolat CM2510 présente le plus haut indice de sévérité (80 %), ce qui traduit une capacité pathogène élevée. D'autres isolats comme CM253, CM254, CM251 et CM256 ont également provoqué des symptômes sévères, avec des PIS supérieurs à 75 %.

À l'inverse, les isolats CM255, CM257 et surtout CM259 ont montré une pathogénicité plus faible, avec des indices variant entre 60 % et 63,33 %. Ces isolats sont classés dans le groupe homogène "c", indiquant une différence statistiquement significative avec les isolats les plus virulents.

Cette variabilité de sévérité entre isolats fongiques souligne l'importance de l'identification précise des agents pathogènes, en particulier dans le cas du genre *Fusarium*, connu pour inclure des espèces aux comportements très différents.

- Effet des isolats sur la croissance des plants de maïs

Dans le cadre de l'étude de la pathogénicité, un essai a été mené pour évaluer l'effet des isolats fongiques sur la croissance des jeunes plants de maïs. La longueur moyenne des feuilles et des racines a été mesurée après l'inoculation, et les résultats ont été représentés graphiquement.

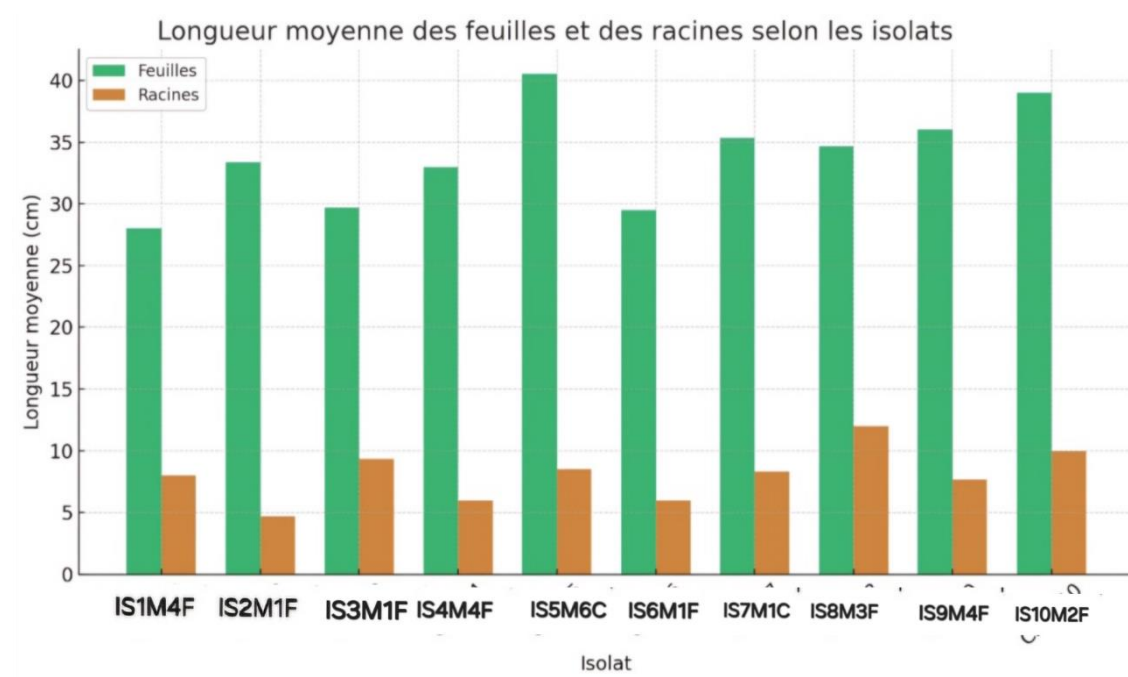


Figure 28 : Longueur moyenne des feuilles et des racines (\pm écart-type) chez les plants de maïs inoculés avec différents isolats fongiques

Le graphique ci-dessus illustre la longueur moyenne des feuilles et des racines des plants de maïs traités avec les différents isolats fongiques codés de CM251 à CM2510.

Une variabilité a été observée entre les isolats. Les isolats CM258, CM2510 et CM255 ont induit une croissance foliaire relativement plus élevée (≥ 38 cm), tandis que les isolats CM252 et CM256 ont présenté les longueurs moyennes les plus faibles. Concernant les racines, l'isolat CM258 se démarque avec une croissance racinaire nettement supérieure (≈ 12 cm), comparé à d'autres isolats comme CM252 et CM256, dont les moyennes tournent autour de 5 cm.

L'analyse statistique (ANOVA) n'a pas révélé de différence significative entre les isolats pour la longueur des feuilles ($p = 0,374$). Pour la longueur des racines, une tendance à la variation a été notée ($p \approx 0,053$), mais sans atteindre le seuil de signification ($p > 0,05$).

Ces résultats indiquent une influence variable mais modérée des isolats sur le développement végétatif du maïs, principalement au niveau racinaire.

En résumé, les résultats obtenus ont permis de caractériser la diversité fongique associée aux grains de maïs, ainsi que de mettre en évidence la variabilité du pouvoir pathogène et des effets sur la croissance végétative des plants. Ces données constituent une base essentielle pour la compréhension des interactions plante-pathogène, et seront discutées plus en détail dans la section suivante.

L'évaluation de la pathogénicité a montré que tous les isolats testés ont induit des symptômes sur les plants de maïs, mais avec des niveaux de sévérité variables. Notamment, l'isolat de *Curvularia spicifera* a provoqué des symptômes marqués tels qu'un retard de croissance et des décolorations foliaires, traduisant un pouvoir pathogène élevé.

En revanche, les isolats appartenant au genre *Fusarium* ont montré un effet pathogène plus modéré, avec des symptômes moins visibles ou faiblement exprimés dans les conditions de l'essai. Ces résultats suggèrent une différence significative dans l'agressivité des champignons testés.



Figure 29 : Symptômes causés par *Curvularia spicifera* sur les plants de maïs (source : Cheima METTCHE 2025)

Les images illustrent les symptômes caractéristiques induits par l'isolat de *Curvularia spicifera*, considérée comme l'une des espèces les plus agressives testées. Contrairement aux isolats de *Fusarium spp.*, qui ont montré un impact plus faible sur les plants, *Curvularia* a entraîné des nécroses au niveau des feuilles et une réduction notable de la croissance.

Discussion

L'analyse mycologique réalisée à partir des échantillons de maïs grain a révélé une diversité remarquable de champignons, avec une nette dominance du genre *Fusarium*, suivi de *Curvularia*, *Alternaria*, *Penicillium*, *Aspergillus*, *Cladosporium* et *Fusarium spp.* Cette richesse taxonomique témoigne d'un écosystème microbien complexe, influencé à la fois par les conditions climatiques, les pratiques agricoles et les méthodes de stockage.

La forte fréquence de *Fusarium spp.*, notamment *F. verticillioides*, *F. proliferatum* et *F. poae*, corrobore plusieurs études antérieures menées dans des régions agroclimatiques similaires. Par exemple, Desjardins (2006) et Logrieco et al. (2002) ont montré que le maïs constitue un hôte privilégié pour ces espèces, notamment dans les zones chaudes et humides, favorisant leur développement et leur dissémination. De même, une étude menée en Algérie

par Benamara et al. (2018) a signalé une prévalence élevée de *Fusarium* dans les cultures de maïs dans la région de Guelma.

Outre *Fusarium*, la présence de *Curvularia spicifera*, retrouvée à un taux de 20,58 %, mérite une attention particulière, car elle est rarement mentionnée dans les études classiques sur le maïs. Pourtant, Manamgoda et al. (2014) ont souligné son émergence en tant qu'agent pathogène secondaire dans plusieurs cultures, notamment sous conditions de stress. La détection d'*Alternaria et Cladosporium*, souvent considérés comme contaminants de surface ou opportunistes, reste également cohérente avec les travaux de Kpodo et al. (2000) au Ghana et Hell et al. (2000) au Bénin, où ces genres ont été isolés dans les grains stockés.

Cette diversité peut être interprétée comme un indicateur d'un stockage non optimal, ou encore d'une contamination croisée au champ. Les conditions environnementales locales, caractérisées par des températures élevées et des fluctuations d'humidité, peuvent également favoriser la croissance simultanée de champignons saprophytes et pathogènes. L'abondance relative de certaines espèces fongiques constitue donc un signal d'alerte important quant au risque mycotoxique potentiel.

Les essais de pathogénicité menés sur les plantules de maïs ont permis de mettre en évidence une variabilité significative du pouvoir pathogène des isolats fongiques testés. Les indices de sévérité (PIS) calculés ont varié de 60 % à 80 %, traduisant une hétérogénéité marquée entre les isolats en termes d'agressivité.

Les isolats IS10M2F, IS4M4F et IS3M1F ont montré les taux de sévérité les plus élevés (>76 %), témoignant d'un pouvoir infectieux important. À l'inverse, les isolats IS7M1C, IS8M3F et IS9M4F ont induit des symptômes plus modérés ($\approx 60\%$), suggérant un profil faiblement pathogène. L'analyse statistique par ANOVA a confirmé que les différences observées sont hautement significatives ($p < 0,05$), et les groupes homogènes identifiés appuient cette diversité de comportements parmi les isolats testés.

Ces observations rejoignent les travaux de Boutigny et al. (2011), qui ont démontré que même au sein d'une même espèce de *Fusarium*, la pathogénicité peut varier fortement d'un

isolat à l'autre, selon son origine géographique, ses conditions de culture, ou son patrimoine génétique. Desjardins et al. (1995) ont également rapporté des différences de virulence notables entre souches de *F. verticillioides*, certaines étant asymptomatiques tandis que d'autres provoquent des nécroses étendues sur les tissus végétaux.

Cette variabilité pourrait être liée à la capacité différentielle des isolats à produire des enzymes de dégradation (ex : cellulases, pectinases), des toxines, ou à leur vitesse de colonisation du tissu hôte. Elle souligne l'importance de ne pas généraliser le comportement d'une espèce à partir d'un seul isolat.

Sur le plan agronomique, cette diversité pose un défi majeur en termes de sélection variétale et de lutte biologique : une variété résistante à un isolat peut se révéler vulnérable à un autre plus agressif.

L'étude de la croissance des plantules inoculées avec les différents isolats fongiques a révélé des effets variables sur la longueur des feuilles et des racines, traduisant une interaction subtile entre le pathogène et l'hôte. Bien que les résultats statistiques n'aient pas montré de différence significative pour la longueur des feuilles ($p = 0,374$) ni pour celle des racines ($p = 0,053$), certaines tendances biologiquement pertinentes ont été observées.

En effet, des isolats tels que IS10M2F et IS2M1F ont été associés à des longueurs moyennes des feuilles et des racines plus faibles, suggérant un effet inhibiteur potentiel sur la croissance végétative. Cette inhibition pourrait s'expliquer par la production de métabolites secondaires phytotoxiques, souvent associés aux *Fusarium spp.*, tels que les fumonisines, les trichothécènes ou les moniliformines. Des études menées par Bacon et al. (1996) et Windham et al. (1989) ont déjà mis en évidence la capacité de certains isolats de *Fusarium verticillioides* à réduire la croissance des plantules sans provoquer de nécrose visible, ce qui rejoint nos observations.

La quasi-significativité observée pour la longueur des racines ($p = 0,053$) suggère une sensibilité racinaire accrue face à l'agression fongique, ce qui est également rapporté dans les travaux de Munkvold (2003). Les racines, étant le premier site de contact avec les pathogènes

du sol, constituent un indicateur sensible de stress biotique. L'absence de différences statistiquement significatives ne signifie pas absence d'effet, mais peut refléter une variabilité biologique entre les répétitions ou un effet subclinique non détecté par les outils classiques.

Ces résultats montrent que même les isolats moins virulents peuvent perturber la physiologie de la plante, probablement en modifiant l'équilibre hormonal (acide jasmonique, éthylène, etc.) ou la dynamique d'absorption de l'eau et des nutriments. Ce type d'effet silencieux constitue un enjeu agronomique réel, notamment en phase juvénile où le maïs est le plus vulnérable.

La présence dominante d'espèces du genre *Fusarium*, connues pour leur capacité à produire des mycotoxines dangereuses telles que les fumonisines (*F. verticillioides*, *F. proliferatum*), la zéaralénone (*F. poae*), ou encore les trichothécènes (*F. sporotrichioides*), constitue un risque non négligeable pour la santé humaine et animale. Plusieurs études, comme celles de Marasas (2001) et Pitt et al. (2012), ont mis en évidence le lien entre la consommation de maïs contaminé et l'apparition de pathologies graves, telles que le cancer de l'œsophage ou des troubles hépatiques.

Sur le plan agricole, la variabilité de la pathogénicité entre isolats fongiques complique la mise en place de stratégies de lutte uniformes. Un champ peut contenir à la fois des isolats très agressifs et d'autres plus modérés, ce qui exige des méthodes de diagnostic fines et des interventions ciblées. Comme le soulignent Munkvold et Desjardins (1997), la lutte contre les maladies fongiques du maïs ne peut reposer uniquement sur des traitements fongicides, mais nécessite une approche intégrée : rotation des cultures, sélection variétale, amélioration des conditions de stockage, et contrôle biologique.

Enfin, la variabilité observée dans la croissance végétative des plants inoculés rappelle que l'impact des champignons ne se limite pas aux symptômes visibles, mais inclut aussi des effets subtils sur la vigueur et le rendement potentiel. Cela renforce la nécessité d'investir dans des programmes de surveillance et de recherche à long terme.

Conclusion

Conclusion Générale

Conclusion

L'étude réalisée s'inscrit dans une démarche de diagnostic mycologique appliqué au maïs grain, une culture d'importance stratégique tant pour l'alimentation humaine qu'animale. Les analyses menées ont permis de révéler une diversité fongique notable, dominée principalement par le genre *Fusarium*, suivi d'autres genres comme *Alternaria*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Cladosporium* et *Curvularia*.

L'isolement et la caractérisation morphologique des souches fongiques ont conduit à l'identification de plusieurs espèces appartenant au genre *Fusarium*, parmi lesquelles *F. verticillioides*, *F. proliferatum*, *F. poae*, *F. subglutinans*, *F. hostae* et *F. sporotrichioides*. Cette diversité confirme la présence simultanée d'espèces potentiellement pathogènes et toxigènes dans les échantillons analysés.

Les essais de pathogénicité ont mis en évidence une variabilité marquée du pouvoir pathogène entre les isolats. Certains, comme IS10M2F, ont généré des indices de sévérité élevés, traduisant une forte capacité à induire des symptômes. D'autres isolats tels que IS9M4F ou IS5M6C ont montré une agressivité plus faible. Ces résultats soulignent la nécessité d'une caractérisation fine des souches présentes dans les cultures, en vue d'adopter des stratégies de lutte ciblées.

Par ailleurs, l'impact des isolats sur la croissance végétative a été évalué à travers la mesure de la longueur des feuilles et des racines. Bien que les résultats n'aient pas montré de différences statistiquement significatives, une tendance à la réduction de la croissance a été observée chez certains isolats. Cela pourrait indiquer une inhibition subclinique non détectée statistiquement, mais biologiquement présente.

Enfin, cette étude met en évidence la menace que représente la contamination fongique du maïs, non seulement sur le plan agronomique, mais aussi en termes de sécurité sanitaire. Elle appelle à renforcer les moyens de surveillance et de contrôle, notamment par l'adoption de

Conclusion Générale

bonnes pratiques agricoles, la sélection de variétés résistantes, et la détection précoce des souches les plus virulentes.

Cette étude ouvre la voie à des recherches futures visant à évaluer le potentiel toxigène des souches isolées, notamment celles du genre *Fusarium*. L'intégration de techniques de biologie moléculaire permettrait également une identification plus précise des espèces. Enfin, des essais de lutte biologique ou chimique pourraient être envisagés afin de limiter l'impact de ces agents pathogènes sur la production de maïs.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

Afrive. (2023). L'Algérie voit ses importations de maïs exploser grâce à l'industrie de l'alimentation animale. Consulté sur : <https://afrive.info/lalgerie-voit-ses-importations-de-mais-exploser-grace-a-lindustrie-de-lalimentation-animale>

Agrios, G. N. (2005). *Plant Pathology* (5th ed.). Academic Press.

Agri-Réseau. Les moisissures de l'épi du maïs grain. Disponible sur Agri-Réseau. [Ceci est une publication de référence souvent mise à jour; la date exacte doit être vérifiée sur le site].

Algérie Eco. (2024). L'Algérie lance un appel d'offres pour acheter 240 000 tonnes de maïs. Consulté sur : <https://www.algerie-eco.com/2024/11/13/lalgerie-lance-un-appel-doffres-pour-acheter-240-000-tonnes-de-mais>

APS. (2023). Une récolte de plus de 3,5 millions qx de maïs fourrager attendue à El-Meniaâ. Algérie Presse Service. Consulté sur : <https://www.aps.dz/regions/162765-une-recolte-de-plus-3-5-millions-qx-de-mais-fourrager-attendue-a-el-meniaa>

ARVALIS. (2023). Aflatoxines : le nettoyage est-il efficace pour réduire la contamination d'un lot de maïs ? [En ligne]. Disponible sur : <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/aflatoxines-le-nettoyage-pas-toujours-suffisant-pour-reduire-la-contamination-dun>

Bandyopadhyay, R., Kumar, M., & Atehnkeng, J. (2016). Biological control of aflatoxins in maize in Africa. *Phytopathology*, 106(12), 1417-1422.

Bayer Crop Science. (2025, June 2). Identification and Management of Curvularia Leaf Spot in Corn. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.cropscience.bayer.us/articles/channel/identification-and-management-of-curvularia-leaf-spot-in-corn>

Blandino, M., Reyneri, A., & Vanara, F. (2012). Effect of Bt maize on mycotoxin contamination in maize in Europe: A review. *Food and Chemical Toxicology*, 50(2), 224-229.

CARVIL O. N. (2016). Notes de cours FAMV, Haïti. *Phytopathologie II, les maladies des céréales tropicales*.

Champeil, P., Fourcaud-Trocmé, M., et al. (2004). Fungal species associated with maize stalk rot in France and their mycotoxin production. *Plant Disease*, 88(4), 430-436.

Chevalier Auguste. Les Productions végétales du Sahara et de ses confins Nord et Sud. Passé - Présent - Avenir . In: *Revue de botanique appliquée et d'agriculture coloniale*, 12^e année, bulletin n°133-134, Septembre-octobre 1932. pp. 669-924;

Références Bibliographiques

CIMMYT (International Maize and Wheat Improvement Center). (Date de consultation non spécifiée). Southern Corn Leaf Blight (*Cochliobolus heterostrophus*). [Recherchez sur le site du CIMMYT pour les fiches techniques actuelles].

Colvin, B. M., Harrison, L. R., & Backus, C. S. (1993). Pulmonary edema and hydrothorax in swine produced by fumonisin B1. *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*, 5(2), 226-231.

Crop Protection Network. (2024). Fungicide Efficacy for Control of Corn Diseases. [Ressource en ligne régulièrement mise à jour par un consortium d'universités].

Desjardins, A. E. (2006). *Fusarium Mycotoxins: Chemistry, Genetics, and Biology*. APS Press.

Dowd, P. F., Johnson, E. T., & Miller, J. D. (2004). Impact of insect feeding on *Fusarium* infection and mycotoxin accumulation in maize. *Journal of Stored Products Research*, 40(2), 173-191.

Duvick, J. P. (2001). Technology and the challenges of feeding the world. *Phytopathology*, 91(11), 1109-1111.

Eriksen, G. S., & Nordstoga, K. (1996). Zearalenone in cereals: A review. *Veterinary Research Communications*, 20(3), 195-202.

Extension, University of Delaware. (Date de consultation non spécifiée). *Curvularia Leaf Spot*. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.udel.edu/academics/colleges/canr/cooperative-extension/fact-sheets/curvularia-leaf-spot/>

FAO (1993). *Le maïs dans la nutrition humaine*, collection FAO : Alimentation et nutrition # 25, Rome, Italie.

Farr, D. F., & Rossman, A. Y. (2017). *Fungal Databases*, U.S. National Fungus Collections, ARS, USDA. [Consulter les bases de données mycologiques de l'USDA pour des informations actuelles].

Fell, A. (2023). "A Mixed Origin Made Maize Successful." *UC Davis News*. (Publié le 30 novembre 2023).

Gay Jean-Pierre. 1999. *Maïs, mythe et réalité*. Biarritz : Atlantica, p.116

Gelderblom, W. C., Kriek, N. P., et al. (2007). Fumonisins: From cancer to cryptic diseases. *Environmental Health Perspectives*, 115(7), 1032-1040.

Références Bibliographiques

Goswami, R. S., & Kistler, H. C. (2004). Fungal and plant genes involved in Fusarium head blight resistance in wheat. *European Journal of Plant Pathology*, 110(10), 1009-1025.

Hervé Le Guyader, « Pourquoi le maïs vient du pop corn », *Pour la science*, n° 480, octobre .95-p. 92 ,2017

<https://www.semae-pedagogie.org/sujet/mais-origine-caracteristiques/>

IARC (International Agency for Research on Cancer). (2002). Some traditional herbal medicines, some mycotoxins, formaldehyde, 2-butoxyethanol and thallium. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 82. Lyon: IARC.

IRDA (2009). Les insectes nuisibles et utiles du maïs sucré : mieux les connaître, 92p

Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire. (2013). Arrêté interministériel du 27 octobre 2013 fixant les teneurs maximales en certaines substances indésirables dans les denrées alimentaires. N° 62.

Kuiper-Goodman, T., Scott, P. M., & Watanabe, H. (1987). Risk assessment of the mycotoxin zearalenone. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 7(3), 253-300.

KWS. (Date de consultation non spécifiée). Mycotoxines : les conseils pour diminuer les risques sur maïs. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.kws.com/fr/fr/entreprise/presse/mykws-news/mycotoxines-les-conseils-pour-diminuer-les-risques-sur-mais/>

Langemeier, M., Jamann, T. M., Hartman, G. L. (2020). Emerging bacterial diseases in corn. *Plant Disease*, 104(5), 1300–1306.

Les Enjeux Éco. (2023). Importation de maïs : 900 millions de dollars consacrés annuellement. Consulté sur : <https://lesenjeuxeco.dz/importation-de-mais-900-millions-de-dollars-consacres-annuellement>

Leslie, J. F., & Summerell, B. A. (2006). *The Fusarium Laboratory Manual*. Blackwell Publishing.

LG Seeds Belgium. (2025). Les mycotoxines dans l'ensilage de maïs. [En ligne]. Disponible sur : <https://lgseeds.be/fr/les-mycotoxines-dans-lensilage-de-mais/>

Logrieco, A., Santini, A., et al. (2002). Maize ear rot and mycotoxins: A review. *Journal of Plant Pathology*, 84(2), 79-91.

Marasas, W. F., Riley, R. T., et al. (2001). Fumonisin: History and worldwide occurrence. *Environmental Health Perspectives*, 109(Suppl 2), 249-253.

Références Bibliographiques

- Miller, J. D. (2001). Mycotoxins in foods: An overview. *Journal of Food Protection*, 64(10), 1637-1642.
- Munkvold, G. P., & Stahr, K. P. (2017). Epidemiology and management of Fusarium ear rot of maize. In: *Maize: Mycotoxins and Management* (pp. 1-32). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America.
- Nelson, R. R. (1971). The pathogenicity of *Cochliobolus heterostrophus* to varieties of corn having Texas male-sterile cytoplasm. *Plant Disease Reporter*, 55(11), 999-1002.
- Nielsen, R., 2001. Grain fill stages in corn. Purdue University - Department of Agronomy.
- Ning Yang, Yuebin Wang, Xiangguo Liu, Minliang Jin, Miguel Vallebuena-Estrada. 2023 « Two teosintes made modern maize », *Science*, vol. 382, n° 6674, 1^{er} décembre 2023 .
- Pataky, J. K., & Pedersen, W. L. (1998). Inheritance of resistance to anthracnose stalk rot of corn. *Crop Science*, 38(2), 346-350.
- Paul, P. A., & Munkvold, G. P. (2004). Efficacy of fungicides for management of anthracnose stalk rot of corn. *Plant Disease*, 88(4), 362-368. (Utilisé ici comme référence générale pour l'usage des fongicides sur maïs, bien que l'étude porte sur l'anthracnose).
- Perspectives Agricoles. (2016). Qualité sanitaire du maïs grain : la prévention pour mieux maîtriser les risques. [En ligne]. Disponible sur : https://www.perspectives-agricoles.com/sites/default/files/imported_files/425_398725984797458421.pdf
- Pestka, J. J. (2007). Deoxynivalenol: Toxicity, mechanisms and animal health risks. *Animal Feed Science and Technology*, 137(3-4), 283-298.
- PIERRE C. H. (1999). Essai d'adaptation de trois (3) variétés de maïs (*Zea mays* L.) à Santo, plaine de Léogane. FAMV, Haïti, mémoire 45p.
- Plant Protection Today. (2021). Southern Corn Leaf Blight (SCLB). [Article de vulgarisation basé sur des pratiques de protection des cultures].
- Plantix. (Date de consultation non spécifiée). Pourriture Fusarienne de l'Épi. [En ligne]. Disponible sur : <https://plantix.net/fr/library/plant-diseases/100167/fusarium-ear-rot/>
- ResearchGate. (2019, December 28). Research progress on maize Curvularia leaf spot caused by Curvularia lunata. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/338193060_Research_progress_on_maize_Curvularia_leaf_spot_caused_by_Curvularia_lunata

Références Bibliographiques

ResearchGate.. Curvularia leaf spot (CLS) disease cycle in maize fields. Conidia of... [En ligne]. Disponible sur : https://www.researchgate.net/figure/Curvularia-leaf-spot-CLS-disease-cycle-in-maize-fields-Conidia-of-the-pathogen-are_fig1_366278723

Robertson, A. E., Munkvold, G. P., & Shroyer, J. P. (2007). Anthracnose Stalk Rot of Corn. Kansas State University, Department of Plant Pathology. [Ceci est un exemple de publication d'extension; des versions plus récentes ou similaires peuvent exister].

Roper, M. C. (2011). *Pantoea stewartii* subsp. *stewartii*: insights into the biology of a corn pathogen. *Molecular Plant Pathology*, 12(7), 628–637.

Rotter, B. A., Prelusky, D. B., & Pastyr, J. J. (1996). Toxicology of deoxynivalenol (vomitoxin). *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 48(1), 1-34.

Science, vol. 382, n° 6674,. novembre 2023 30

ScienceAgri. (2023). World Statistical Production of Maize (*Zea mays*) Based on Continent in 2023. Consulté sur : <https://www.scienceagri.com/2023/02/top-10-worlds-biggest-maize-producing.html>

Smeltzer, D. G., & Payne, G. A. (1998). Corn Diseases. In: *Corn: Chemistry and Technology*. American Association of Cereal Chemists.

Speijers, G. J. A., & Speijers, M. H. M. (2004). Combined toxic effects of mycotoxins. *Toxicology Letters*, 153(1), 1-13.

Thermo Fisher Scientific. (Date de consultation non spécifiée). m16 *Curvularia lunata*. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.thermofisher.com/phadia/wo/en/resources/allergen-encyclopedia/m16.html>

Wade Lizzie, 2023. Scientists thought they understood maize's origins. They were missing something big (genes from a long-lost wild relative may have sparked the invention of agriculture in the Americas)

Whitaker, T. B., Slate, A. B., & Giesbrecht, F. G. (2003). Development of statistical models for the removal of aflatoxin contaminated kernels from commercial lots of corn. *Food Additives & Contaminants*, 20(3), 271-282.

White, D. G. (1999). *Compendium of Corn Diseases*. 3rd ed. St. Paul, MN: American Phytopathological Society Press.

Wikipedia. (Date de consultation non spécifiée). *Cochliobolus lunatus*. [En ligne]. Disponible sur : https://en.wikipedia.org/wiki/Cochliobolus_lunatus

Références Bibliographiques

World Grain. (2024). IGC forecasts record maize output. International Grains Council. Consulté sur : <https://www.world-grain.com/articles/19629-igc-forecasts-record-maize-output>

Xu, W., Yu, J., & Guo, W. (2019). Machine learning in plant pathology: a review. *Plant Pathology*, 68(1), 3-12

ZeriMar Laboratoire. (Date de consultation non spécifiée). Mancha foliar por curvularia en Maíz. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.zerimarlaboratoire.com/predicts-plant-diseases-item/mancha-foliar-por-curvularia-en-ma%C3%AFz>